Tecnologia Mecânica I

Carlos Roberto Cauduro
Alessandro de Franceschi
Alexsandra Matos Romio

Santa Maria - RS
2016

Presidência da República Federativa do Brasil

Ministério da Educação

Secretaria de Educação Profissional e Tecnológica

© Colégio Técnico Industrial de Santa Maria

Este caderno foi elaborado pelo Colégio Técnico Industrial da Universidade Federal de Santa Maria para a Rede e-Tec Brasil.

Equipe de Elaboração
Colégio Técncio Industrial de Santa Maria

Reitor
Paulo Afonso Burmann/UFSM

Diretor
Luciano Caldeira Vilanova/CTISM

Coordenação Geral da Rede e-Tec/UFSM
Paulo Roberto Colusso/CTISM

Coordenação de Curso
Marco Aurelio Garcia Bandeira/CTISM

Professor-autor
Carlos Roberto Cauduro/CTISM
Alessandro de Franceschi/CTISM
Alexsandra Matos Romio/CTISM

Equipe de Acompanhamento e Validação
Colégio Técnico Industrial de Santa Maria – CTISM

Coordenação Institucional
Paulo Roberto Colusso/CTISM

Coordenação de Design
Erika Goellner/CTISM

Revisão Pedagógica
Elisiane Bortoluzzi Scrimini/CTISM
Jaqueline Müller/CTISM

Revisão Textual
Carlos Frederico Ruviaro/CTISM

Revisão Técnica
Miguel Guilherme Antonello/CTISM

Ilustração
Erick Kraemer Colaço/CTISM
Marcel Santos Jacques/CTISM
Morgana Confortin/CTISM
Ricardo Antunes Machado/CTISM

Diagramação
Emanuelle Shaiane da Rosa/CTISM
Tagiane Mai/CTISM

Ficha catalográfica elaborada por Maristela Eckhardt - CRB-10/737
Biblioteca Central da UFSM

C371t Cauduro, Carlos Roberto

Tecnologia mecânica I / Carlos Roberto Cauduro, Alessandro de Franceschi, Alexsandra Matos Romio. – Santa Maria : Universidade Federal de Santa Maria, Colégio Técnico Industrial de Santa Maria ; Rede e-Tec Brasil, 2016.

149 p. : il. ; 28 cm

ISBN: 978-85-9450-017-5

1. Engenharia mecânica 2. Engenharia dos materiais 3. Materiais

Apresentação e-Tec Brasil

Prezado estudante,

Bem-vindo a Rede e-Tec Brasil!

Você faz parte de uma rede nacional de ensino, que por sua vez constitui uma das ações do Pronatec – Programa Nacional de Acesso ao Ensino Técnico e Emprego. O Pronatec, instituído pela Lei nº 12.513/2011, tem como objetivo principal expandir, interiorizar e democratizar a oferta de cursos de Educação Profissional e Tecnológica (EPT) para a população brasileira propiciando caminho de o acesso mais rápido ao emprego.

É neste âmbito que as ações da Rede e-Tec Brasil promovem a parceria entre a Secretaria de Educação Profissional e Tecnológica (SETEC) e as instâncias promotoras de ensino técnico como os Institutos Federais, as Secretarias de Educação dos Estados, as Universidades, as Escolas e Colégios Tecnológicos e o Sistema S.

A educação a distância no nosso país, de dimensões continentais e grande diversidade regional e cultural, longe de distanciar, aproxima as pessoas ao garantir acesso à educação de qualidade, e promover o fortalecimento da formação de jovens moradores de regiões distantes, geograficamente ou economicamente, dos grandes centros.

A Rede e-Tec Brasil leva diversos cursos técnicos a todas as regiões do país, incentivando os estudantes a concluir o ensino médio e realizar uma formação e atualização contínuas. Os cursos são ofertados pelas instituições de educação profissional e o atendimento ao estudante é realizado tanto nas sedes das instituições quanto em suas unidades remotas, os polos.

Os parceiros da Rede e-Tec Brasil acreditam em uma educação profissional qualificada – integradora do ensino médio e educação técnica, – é capaz de promover o cidadão com capacidades para produzir, mas também com autonomia diante das diferentes dimensões da realidade: cultural, social, familiar, esportiva, política e ética.

Nós acreditamos em você!
Desejamos sucesso na sua formação profissional!

Ministério da Educação
Junho de 2016

Nosso contato
etecbrasil@mec.gov.br

Indicação de ícones

Os ícones são elementos gráficos utilizados para ampliar as formas de linguagem e facilitar a organização e a leitura hipertextual.

Atenção: indica pontos de maior relevância no texto.

Saiba mais: oferece novas informações que enriquecem o assunto ou "curiosidades" e notícias recentes relacionadas ao tema estudado.

Glossário: indica a definição de um termo, palavra ou expressão utilizada no texto.

Mídias integradas: sempre que se desejar que os estudantes desenvolvam atividades empregando diferentes mídias: vídeos, filmes, jornais, ambiente AVEA e outras.

Atividades de aprendizagem: apresenta atividades em diferentes níveis de aprendizagem para que o estudante possa realizá-las e conferir o seu domínio do tema estudado.

Sumário

Palavra do professor-autor **9**

Apresentação da disciplina **11**

Projeto instrucional **13**

Aula 1 – Materiais de construção mecânica **15**
1.1 Considerações iniciais 15
1.2 A estrutura atômica 15
1.3 Ligações atômicas 17
1.4 Estruturas cristalinas 20
1.5 Classificação básica dos materiais – metais, cerâmicos e polímeros 24

Aula 2 – Propriedades mecânicas, térmicas, elétricas, magnéticas e químicas **31**
2.1 Considerações iniciais 31
2.2 Propriedades mecânicas 31
2.3 Propriedades térmicas 48
2.4 Propriedades elétricas 49
2.5 Propriedades magnéticas 51
2.6 Propriedades químicas 54

Aula 3 – Diagrama de fases de materiais **65**
3.1 Considerações iniciais 65
3.2 Soluções e misturas 66
3.3 Sistemas isomorfos e eutéticos 70
3.4 Diagrama de equilíbrio ferro-carbono 77
3.5 Microestruturas do diagrama ferro-carbono 80

Aula 4 – Produção dos materiais metálicos mais comuns **89**
4.1 Considerações iniciais 89
4.2 Produção do ferro fundido e aço – alto-fornos 92
4.3 Conversores 94
4.4 Produção de outros metais 95

Aula 5 – Elementos de liga dos aços **103**
5.1 Considerações iniciais 103
5.2 Tipos de aços 103
5.3 Efeitos dos elementos de liga nas ligas ferrosas 112
5.4 Aços inoxidáveis 114
5.5 Ferros fundidos 116
5.6 Ligas de alumínio 123

Aula 6 – Tratamentos térmicos e termoquímicos do aço e de ligas de alumínio **131**
6.1 Considerações iniciais 131
6.2 Tratamentos térmicos do aço 132
6.3 Tratamentos termoquímicos do aço 138
6.4 Tratamentos térmicos de ligas de alumínio 139

Referências **147**

Currículo do professor-autor **148**

Palavra do professor-autor

Na idade antiga, o homem começou a desvendar os segredos dos materiais, que eram usados desde como utensílios domésticos, adornos, ferramentas agrícolas até artefatos bélicos. Assim, foram aparecendo materiais e técnicas para uso e produção dos materiais que retratavam a própria história da humanidade.

Historicamente, temos três períodos característicos quanto à capacidade do homem de trabalhar com materiais: idade da pedra (pré-história), idade do bronze (3300 a.C.) e a idade do ferro (1200 a.C.), sendo esta última o ponto mais alto de desenvolvimento antigo.

O fascínio do homem pelos materiais continuou na idade média, quando sem dispor de fundamentos científicos sólidos, os alquimistas buscavam a pedra filosofal, com o objetivo de obter ouro a partir de outros materiais.

Depois, o advento da revolução industrial propiciou a substituição dos métodos artesanais de manufatura, possibilitando a produção de bens em larga escala. E para produzir, deve-se dispor de materiais e processos adequados, que começaram a aparecer para diversas aplicações.

Atualmente, vivemos um período onde temos inúmeros materiais disponíveis. Os avanços científicos e tecnológicos são grandes e dispomos de materiais que nem em sonho o homem antigo imaginaria. Nunca, tantos materiais e utensílios estiveram tão disponíveis ao homem como hoje em dia.

Realmente, os produtos feitos pelo homem são diversificados, e o processamento dos seus materiais envolve diversos aspectos como fundição, conformação, metalurgia do pó, usinagem e nanotecnologia, por exemplo.

Nessa disciplina de Tecnologia Mecânica I, veremos propriedades e características básicas dos materiais, com ênfase aos materiais ferrosos.

Prof. Carlos Roberto Cauduro
Prof. Alessandro de Franceschi
Profª. Alexsandra Matos Romio

Apresentação da disciplina

Prezado aluno:

Nessa disciplina de Tecnologia Mecânica I, serão abordados e estudados os aspectos básicos e fundamentais para entender os materiais e as suas transformações, visando seu uso em atividades mecânicas.

Inicialmente, veremos a classificação básica de materiais: cerâmicos, metálicos e polímeros, mostrando as ligações entre átomos e moléculas e as estruturas cristalinas e defeitos nela presente, que determinarão as propriedades dos materiais.

Para auxiliar na seleção de um material em função de sua aplicação, veremos diversas propriedades mecânicas, elétricas, térmicas e magnéticas. Veremos, ainda, conceitos fundamentais como resistência mecânica, tenacidade e dureza. Também, veremos a diferença entre material dúctil e frágil.

Em seguida, veremos os chamados diagramas de equilíbrio, que nos informam a quantidade de fases presentes quando misturamos elementos diferentes em uma dada temperatura. No caso dos elementos ferro e carbono, o seu diagrama de equilíbrio nos auxilia a inferir as propriedades de uma determinada peça e, também, escolher o tratamento térmico adequado em função da microestrutura presente.

Também, iremos ver os processos básicos de extração de alguns metais, conhecidos como redução, sendo destes, o mais importante, o alto-forno para a produção do ferro-gusa, que é a base para a produção do aço.

Na sequência, será possível analisar tópicos sobre elementos de liga, que mudam as propriedades dos metais ferrosos. Alguns elementos, como o cromo, influem na corrosão e resistência, e outros, como o fósforo, tornam mais fácil a sua usinagem.

Finalmente, o entendimento do diagrama de equilíbrio e o mecanismo das transformações de fase fornecem subsídios para compreender os tratamentos térmicos dos aços, como a têmpera e o revenido, além das ligas de alumínio, como o processo de envelhecimento. Os tratamentos térmicos mudam significativamente as propriedades dos metais.

Assim, cabe a nós escolher o material e processo adequado ao nosso projeto, levando em conta o custo, a sua disponibilidade, as propriedades requeridas e a responsabilidade envolvida.

Bons estudos a todos.

Projeto instrucional

Disciplina: Tecnologia Mecânica I (carga horária: 60h).

Ementa: Elencar as características gerais dos materiais aplicados à construção mecânica, suas propriedades, especificação e aplicações industriais. Entender as modificações dos metais devido à composição e tratamento térmico. Conhecer os microconstituintes básicos de ligas ferrosas. Conhecer os processos básicos de redução de metais comuns.

AULA	OBJETIVOS DE APRENDIZAGEM	MATERIAIS	CARGA HORÁRIA (horas)
1. Materiais de construção mecânica	Conhecer a estrutura atômica e ligações dos materiais. Conhecer as estruturas cristalinas dos materiais e seus defeitos. Identificar as características básicas dos tipos de materiais: metais, cerâmicos e polímeros.	Ambiente virtual: plataforma Moodle. Apostila didática. Recursos de apoio: *links*, exercícios.	08
2. Propriedades mecânicas, térmicas, elétricas, magnéticas e químicas	Conhecer as propriedades mecânicas básicas: curva tensão × deformação, elasticidade, plasticidade, encruamento, deformações específicas e verdadeiras, ductibilidade, tenacidade, resiliência, dureza e fadiga. Conhecer as propriedades térmicas, elétricas, magnéticas e químicas.	Ambiente virtual: plataforma Moodle. Apostila didática. Recursos de apoio: *links*, exercícios.	10
3. Diagrama de fases de materiais	Analisar soluções e misturas em geral. Analisar soluções sólidas substitucionais e intersticiais. Conhecer sistemas isomorfos e eutéticos. Identificar as microestruturas do diagrama Fe-Fe_3C; ferrita, austenita, cementita e perlita.	Ambiente virtual: plataforma Moodle. Apostila didática. Recursos de apoio: *links*, exercícios.	12
4. Produção dos materiais metálicos mais comuns	Conhecer os processos básicos de extração de metais: pirometalurgia, hidrometalurgia e eletrometalurgia. Conhecer o alto forno e conversores usado na produção do ferro gusa e aço. Conhecer os processos de extração mais comuns para alumínio, zinco e cobre.	Ambiente virtual: plataforma Moodle. Apostila didática. Recursos de apoio: *links*, exercícios.	08
5. Elementos de liga dos aços	Conhecer a classificação dos aços, ferros fundidos e alumínio. Conhecer o efeito de cada liga nas propriedades do aço ou alumínio. Conhecer os tipos de aços inoxidáveis e aplicações.	Ambiente virtual: plataforma Moodle. Apostila didática. Recursos de apoio: *links*, exercícios.	10

AULA	OBJETIVOS DE APRENDIZAGEM	MATERIAIS	CARGA HORÁRIA (horas)
6. Tratamentos térmicos e termoquímicos do aço e de ligas de alumínio	Conhecer os tratamentos térmicos mais comuns: têmpera, revenimento, normalização, recozimento, austêmpera, martêmpera. Conhecer as curvas tempo-temperatura-transformação – TTT. Conhecer os tratamentos térmicos e termoquímicos mais comuns: cementação, carbonitretação, nitretação e boretação. Conhecer os tratamentos térmicos de ligas de alumínio: solubilização, envelhecimento e estabilização.	Ambiente virtual: plataforma Moodle. Apostila didática. Recursos de apoio: *links*, exercícios.	12

Aula 1 – Materiais de construção mecânica

Objetivos

Conhecer a estrutura atômica e ligações dos materiais.

Conhecer as estruturas cristalinas dos materiais e seus defeitos.

Identificar as características básicas dos tipos de materiais: metais, cerâmicos e polímeros.

1.1 Considerações iniciais

Hoje, sabemos que a unidade básica da matéria são os átomos e que através de ligações entre eles são formados todos os materiais conhecidos. Temos a tabela periódica dos elementos, que é uma forma organizada de representar todos os átomos conhecidos, onde constam, pelo menos, o número atômico, o símbolo e a massa atômica.

1.2 A estrutura atômica

Os átomos, basicamente, possuem um núcleo e uma eletrosfera. No núcleo estão os prótons, de carga positiva e os nêutrons, indicados por N, sem carga. Na eletrosfera estão os elétrons, de carga negativa. Quando o átomo está em equilíbrio, o número de prótons é igual ao número de elétrons. Um elemento químico em equilíbrio possui o mesmo número de prótons em seu núcleo. O número de prótons fornece o **número atômico**, indicados pela letra **Z**. A soma do número de prótons e nêutrons fornece o número de massa, indicado pela letra **A**, do átomo. A massa dos elétrons é desprezível frente ao próton ou nêutron.

Assista a um vídeo sobre animação em uma engrenagem de aço mostrando estruturas visível a olho nu, e com aumento crescente de diversas microestruturas, até atingir o nível atômico em: https://www.youtube.com/watch?v=dNvdrpEmS48

Na Figura 1.1 temos o elemento carbono (C), com suas informações básicas contidas em uma tabela periódica:

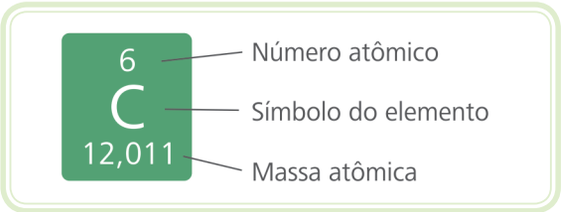


Figura 1.1: Representação do elemento carbono na tabela periódica, contendo basicamente seu símbolo C, o número de prótons e a massa atômica
Fonte: CTISM

O símbolo do elemento carbono é C, o seu número atômico **Z** é 6, ou seja temos 6 prótons, e a massa atômica **A** é 12,011. Se fosse só o isótopo carbono-12, a massa atômica seria 12 exato. Mas, na natureza, temos os isótopos Carbono-12, Carbono-13 e Carbono-14, com massas atômicas levemente diferentes. O carbono-12 é o isótopo do carbono mais comum e possui 6 prótons e 6 nêutrons. A média ponderada da massa desses isótopos, na natureza, fornece 12,011 como a massa atômica **A** do carbono. Todo elemento que possuir isótopos, possuirá uma massa atômica não inteira.

Vamos definir os conceitos de isótopos, isóbaros e isótonos, que envolvem massa atômica, número de prótons e de nêutrons, relacionados entre si pela relação:

$$A = Z + N$$

- **Isótopos** – mesmo elemento, ou seja mesmo número de prótons, porém com número de nêutrons diferentes.

- **Isóbaros** – elementos diferentes. Possuem o mesmo número de massa e diferente número de prótons.

- **Isótonos** – elementos diferentes, com mesmo número de nêutrons, mas com número de prótons e de massas atômicas diferentes.

Os isótopos possuem propriedades químicas iguais, porém suas propriedades físicas podem diferir. Um exemplo é o Urânio-235, que é físsil, usado em energia atômica, possuindo 92 prótons e 143 nêutrons. Consultando a tabela periódica, a massa atômica do Urânio é 238,03 na média, indicando que o isótopo U 235 não é comum, e para obtê-lo em quantidade, é necessário usar um processo de enriquecimento do Urânio, que aumenta o percentual do isótopo U 235.

1.3 Ligações atômicas

Na natureza, os átomos estão ligados a outros átomos iguais ou diferentes, formando elementos químicos puros como o O_2 ou compostos, como o H_2O. Para entender as ligações entre os átomos, vamos estudar as chamadas camadas de valência que se apresentam na eletrosfera do átomo, onde ficam os elétrons. Os níveis principais são o K, L, M, N, O, P e Q.

Na Figura 1.2, vemos o diagrama de Linus Pauling, e o seu preenchimento a partir do nível K, que possui apenas o subnível s, que pode ter no máximo 2 elétrons. Os subníveis s, p, d e f possuem um número máximo de elétrons que podem ter, e são indicados pelos números 2, 6, 10 e 14, respectivamente.

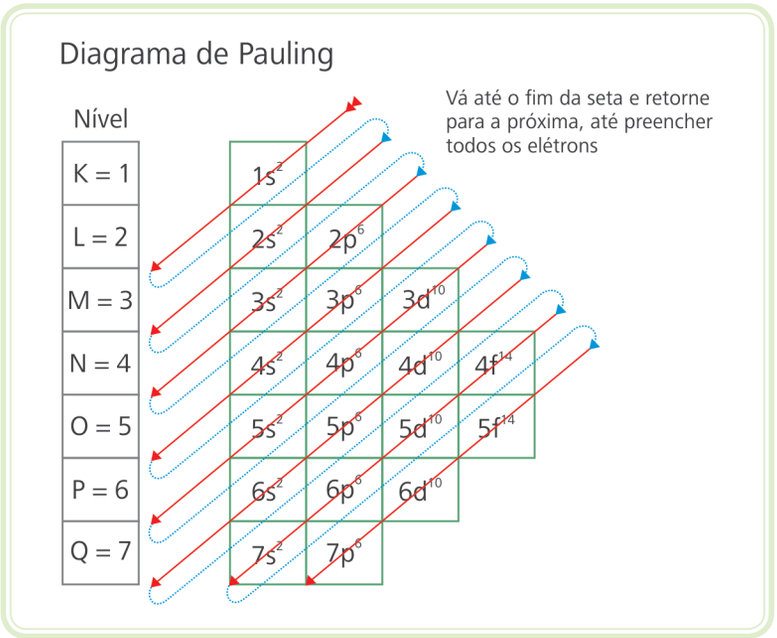


Figura 1.2: Esquema de preenchimento da eletrosfera, conforme diagrama de Linus Pauling
Fonte: CTISM

Exemplos

a) Qual é a distribuição eletrônica do He?

Como Z = 2, temos também 2 elétrons. Indo no diagrama de Pauling, vem a distribuição eletrônica $1s^2$, ou seja, temos o nível K = 1, com dois elétrons.

b) Qual é a distribuição eletrônica do C?

Como o número atômico é Z = 6. Temos 6 elétrons, vindo a distribuição $1s^2\,2s^2\,2p^2$.

Observe que vamos distribuindo os elétrons pelos subníveis e o subnível p do segundo nível L ficou com 2 elétrons apenas, indicado por $2p^2$.

c) Qual é a distribuição eletrônica do Fe?

Z = 26 → 26 elétrons.

A distribuição eletrônica é $1s^2\ 2s^2\ 2p^6\ 3s^2\ 3p^6\ 3d^6\ 4s^2$ – observe que o nível $3d^6$ é preenchido após o nível $4s^2$.

Sabemos que os átomos se ligam a outros átomos, de tal forma a completar a camada externa de valência com 8 elétrons (no caso do H vale 2). Apenas os gases nobres já possuem completa a última camada eletrônica com 8 elétrons, exceto o hélio, com dois elétrons, vindo daí o seu nome, pois não reagem espontaneamente com outros elementos. As propriedades dos elementos formados dependem do tipo de ligação formada.

Cada átomo tenta interagir com elétrons de outro átomo igual ou diferente, de forma que a camada externa de sua eletrosfera fique completa. Quanto maior for a eletronegatividade de um átomo, maior a propensão de capturar elétrons. Os elementos do grupo 7A da tabela periódica possuem eletronegatividade maior que os do grupo 1A.

Temos três tipos básicos de ligações entre átomos:

- Iônica.
- Covalente.
- Metálica.

Também temos as ligações entre moléculas, que são forças mais fracas, as ligações de Van der Waals, como os dipolos e pontes de hidrogênio. As maiores energias de ligações ocorrem com as ligações iônicas, covalentes e metálicas. A ligação iônica ocorre quando dois átomos diferentes possuem diferença de eletronegatividade grande, como metais e não-metais, de forma mais geral. Um átomo cederá elétrons, e o outro receberá elétrons, constituindo assim um íon positivo e negativo, respectivamente. A camada mais externa de ambos terá 8 elétrons.

Um exemplo de ligação iônica é o cloreto de sódio – NaCl –, cujas distribuições eletrônicas são: sódio Na $1s^2\ 2s^2\ 2p^6\ 3s^1$ e cloro Cl $1s^2\ 2s^2\ 2p^6\ 3s^2\ 3p^5$. Observando o último nível $3s^1$ do Na, este pode ceder um elétron, ficando com o nível 2 com 8 elétrons. Já o Cl, pode receber este elétron de Na e completar o subnível $3p^5$, resultando assim o nível 3 do Cl com 8 elétrons.

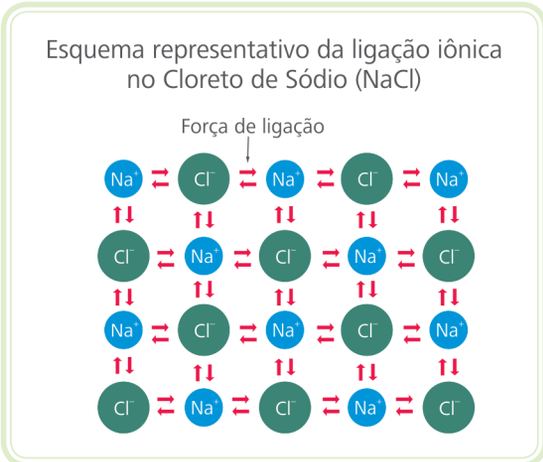


Figura 1.3: Representação da ligação iônica
Fonte: CTISM, adaptado de Callister Jr., 2008

A ligação covalente ocorre entre átomos iguais ou diferentes, e resulta no compartilhamento dos elétrons da camada externa, fazendo com que assim ambos possuam 8 elétrons na camada externa. Como exemplo de ligação covalente, o gás oxigênio O_2, é formado por dois átomos iguais de oxigênio, de distribuição $1s^2\ 2s^2\ 2p^4$. Faltam dois elétrons para completar 8 elétrons, e na Figura 1.4, temos a representação do compartilhamento dos elétrons em relação a uma ligação covalente de uma molécula de metano CH_4.

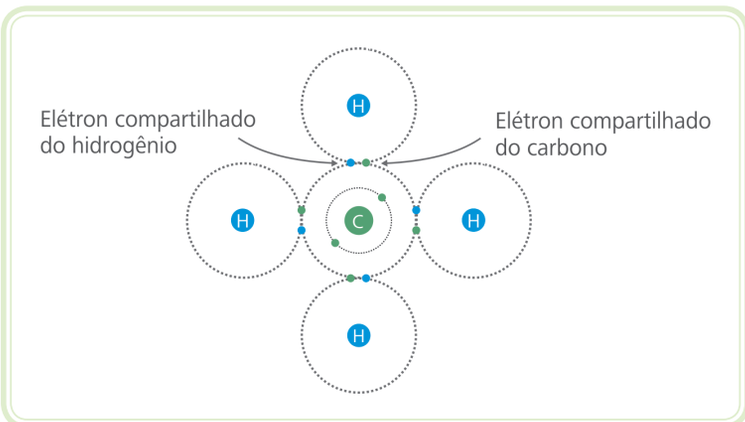


Figura 1.4: Ligação covalente
Fonte: CTISM, adaptado de Callister Jr., 2008

As ligações metálicas possuem os átomos unidos entre si, mas com os elétrons de valência não vinculados a qualquer átomo, podendo os elétrons movimentar-se dentro do metal ou liga metálica. Estes elétrons livres formam uma "nuvem de elétrons". Esta nuvem explica a condutividade elétrica alta dos metais, bem como a condutividade térmica.

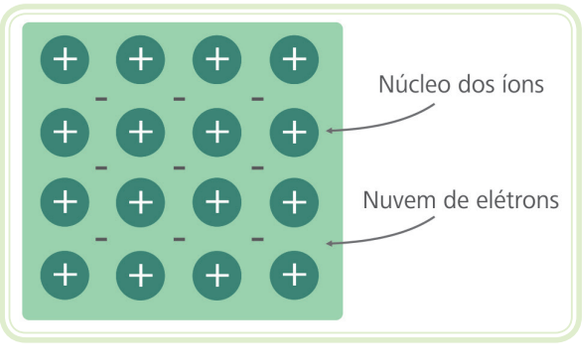


Figura 1.5: Exemplo de ligação metálica, onde os elétrons não ficam vinculados a um átomo
Fonte: CTISM, adaptado de Callister Jr., 2008

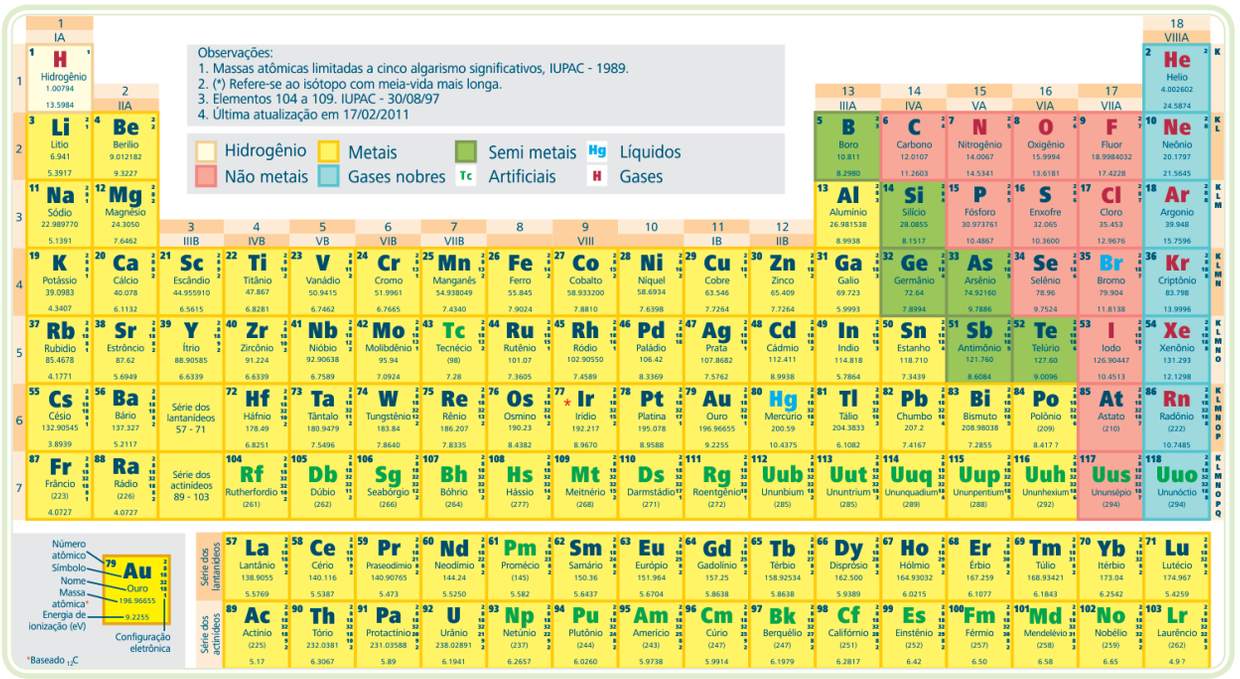


Figura 1.6: Tabela periódica dos elementos
Fonte: CTISM, adaptado de Callister Jr., 2008

Pode ser consultada a tabela periódica interativa, selecionando o elemento é mostrado os dados básicos, a configuração eletrônica, indica se é metal, não-metal ou intermediário, raio atômico e iônico, eletronegatividade, ponto de fusão e ebulição, estrutura cristalina, e estado a 25ºC, ponto de fusão e ebulição, para poder consultar, acesse: http://www.cienciadosmateriais.org/figs/tpsembotao3.swf

Consultando a tabela periódica interativa referida, verifique que a eletronegatividade, que é a tendência do átomo atrair elétrons, é maior para os elementos na parte superior direita, excetuando os gases nobres e hidrogênio.

1.4 Estruturas cristalinas

Os metais, as cerâmicas e alguns polímeros no estado sólido formam estruturas cristalinas que se repetem no espaço, chamada de ordem de longo alcance. Estas estruturas cristalinas podem ser formadas por átomos iguais ou diferentes. Os átomos são representados através de esferas. As esferas se tocam no modelo real, mas, às vezes, estão mostradas afastadas para facilitar a visualização. Um material amorfo não possui estrutura cristalina repetida no espaço.

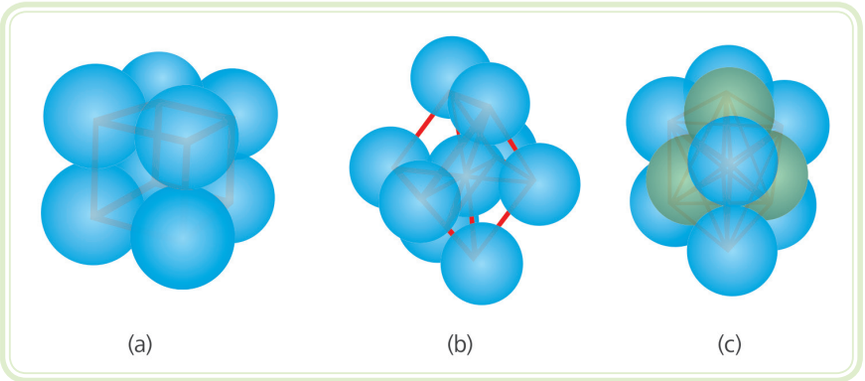


Figura 1.7: Células unitárias do sistema cúbico – cúbico simples (a); cúbico com átomo no centro do cubo (cúbico de corpo centrado – CCC) (b) e cúbico com átomos nas seis faces (cúbico de face centrada – CFC) (c)
Fonte: CTISM, adaptado de http://www.cienciadosmateriais.org/index.php?acao=downloads usando o aplicativo 3_a1.exe

Além das estruturas cristalinas do sistema cúbico, vistos na Figura 1.7, existem ao todo sete sistemas básicos de estruturas cristalinas: cúbico, tetragonal, triclínico, hexagonal, romboédrico, ortorrômbico e monoclínico. Cada um destes sistemas possui uma estrutura que se repete no espaço, formando a célula unitária. Algumas células unitárias permitem mais de um arranjo no seu interior, como o cúbico, que apresenta três tipos: pode ser feito com os átomos preenchendo os quatro vértices; outro arranjo cúbico é preenchendo os quatro vértices com átomos e dispondo o centro do cubo com outro átomo; o terceiro tipo é com os quatro vértices preenchidos e dispondo um átomo em cada uma das seis faces do cubo. Considerando que o diâmetro das esferas corresponde ao raio atômico do elemento, cada um destes três cubos – células unitárias – possuirá dimensões diferentes, mesmo que os átomos sejam iguais. Assim, o sistema cúbico pode ser arranjado segundo três maneiras diferentes. E considerando o conjunto dos sete sistemas cristalinos, podemos arranjá-los de 14 formas diferentes, constituindo as redes de Bravais.

Os elementos têm forma preferencial para formar as estruturas cristalinas, que pode ser visualizada usando a tabela periódica interativa. Alguns elementos possuem mais de uma forma possível, constituindo um fenômeno de alotropia ou polimorfismo, como ocorre com o ferro e com o carbono, que forma o grafite ou diamante. Podemos definir o fator de empacotamento atômico como sendo o volume dos átomos dentro de uma célula unitária, dividido pelo volume da célula unitária. Quanto mais eficiente for o empacotamento, maior será o fator de empacotamento atômico.

Os metais apresentam três arranjos preferenciais: cúbico de corpo centrado (CCC), cúbico de face centrado (CFC) e hexagonal compacto (HC), e os seus respectivos fatores de empacotamento são: 0,68; 0,74 e 0,74, respectivamente.

Você pode visualizar os sistemas cristalinos CCC, CFC e HC, com o aplicativo 3_b.exe, selecionando o Capítulo 3, na página: http://www.cienciadosmateriais.org/index.php?acao=downloads

Na Figura 1.8 está a representação do número de átomos dentro de cada célula unitária.

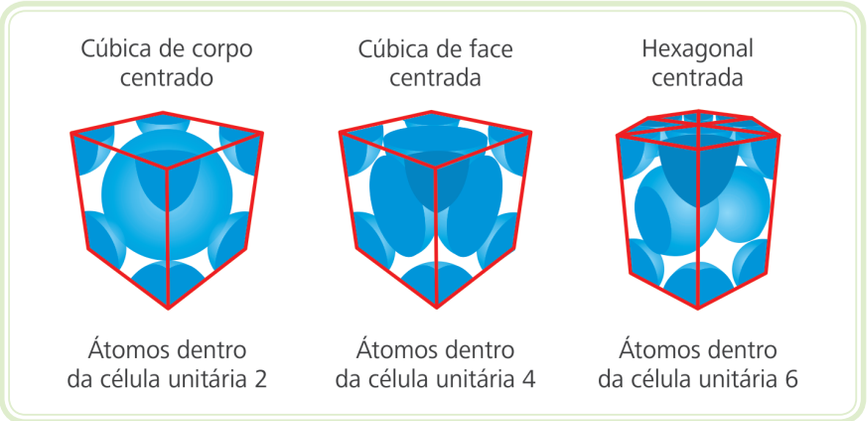


Figura 1.8: Células unitárias CCC, CFC e HC
Fonte: CTISM, adaptado de http://www.cienciadosmateriais.org/index.php?acao=downloads

As estruturas cristalinas apresentam planos com maior ou menor densidade de átomos, e consequente variação da resistência mecânica, conforme o plano considerado. Um plano de clivagem de uma pedra preciosa oferece a mínima resistência a uma força externa. Em um metal os cristais formados são pequenos, orientados aleatoriamente e recebem o nome de grão. No processo de solidificação, alguns núcleos começam a solidificar em uma determinada orientação cristalina, e vão crescendo até encontrar outro cristal, formando o que se chama grão, que torna-se visível quando submetido a um reagente químico, observado através de microscópio (Figura 1.9).

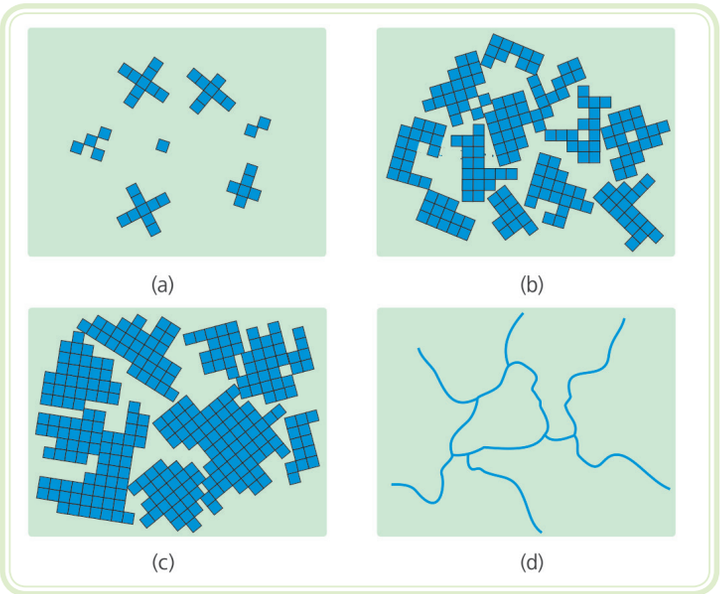


Figura 1.9: Formação de grão metálico início da nucleação (a); continuação da nucleação (b); término da nucleação (c) e aspecto resultante do contorno de grão obtido através de um reagente (d)
Fonte: CTISM, adaptado de Callister Jr., 2008

1.4.1 Defeitos cristalinos

Os defeitos cristalinos são todas as variações que ocorrem na estrutura cristalina, alterando a sua continuidade. Muitas vezes os defeitos são intencionalmente introduzidos, provocando variações nas propriedades dos materiais, fazendo o "defeito" se transformar em uma qualidade. O tipo de defeito depende do material e do processo de obtenção ou de fabricação. Assim, o processo de dopagem em semicondutores visa criar imperfeições para mudar a condutividade em determinadas regiões do material. Também, a deformação mecânica dos materiais a frio promove a formação de discordâncias – um tipo de defeito no cristal – que causa um aumento na resistência mecânica. Nas ligas metálicas: adicionam-se átomos, na forma de solução sólida substitucional ou intersticial para aumentar a resistência mecânica e a resistência à corrosão.

Para efeitos de classificação, os defeitos são considerados conforme a sua forma geométrica:

a) Defeitos pontuais

São associados a um ponto e podem ser denominados como:

- Vacância ou lacuna – um átomo está faltando na estrutura cristalina.

- Intersticial – um átomo se posiciona nos interstícios (vazios) do cristal. Pode ter o mesmo tamanho, ou pode ter tamanho menor (caso do aço, formado por ferro carbono), ou pode ser um átomo maior.

- Substitucional – os átomos da estrutura cristalina são substituídos por outro de tamanho semelhante. Este é o caso dos elementos de liga no aço, como o cromo e níquel. Na tabela periódica, veja o raio atômico do Fe e seus vizinhos, são próximos.

b) Defeitos lineares

Apresentam-se em uma dimensão. Como exemplo, temos as discordâncias que são introduzidas no trabalho a frio de metais. A estrutura cristalina apresenta um plano de átomos discordantes, cuja fronteira não se une com o átomo do cristal base. A discordância provoca um aumento da resistência mecânica do material.

c) Defeitos planos ou interfaciais

Nas fronteiras de grão não há continuidade dos cristais formados, criando uma região de maior energia, que revela o contorno do grão em um exame metalográfico. Outro tipo de defeito é a macla (Figura 1.10), que possui um plano que age como simetria da estrutura cristalina. Ocorre com o estanho, produzindo o som conhecido como "choro" do estanho.

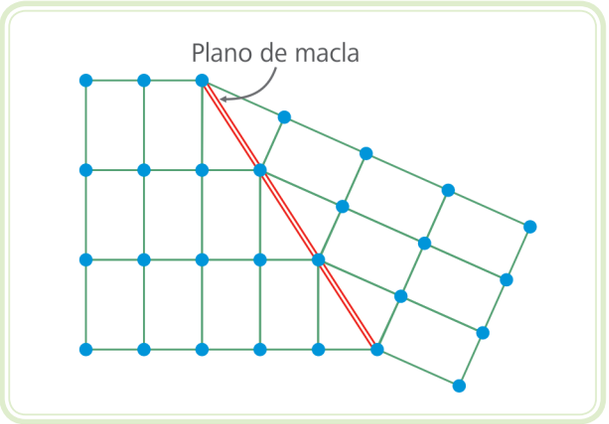


Figura 1.10: Deformação tipo plano de macla
Fonte: CTISM, adaptado de Callister Jr., 2008

d) Defeitos volumétricos

São os defeitos produzidos no volume do material, temos os poros, inclusões e precipitados que ocorrem nos materiais.

Um material pode apresentar apenas um tipo de defeito ou vários tipos simultaneamente, conforme as condições de obtenção ou fabricação.

1.5 Classificação básica dos materiais – metais, cerâmicos e polímeros

Os três grupos básicos de materiais são:

- Metais.
- Cerâmicos.
- Polímeros.

Figura 1.11: Grupos básicos de materiais: metais, cerâmicos e polímeros, cujas interações produzem materiais compósitos
Fonte: CTISM, adaptado dos autores

Os metais e ligas possuem ligações metálicas entre seus átomos como o aço e suas ligas, o alumínio, o zinco, o cobre, etc. Possuem boa ductibilidade e tenacidade, resistência à fratura, excelente condutividade elétrica e térmica. Os metais possuem estrutura cristalina, são opacos à luz visível e apresentam brilho metálico característico.

Os metais são aplicados na fabricação de estruturas e máquinas em geral, automóveis, aeroplanos, navios, trens, próteses, condução de eletricidade, transformadores, imãs permanentes, entre outras.

Os materiais cerâmicos possuem ligações iônicas e/ou covalentes entre elementos metálicos (Al, Mg, Na, Ti, W) e elementos não-metálicos (Si, B, O, N, C) como os óxidos, nitretos, carbonetos, vidro e cimento, que formam as cerâmicas estruturais, louças e refratários (provenientes de matérias-primas argilosas). Possuem comportamento frágil sob tração, resistindo mais a compressão, em geral são isolantes elétricos e térmicos, possuem alto ponto de fusão, baixa dilatação térmica e possuem baixa condutividade elétrica.

Suas aplicações são estruturais, como material de construção em louças, tijolos, concreto e vidros. São, também, usadas aplicações avançadas em sensores de temperatura, sensores de gases, capacitores, sensores piezelétricos, resistores e isolantes.

Os polímeros possuem ligações covalentes e de Van der Walls tem sua estrutura química baseada no "C" e no "H", sempre presentes, e em outros elementos

não-metálicos (F, O, N, etc.) possuindo estruturas moleculares muito grandes, formando macromoléculas, os polímeros, que são cadeias de moléculas de unidades menores ligadas quimicamente, os meros. Possuem baixa resistência mecânica e baixa densidade. Geralmente, são isolantes térmicos e elétricos, não resistem a altas temperaturas e apresentam boa resistência a produtos corrosivos. Possuem baixo ponto de fusão. Como exemplos, temos inúmeros plásticos obtidos artificialmente, além de polímeros naturais, como o algodão, seda, lã, borracha.

Os polímeros podem ser divididos em três tipos: elastômeros, termo-frágil e termo-rígido. Os elastômeros (borrachas) apresentam uma grande deformação permanente se submetidos à tração. Os termo-rígidos (polimetilmetacrilato-acrílico) possuem comportamento frágil e os termo-frágeis (polietileno, PTFE, teflon, PVC, pp) possuem patamar de tensão de escoamento. A interação entre os tipos básicos de materiais produz os materiais chamados de compósitos, que possuem propriedades diferenciadas, como por exemplo os insertos de ferramentas tipo cermet, concreto, concreto armado, fibra de vidro, embalagens multi-lâminas para leite, e pneumáticos (formado por polímero, cinta de metal e adição de sílica (SiO_3) em alguns, ou seja, materiais dos três grupos).

Os metais, em particular, possuem grande importância na mecânica, onde são usados estruturalmente, usando processos como conformação, fundição e usinagem, com ou sem tratamentos térmicos.

Resumo

Nessa aula, podemos verificar que a tabela periódica fornece as informações básicas dos elementos, como número atômico e massa atômica. Os três tipos básicos de ligações atômicas são as iônicas, covalentes e metálicas. Entre as moléculas, existe ligação Van der Walls de mais baixa energia. Os elementos tendem a formar estruturas cristalinas quando solidificam. Existem sete tipos básicos de estruturas cristalinas: cúbico, tetragonal, triclínico, hexagonal, romboédrico, ortorrômbico e monoclínico, que podem ser arranjados de 14 formas diferentes, constituindo as redes de Bravais.

Os metais possuem arranjos cristalinos dos tipos: (a) cúbico de corpo centrado (CCC), (b) cúbico de face centrada (CFC) ou (c) hexagonal compacto (HC). A estrutura cristalina cresce até encontrar outra , assim, formam-se os grãos. As estruturas cristalinas possuem defeitos em suas estruturas, que alteram as propriedades do material. Os defeitos podem ser pontuais, lineares, planos ou volumétricos. Os grupos básicos de classificação dos materiais são os

metais, os polímeros e os cerâmicos e a interação, entre esses grupos, origina os materiais compósitos.

Atividades de aprendizagem

1. Os átomos de um metal se agrupam em estruturas conhecidas como:

a) Alotropia.

b) Cristais.

c) Fases.

d) Moléculas.

e) Redes.

2. Consultando a tabela periódica, qual elemento possui o menor número atômico?

a) Alumínio.

b) Chumbo.

c) Ouro.

d) Platina.

e) Urânio.

3. Associe as colunas e assinale a alternativa que contém a sequência correta:

(A) Isótopos.

(B) Isóbaros.

(C) Isótonos.

( ) Elementos diferentes. Possuem o mesmo número de massa e diferente número de prótons.

( ) Elementos diferentes, com mesmo número de nêutrons, mas com número de prótons e de massas atômicas diferentes.

( ) Mesmo elemento, ou seja mesmo número de prótons, porém com número de nêutrons diferentes.

a) A – B – C.

b) A – C – B.

c) B – A – C.

d) B – C – A.

e) C – B – A.

4. Associe as colunas e assinale a alternativa que contém a sequência correta:

(A) Ligações iônicas.

(B) Ligações covalentes.

(C) Ligações metálicas.

(D) Ligações de Van der Waals.

( ) Ocorrem quando dois átomos diferentes possuem diferença de eletronegatividade grande, como metais e não-metais de forma mais geral.

( ) Possuem os átomos unidos entre si, mas com os elétrons de valência não vinculados a qualquer átomo.

( ) Ocorrem entre átomos iguais ou diferentes, e resulta no compartilhamento dos elétrons da camada externa, fazendo com que, assim, ambos possuam 8 elétrons na camada externa.

( ) Ligações entre moléculas, que são forças mais fracas, como os dipolos e pontes de hidrogênio.

a) A – B – C – D.

b) A – C – B – D.

c) A – C – D – B.

d) B – C – D – A.

e) C – B – D – A.

5. Relacione as imagens abaixo, de acordo com a respectiva estrutura cristalina correspondente e marque a sequência correta:

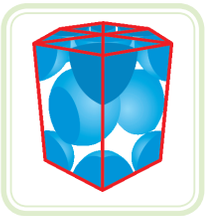
(A) Cúbica de corpo centrado. ( )

(B) Hexagonal centrada.

(C) Cúbica de face centrada.

( )

( )



a) A – B – C.

b) A – C – B.

c) B – A – C.

d) C – A – B.

e) C – B – A.

6. Complete corretamente a frase abaixo de acordo com as alternativas propostas:

Os _____ possuem comportamento frágil sob _____, resistindo mais a _____, em geral são isolantes elétricos e térmicos, possuem _____ ponto de fusão, baixa dilatação térmica e possuem _____ condutividade elétrica.

a) materiais cerâmicos – compressão – tração – baixo – alta

b) materiais cerâmicos – tração – compressão – alto – baixa

c) metais – compressão – tração – baixo – alta

d) metais – tração – compressão – alto – baixa

e) polímeros – compressão – tração – baixa

7. Para representar as ligações entre os átomos, são utilizadas as chamadas camadas de valência que se apresentam na eletrosfera do átomo, onde ficam os elétrons, sendo que os níveis principais são, respectivamente:

a) K, L, M, N, O, P e Q.

b) K, L, M, N, O, Q e P.

c) K, L, M, Q, P, O e N.

d) M, N, O, P, Q, K e L.

e) Q, P, O, N, M, L e K.

8. Associe as colunas e assinale a alternativa que contém a sequência correta. Os polímeros podem ser divididos em três tipos:

(A) Termo-frágil.

(B) Termo-rígido.

(C) Elastômeros.

( ) Apresentam uma grande deformação permanente se submetidos à tração.

( ) Possuem comportamento frágil.

( ) Possuem patamar de tensão de escoamento.

a) A – B – C.

b) B – A – C.

c) B – C – A.

d) C – A – B.

e) C – B – A.

9. Defina defeitos cristalinos.

Aula 2 – Propriedades mecânicas, térmicas, elétricas, magnéticas e químicas

Objetivos

Conhecer as propriedades mecânicas básicas: curva tensão × deformação, elasticidade, plasticidade, encruamento, deformações específicas e verdadeiras, ductibilidade, tenacidade, resiliência, dureza e fadiga.

Conhecer as propriedades térmicas, elétricas, magnéticas e químicas.

2.1 Considerações iniciais

Como escolher um material para uma aplicação?

O conhecimento de suas propriedades é fundamental. As propriedades dos materiais podem variar devido aos processos, tratamentos térmicos ou composição química. Os materiais ferrosos são um exemplo disso, pois dependendo da finalidade, um mesmo material pode ser facilmente conformado ou ter propriedades adequadas para seu uso em matrizes. Usando o aço, podemos fazer uma lima, que é uma ferramenta de desbaste, ou uma corda de guitarra. Em ambos os casos, o material é semelhante, mas os processos e tratamentos térmicos usados são diferentes, resultando em propriedades adequadas ao produto. Nessa aula, veremos algumas propriedades básicas, com ênfase nas propriedades mecânicas.

2.2 Propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas são relacionadas ao comportamento do material quando submetido a uma solicitação mecânica, como força, torção, cisalhamento ou flexão, geralmente usando corpos de prova padronizados. A aplicação de testes de solicitação mecânica pode ser de forma estática, dinâmica, ou constante, provocando uma deformação do material reversível ou não, havendo testes que ocasionam a sua ruptura.

As propriedades mecânicas mais comuns são:

- Resistência à tração.
- Elasticidade.
- Dureza.
- Ductilidade.
- Fluência (***creep***).
- Fadiga.
- Tenacidade.

A-Z

creep
Deformação lenta mais contínua de um material sujeito a esforços constantes, sendo proporcional a carga e a temperatura.

As propriedades mecânicas variam conforme a composição química do material, a temperatura, os tratamentos térmicos realizados, a geometria, a velocidade de aplicação (lenta, rápida ou cíclica) da solicitação.

2.2.1 Resistência mecânica

A resistência mecânica de um material está associada à força necessária para provocar a ruptura ou a deformação de escoamento de um corpo de prova. A resistência é obtida em um ensaio de tração, onde a força, que atua em uma área transversal, produz uma tensão mecânica, identificada pela letra grega σ (sigma), sendo a sua unidade MPa ou N/mm^2. Como resultado deste ensaio, obtemos a curva tensão × deformação ($\sigma \times \varepsilon$), que é característica para cada material.

Na Figura 2.1, temos identificadas três tensões características: a tensão de ruptura, a tensão de escoamento σ_e, e a tensão limite de ruptura σ_R.

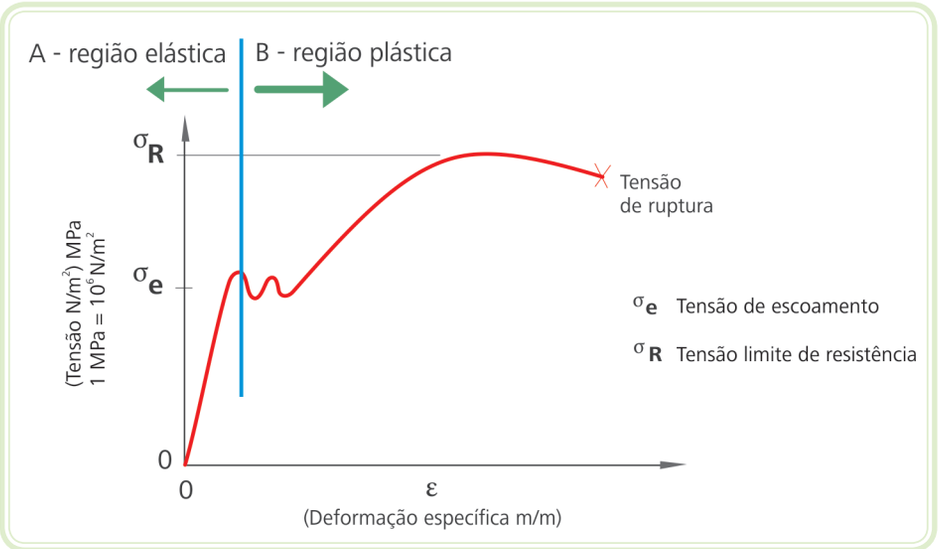


Figura 2.1: Curva tensão × deformação de um material dúctil
Fonte: CTISM, adaptado dos autores

A tensão de escoamento σ_e, e a tensão limite de ruptura σ_R são importantíssimas no uso de materiais metálicos. A tensão de escoamento σ_e é característica de materiais dúcteis, como o aço, sendo seu valor, em módulo, igual em tração ou compressão, e pode ter o patamar da Figura 2.1. Quando não tem o patamar σ_e característico, como na Figura 2.4, a tensão de escoamento é estimada fazendo o cruzamento de uma reta que passa por 0,2 % de deformação, e com a inclinação da região inicial da curva.

A tensão mecânica σ é definida pela força atuante na área transversal:

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

Onde: σ é a tensão mecânica e sua unidade é MPa (ou N/mm^2)
F é a força atuante em Newtons (N)
A é a área inicial transversal expressa em m^2

Na construção da curva **tensão × deformação** ($\sigma \times \varepsilon$) a área considerada é a área inicial. Porém, devido ao estreitamento da seção transversal que é significativo na região plástica, há uma tensão real superior à obtida pela equação anterior, que considera a área inicial.

A deformação ε é dada por:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{l_0} = \frac{l_f - l_0}{l_0}$$

Onde: ΔL é comprimento final menos o comprimento inicial
l_f é o comprimento final
l_0 é o comprimento inicial

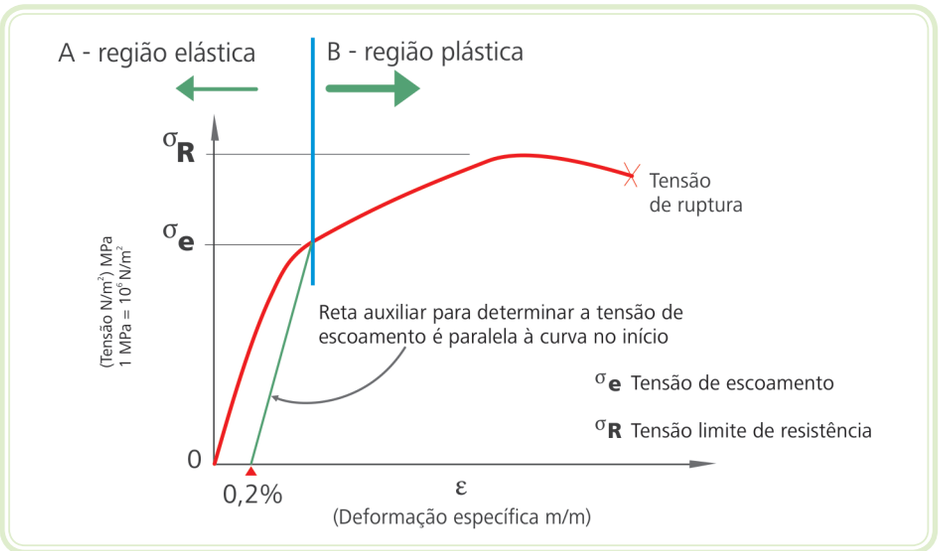


Figura 2.2: Curva tensão × deformação de um material dúctil
Fonte: CTISM, adaptado dos autores

Esta deformação é conhecida como deformação de engenharia, deformação relativa ou deformação específica, e pode ser usada para pequenas deformações, menores que 0,2 %. Para deformações maiores que 0,2 %, presentes nos processos de conformação mecânica, devemos usar a deformação verdadeira ou real, que é igual à deformação de engenharia multiplicada pelo logaritmo natural entre o comprimento final pelo comprimento inicial. Os materiais frágeis, como o cimento, não apresentam escoamento, e rompem sem apresentar deformação permanente, conforme Figura 2.4. Resistem mais à compressão do que à tração, devendo ser diferenciados estes dois valores. Na Figura 2.3, temos uma máquina de ensaios universal típica usada para aplicar tração ou compressão em corpos de prova.

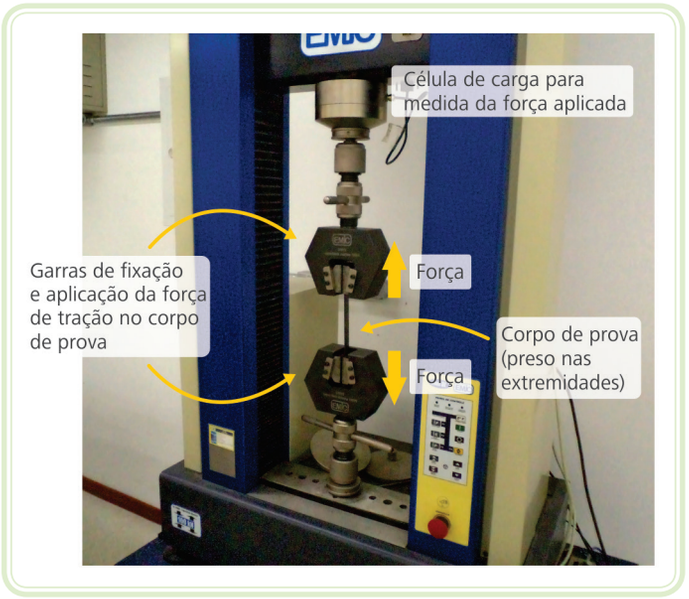


Figura 2.3: Vista de uma máquina de ensaio universal preparada para um ensaio de tração
Fonte: CTISM, adaptado dos autores

Na Figura 2.4, temos uma curva tensão × deformação de um material frágil sob tração. Ocorre uma deformação elástica e praticamente não ocorre deformação plástica, sendo que o material rompe bruscamente.

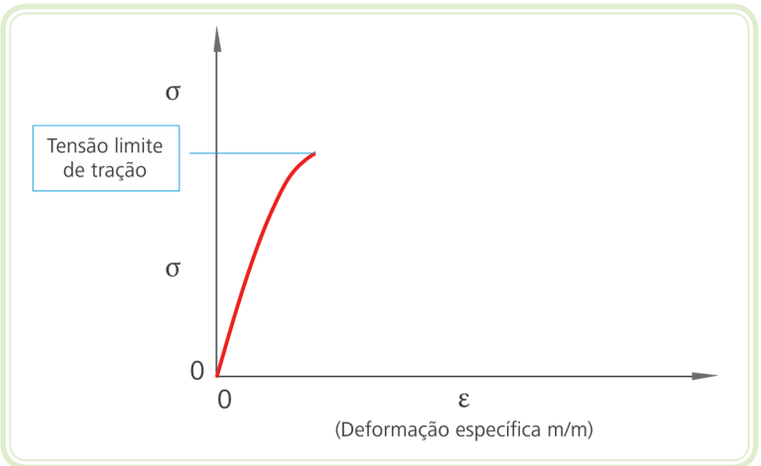


Figura 2.4: Curva tensão × deformação
Fonte: CTISM, adaptado dos autores

Em um material dúctil, quando retiramos um carregamento aplicado na região elástica, haverá o retorno às suas dimensões iniciais, percorrendo a curva no sentido descendente. Porém, se o carregamento atingir a região plástica, com uma tensão maior que a tensão de escoamento σ_e, quando for retirada a carga, o retorno não será sobre a curva de subida, mas sim paralelo à inclinação da região elástica inicial, sendo que na intersecção com o eixo da deformação aparecerá o valor da deformação residual.

No ensaio de tração × deformação, podemos identificar os materiais dúcteis ou frágeis. Assim:

- **Material dúctil** – sob a ação de tração, apresenta deformação permanente antes de romper.

- **Material frágil** – sob a ação de tração, não apresenta praticamente deformação permanente antes de romper (só há deformação elástica).

Outra propriedade mecânica importante é o módulo de elasticidade E. A curva tensão × deformação apresenta na região elástica, inclinação constante que pode ser expressa por:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

A unidade do módulo de elasticidade é a mesma da tensão, mas seu valor é maior, dado em GPa.

Outro conceito associado com a deformação é o coeficiente de Poisson ν, que é a relação da deformação transversal pela deformação longitudinal. Sob tração, a deformação longitudinal aumenta, enquanto que a deformação transversal é negativa, sendo o coeficiente de Poisson ν, dado por:

$$\nu = -\frac{\text{Deformação transversal}}{\text{Deformação longitudinal}}$$

O coeficiente de Poisson ν é sempre positivo e próximo a 0,3 para metais.

Na tabela 2.1 temos alguns valores do coeficiente de Poisson ν, do módulo de elasticidade E, da tensão de escoamento, da tensão limite de ruptura e do alongamento.

Tabela 2.1: Propriedades mecânicas de alguns materiais					
Material	**Tensão de escoamento (MPa)**	**Tensão limite de ruptura (MPa)**	**Módulo de elasticidade E (GPa)**	**Coeficiente de Poisson ν**	**Alongamento % em 50 mm**
Alumínio	35	90	69	0,33	40
Latão (70 % Cu)	75	300	97	0,34	68
Cobre	69	200	110	0,34	45
Níquel	138	480	207	0,31	40
Aço (1020)	180	380	207	0,30	25
Titânio	450	520	107	0,34	25

Fonte: Adaptado de Callister Jr., 2008

Na Figura 2.5 temos a visualização da deformação de um corpo cilíndrico sob tração e sob compressão onde temos:

a) Um corpo sob tração apresenta um alongamento longitudinal e encurtamento transversal.

b) Um corpo sob compressão tem encurtamento longitudinal e alongamento transversal.

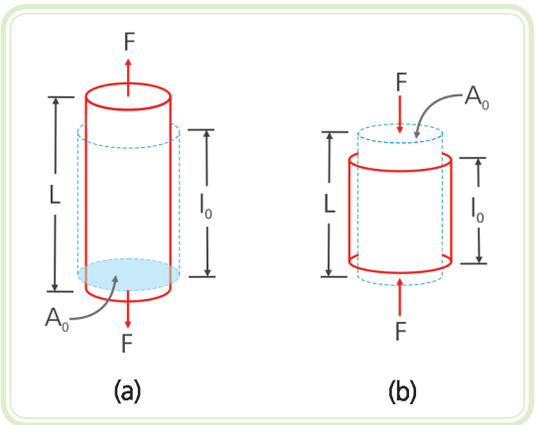


Figura 2.5: Visualização das deformações longitudinais e transversais devidas à tração (a) e à compressão (b)
Fonte: CTISM, adaptado de Callister Jr., 2008

Exemplo

Um fio de cobre de comprimento inicial l_0 de 500 mm, com área inicial A_0 igual a 5 mm^2 é submetido a uma força de tração F de 150 N.

a) Qual é a tensão mecânica atuante?

$$\sigma = \frac{F}{A} \rightarrow \frac{150\ N}{5 \times (0{,}001)^2} = 30.000.000\ \frac{N}{m^2} = 30\ MPa$$

b) Quanto se alonga o fio ($\Delta L = l_f - l_0$, onde l_f é o comprimento final)?

Vamos usar duas expressões que fornecem a deformação específica $\varepsilon = \Delta L \div L$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{l_0} = \frac{l_f - l_0}{l_0}$$

e

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Onde: E é o módulo de elasticidade do material, no caso o cobre

Isolando o termo ε das duas equações e igualando-as, vem:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{l_0} = \frac{\sigma}{E} \rightarrow \Delta L = \frac{\sigma \times l_0}{E} = \frac{30.000.000\ N/m^2 \times 0{,}5\ m}{110^9\ N/m^2} = 0{,}0001363\ m$$

O alongamento ΔL vale 0,0001363 m

O comprimento final l_f é:

$$l_f = l_0 + \Delta L = 0{,}5 + 0{,}0001363\ m = 0{,}5001363\ m$$

c) Nestas condições, quanto vale a deformação específica (ou relativa) ε?

A deformação específica vale:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{l_0} = \frac{l_f - l_0}{l_0} = \frac{0{,}0001363\ m}{0{,}5\ m} = 0{,}000272\ m/m$$

A resposta aparece com unidades m/m, podendo ser expressa como 272,2 μm/m, se você trabalhar em análise de tensões usando *strain-gages* (1 $\mu m = 10^{-6}$ m).

d) Quanto vale a deformação 0,000272 m/m percentualmente?

Multiplicamos a deformação encontrada por 100, vindo:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{l_0} \times 100 = \frac{0{,}0001363 \text{ m}}{0{,}5 \text{ m}} = 0{,}000272 \times 100 = 0{,}0272 \ \%$$

De maneira inversa, 1 % de deformação representa a deformação específica: 1 ÷ 100 = 0,01 m/m

e) Qual deformação relativa corresponde ao escoamento do material?

Usamos a equação abaixo: procuramos na tabela o valor da tensão de escoamento σ_e, 69 × 10^6 MPa = 69000000 N/m^2, e o módulo de elasticidade E, 110 × 10^9 N/m^2 = 110 GPa, do material.

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \ \therefore \ \varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{69.000.000 \text{ N/m}^2}{110.000.000.000 \text{ N/m}^2} = 0{,}0006272 \text{ m/m ou } 0{,}062272 \ \%$$

f) Qual é a variação do diâmetro do fio quando atua a força F de tração de 145 N?

A relação entre as deformações relativas longitudinais – a que vimos – e transversais, na direção do diâmetro D, é dada pelo coeficiente de Poisson ν:

$$\nu = -\frac{\varepsilon \text{ transversal}}{\varepsilon \text{ longitudinal}}$$

Onde o sinal negativo mostra que seus sinais são opostos. Para metais em geral seu valor é próximo a 0,3, sempre positivo e adimensional.

A deformação especifica transversal é dada por:

$$\varepsilon \text{ transversal} = \frac{\text{diâmetro}_{\text{final}} - \text{diâmetro}_{\text{inicial}}}{\text{diâmetro}_{\text{inicial}}}$$

O diâmetro inicial é calculado usando a fórmula A = π × D2 ÷ 4, vindo daí: $\text{diâmetro}_{\text{inicial}}$ = 0,0025231 m

Queremos o diâmetro final. Então:

$$\frac{\text{diâmetro}_{final} - \text{diâmetro}_{inicial}}{\text{diâmetro}_{inicial}} = -\nu \times \varepsilon \text{ longitudinal}$$

Sendo $\nu = 0{,}34$ para o cobre, vem:

$$\frac{\text{diâmetro}_{final} - 0{,}0025231}{0{,}0025231} = -\,0{,}34 \times 0{,}0025228 \text{ m}$$

Calculando, vem o diâmetro final: $\text{diâmetro}_{final} = 0{,}0025228$ m

A redução do diâmetro é de 0,0025228 – 0,0025231 = –0,0000003 m ou –0,0003 mm (observe que um micrômetro não é capaz de medir esse valor).

Que força atua no seu escoamento?

Temos as relações:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \rightarrow F = \sigma \times A_0$$

Substituindo a tensão de escoamento tabelada e a área transversal A_0 do corpo de prova, vem:

$$F = \sigma \times A_0 = 69000000\ \frac{N}{m^2} \times 5 \times (0{,}001)^2 = 345 \text{ N}$$

Até o escoamento podemos considerar que não ocorre variação significativa da área inicial A_0. Para tensões menores do que as tensões de escoamento não precisamos efetuar correção da tensão e da deformação. Mas, a partir do momento que se entra na região plástica, a curva obtida considera a área inicial A_0, porém esta vai diminuindo. As tensões e deformações calculadas considerando a área inicial são as tensões e deformações de engenharia. Para termos a tensão real devemos multiplicar a tensão dada pela fórmula anterior, chamada tensão de engenharia e multiplicá-la pelo fator ($l_f \div l_0$). Ou seja, a tensão real no corpo de prova é maior do que a que aparece nas curvas tensão × deformação.

2.2.2 Dureza

É a resistência que o material oferece à penetração de uma esfera ou ponta de diamante, sendo seu valor expresso em escalas de dureza como a Rockwell C, Brinell, Vickers e outras. Por exemplo, a dureza Brinell – símbolo HB – é medida usando uma esfera de aço, com tratamento térmico, com 10 mm de diâmetro D, com uma força F, que deixa impresso na peça uma marca de diâmetro d, conforme a Figura 2.6, e a equação dada pela relação:

$$HB = \frac{F}{\frac{1}{2}\pi D\left[D - \sqrt{D^2 - d^2}\right]}$$

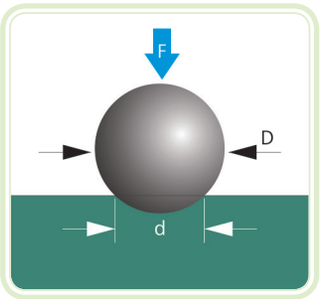


Figura 2.6: Variáveis da medida da dureza pelo método Brinell
Fonte: CTISM, adaptado dos autorees

Alguns cuidados devemos ter ao realizar um ensaio de dureza. Por exemplo na medida de dureza de uma camada de cementação, que é muito fina, usando o método Brinell ocorrerá a quebra desta camada, falseando o resultado. Nestes casos deve-se usar outros penetradores, de diamante, como os usados na dureza Vickers ou Knopp, cujos índices de dureza são dados por fórmulas que levam em conta as dimensões da impressão deixada na peça pelos penetradores de diamante, quando sob ação de uma força. Nesses casos, o valor da impressão é pequeno e deve ser medido com o auxílio de um microscópio, obtendo-se a microdureza.

Assim, os diversos índices de dureza são obtidos por fórmulas que medem a penetração no material ou a medida da impressão no material. A dureza Shore é obtida medindo a altura do repique de uma esfera.

A medida da dureza é um dos ensaios mais fáceis e importantes de se executar, e é feita em durômetros como visto na Figura 2.7, e o valor obtido da dureza pode ser correlacionado com a resistência do material. Na Tabela 2.2 temos diversos valores de durezas indicadas em HB, HRC, HRB, HV e Shore e a relação com a resistência mecânica (tensão limite de ruptura) de um aço.

Figura 2.7: Durômetro usado para realizar ensaios de dureza Rockwell B e C
Fonte: CTISM, adaptado dos autores

Tabela 2.2: Valores de durezas em HB, HRC, HRB, HV e Shore e a relação com a resistência mecânica (tensão limite de ruptura) de um aço

Tensão limite de resistência à tração	Brinell		Rockwell		Vickers	Shore	Tensão limite de resistência a tração	Brinell		Rockwell		Vickers	Shore
MPa	mm	HB	HRC	HRB	HV	D	MPa	mm	HB	HRC	HRB	HV	D
-	-	-	68	-	940	105	795	3,95	235	20	-	235	36
-	2,30	712	67	-	903	104	775	4,00	229	19	100	229	-
-	2,30	697	66	-	870	103	755	4,05	223	18	99	223	35
-	2,35	682	65	-	840	102	735	4,10	217	17	98	217	-
-	2,37	668	64	-	813	100	716	4,15	212	16	97	212	34
-	2,40	653	63	-	787	98	696	4,20	207	15	96	207	33
-	2,43	639	62	-	762	96	677	4,25	201	14	95	201	-
-	2,45	624	61	-	738	93	667	4,30	197	13	94	197	32
-	2,48	611	60	-	715	91	647	4,35	192	12	93	192	31
-	2,51	595	59	-	693	89	628	4,40	187	-	92	187	-
-	2,54	582	58	-	672	87	608	4,45	183	-	91	183	-
-	2,57	568	57	-	652	84	598	4,50	178	-	90	178	-
2148	2,60	555	56	-	632	82	589	4,55	174	-	89	174	-
2089	2,63	542	55	-	612	80	569	4,60	170	-	88	170	-
2011	2,66	530	54	-	593	78	559	4,65	167	-	87	167	-
1933	2,69	517	53	-	574	76	549	4,70	163	-	86	163	-
1874	2,72	507	52	-	558	74	528	4,75	159	-	85	159	-
1815	2,75	495	51	-	542	72	520	4,80	156	-	84	156	-
1756	2,78	485	50	-	526	70	510	4,85	152	-	83	152	-
1687	2,81	473	49	-	510	68	500	4,90	149	-	82	149	-

Tensão limite de resistência à tração	Brinell		Rockwell		Vickers	Shore	Tensão limite de resistência a tração	Brinell		Rockwell		Vickers	Shore
MPa	mm	HB	HRC	HRB	HV	D	MPa	mm	HB	HRC	HRB	HV	D
1638	2,85	462	48	-	495	67	490	4,95	146	-	81	146	-
1579	2,88	451	47	-	480	65	490	5,00	143	-	79	143	-
1530	2,91	440	46	-	466	64	480	5,05	140	-	78	140	-
1472	2,95	429	44	-	449	62	470	5,10	137	-	77	137	-
1413	3,00	415	42	-	429	60	460	5,15	134	-	76	134	-
1364	3,05	401	41	-	410	58	450	5,20	131	-	75	131	-
1315	3,20	388	40	-	393	56	441	5,25	128	-	74	128	-
1265	3,15	376	39	-	379	54	431	5,30	126	-	73	126	-
1226	3,20	363	37	-	365	52	421	5,35	123	-	71	123	-
1187	3,25	353	36	-	353	51	411	5,40	121	-	70	121	-
1148	3,30	341	35	-	341	50	411	5,45	118	-	69	118	-
1118	3,35	331	34	-	331	49	401	5,50	116	-	67	116	-
1079	3,40	321	33	-	321	48	392	5,55	114	-	65	114	-
1050	3,45	311	31	-	311	46	382	5,60	111	-	64	111	-
1020	3,50	302	30	-	302	45	382	5,65	109	-	63	109	-
991	3,55	294	29	-	294	44	372	5,70	107	-	62	107	-
961	3,60	285	28	-	285	43	362	5,75	105	-	60	105	-
932	3,65	277	27	-	277	42	353	5,80	103	-	58	103	-
902	3,70	269	26	-	269	41	343	5,90	100	-	56	100	-
873	3,75	262	25	-	262	40	333	6,00	95	-	52	95	-
853	3,80	255	24	-	255	39	314	6,15	90	-	47	90	-
834	3,85	248	23	-	248	38	294	6,30	85	-	42	85	-
814	3,90	241	21	-	241	37	274	6,50	80	-	36	80	-

Fonte: Adaptado de http://brasil.arcelormittal.com/pdf/quem-somos/guia-aco.pdf

2.2.3 Ductilidade

A ductilidade é a capacidade do material se deformar plasticamente, sob tração, sem se romper. É medida de duas maneiras, ambas usando a máquina universal de ensaios:

- **Alongamento total**

$$\text{Alongamento} = \frac{l_f - l_0}{l_0} \times 100$$

Onde: l_f é o comprimento final
l_0 é o comprimento inicial

Neste ensaio o corpo de prova é inicialmente marcado a cada 5 mm com tinta.

Após o ensaio, mede-se a deformação que ocorreu considerando os 50 mm iniciais e a respectiva variação, conforme fórmula anterior.

- **Estricção** – expressa a ductilidade em termos da variação das áreas inicial e final.

$$\text{Estricção} = \frac{A_0 - A_f}{A_0} \times 100$$

Onde: A_0 é a área inicial
A_f é a área final, sendo ambas medidas antes e depois da ruptura

Outra propriedade relacionada é a maleabilidade, que indica a capacidade de um material deformar-se sob compressão, sem quebrar ou fragmentar.

2.2.4 Fluência (*creep*)

Fluência (*creep*) é o fenômeno da lenta deformação plástica de um metal em altas temperaturas e com carga constante.

Se um material for utilizado em temperaturas mais elevadas (caldeiras, turbinas, fornos, etc.), poderá haver uma deformação permanente do material, denominada de fluência (*creep*). O material sofre deformação permanente ao longo do tempo, podendo culminar no seu rompimento. O ensaio para avaliar a fluência consiste em aplicar uma carga constante, em temperatura e tempos relativamente longos. Durante o ensaio é medido o comportamento da deformação inicial até a deformação da ruptura.

Outro ensaio que depende da temperatura é o ensaio de relaxação, onde um corpo de prova é mantido em uma temperatura alta, mas a força aplicada é variada de tal forma que a deformação existente permaneça constante. Assim, ao longo do tempo a força para manter a deformação vai diminuindo.

2.2.5 Fadiga

Como pode ser rompido um pedaço de arame de aço sem uso de ferramenta? Usando tração pura não temos força suficiente. Mas se fizermos pequenos movimentos de flexão alternadamente, facilmente romperemos o material, causando fadiga no material. Fadiga é a ruptura do material com cargas alternadas de valor inferior ao limite estático de resistência. Este fenômeno ocorre na fadiga de eixos rotativos, onde devido a rotação, a mesma porção

da peça experimenta tensões de tração e compressão alternadas, e inicia uma trinca, que pode culminar na ruptura brusca e catastrófica do material. Esse é o mecanismo da fadiga, onde uma carga baixa, porém repetitiva, rompe o material. Nos materiais, existem sempre imperfeições que provocam a concentração de tensões. Estes pontos com concentração de tensões dão origem a trincas, que aumentam gradativamente até a ruptura.

Tensão limite de fadiga – é o valor da tensão alternada que o material resiste, sem romper, por exemplo, mais de 1 milhão de ciclos, e possui vida infinita à fadiga do material. O aço com tensão limite de ruptura até 1400 MPa, possui a tensão limite de fadiga estimada igual a metade desta tensão limite de ruptura, enquanto que o alumínio não possui tensão limite de fadiga definida. O comportamento à fadiga depende além do material, da concentração de tensões, da temperatura e acabamento superficial. Uma peça feita de alumínio deve ser periodicamente verificada quanto a existência de trincas devidas a fadiga.

Na Figura 2.8, está ilustrado o diagrama de Wohler de forma qualitativa. Em A, há o rompimento da peça devido a carga estática; em B, há ruptura com um número de ciclos, como no arame rompido manualmente; em C esta representada uma carga cíclica com valor igual a tensão limite de fadiga, que supostamente resiste a um número infinito de ciclos.

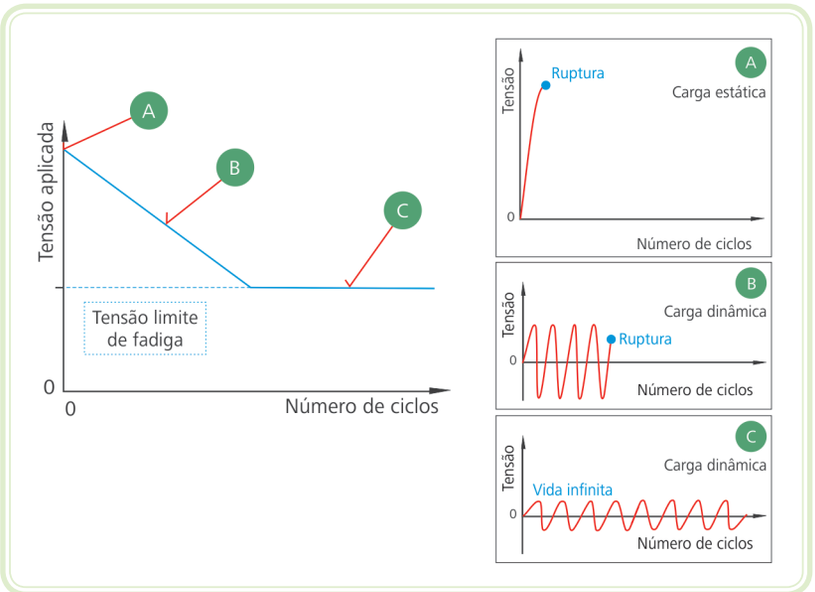


Figura 2.8: Diagrama tensão × número de ciclos (Wohler): a ruptura ocorre devido ao carregamento estático (a); há uma carga dinâmica, de valor inferior a tensão limite de ruptura e um número finito de ciclos, como no caso do arame partido manualmente (b) e está representada a tensão limite de fadiga, para a qual o material tem vida infinita (c)
Fonte: CTISM, adaptado dos autores

2.2.6 Tenacidade

A tenacidade está relacionada à energia necessária para romper um material. É a capacidade do material de absorver energia na região plástica, podendo ser visualizada pela área sob a curva tensão × deformação ($\sigma \times \varepsilon$). Sua medida é feita através de ensaio tipo Charpy ou Izod, onde corpos de prova, com entalhe padronizado sofrem impacto, sendo então medida a energia necessária para romper o corpo de prova, conforme mostrado na Figura 2.10. É expressa em unidades de energia por volume (J/m^3).

Nos tratamentos térmicos dos aços, pode-se aumentar a resistência, mas a tenacidade poderá diminuir, tornando-o frágil, podendo até inviabilizar seu uso.

Um material que não se deforma plasticamente antes de romper apresenta fratura frágil, e caso se deforma plasticamente antes da ruptura, apresenta fratura dúctil. Na Figura 2.9, temos o aspecto da fratura de um material dúctil e de um frágil:

a) Dúctil, onde ocorre deformação permanente antes da ruptura.

b) Frágil, onde há ruptura sem deformação permanente.

Figura 2.9: Exemplos de fratura dúctil (a) e frágil (b)
Fonte: CTISM

Um material pode ter comportamento frágil ou dúctil, em função, principalmente, da temperatura, e também do tratamento térmico, tamanho de grãos, encruamento, presença de impurezas, elementos de liga, processos de fabricação, região onde foi retirado o corpo de prova, entre outros, podendo haver uma transição dúctil/frágil. Um material dúctil à temperatura ambiente, poderá se tornar frágil com o abaixamento da temperatura. A transição dúctil/frágil pode potencializar a fragilidade de um material, tal como se supõe ter contribuído com o naufrágio do Titanic quando navegava em águas frias.

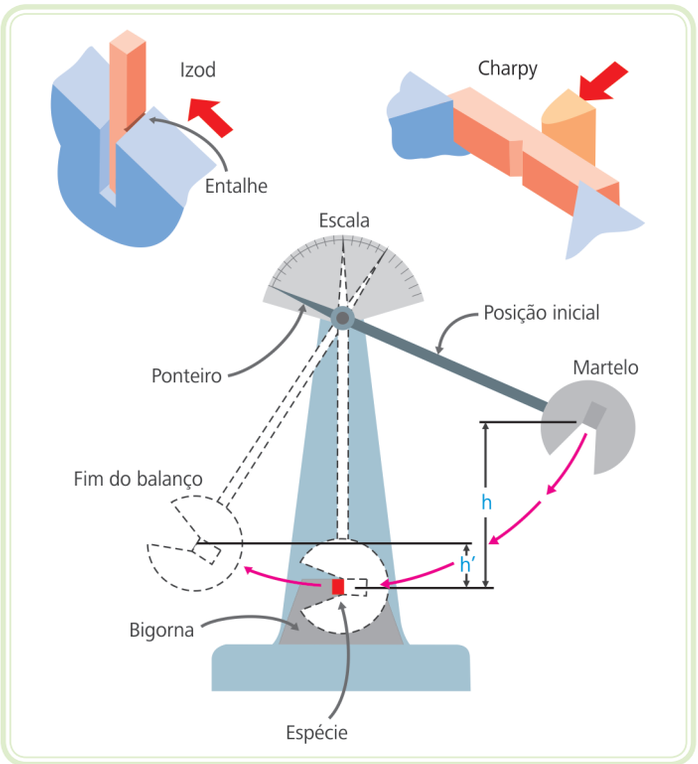


Figura 2.10: Corpos de prova para ensaios Charpy e Izod e aspecto do martelo de queda usado nesses ensaios
Fonte: CTISM, adaptado de Callister Jr., 2008

Na Figura 2.11, temos duas curvas mostrando um material dúctil e um material frágil. A área sob as curvas indica a tenacidade do material. O material dúctil, que possui menor resistência, apresenta maior tenacidade. O material frágil apresenta uma resistência maior do que o material dúctil. Mas a tenacidade, que é a área sob a curva até a ruptura, é maior para o material dúctil. A área sob a região elástica da curva tensão × deformação define a resiliência do material. Assim, para o rompimento, um material frágil absorve bem menos energia que um material dúctil, mesmo que apresente um limite de resistência superior. Quando ocorre uma fratura frágil, têm-se o rompimento brusco do material, podendo ser catastrófico.

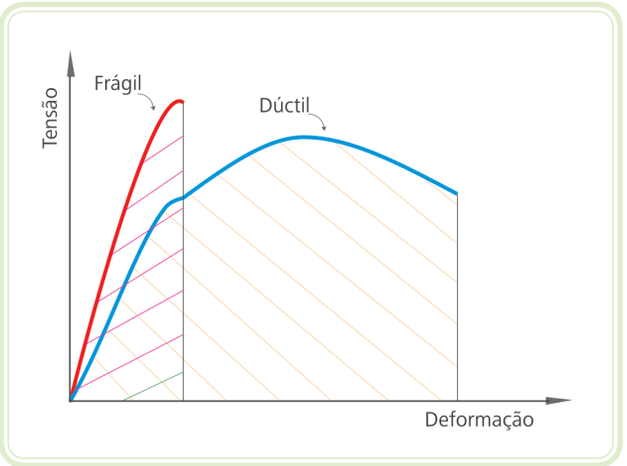


Figura 2.11: Representação de duas curvas tensão × deformação: material frágil e material dúctil
Fonte: CTISM, adaptado dos autores

2.3 Propriedades térmicas

Abordaremos a condutividade térmica k, calor específico Cp, e o coeficiente de dilatação térmica linear α_l.

2.3.1 Condutividade térmica k

O fluxo de calor J, na direção x, é dado por (unidade W/m²):

$$j = -k \times \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

Onde: k é a condutividade térmica (W/(m.K))
ΔT em graus K
Δx é em m

Quanto maior for a condutividade térmica k maior será o fluxo de calor J.

Exemplo
O fundo de uma panela é metálico e conduz o calor melhor do que seu cabo, que tem uma condutividade baixa.

2.3.2 Calor específico (Cp)

Variação de energia devido ao aumento da temperatura de 1 K; unidade J/(kg.K).

$$Cp = \frac{\Delta Q}{m \times \Delta T}$$

Sendo ΔQ a energia fornecida ao corpo de massa m que apresenta uma variação de temperatura de ΔT. Cp é uma medida da inércia térmica do material, ou seja, quanto maior é o calor específico, mais lentas são as mudanças de temperatura no material.

Exemplo

Os trocadores de calor devem ser feitos com materiais de baixo Cp.

2.3.3 Coeficiente de dilatação térmica linear (α_l)

O comprimento muda devido à variação de temperatura, conforme a relação:

$$\sigma = \frac{\frac{(l_f - l_0)}{l_0}}{(T_f - T_0)} \quad \text{(Unidade 1/K ou 1//C)}$$

Onde: l_f é o comprimento final
l_0 é o comprimento inicial
T_f é a temperatura final
T_0 é a temperatura inicial

Na Tabela 2.3, temos alguns valores do calor específico Cp, do coeficiente de dilatação linear α_l, da condutividade térmica k e da constante de Wiedemann–Franz L (que será usada nas propriedades elétricas).

Tabela 2.3: Valores do calor específico Cp, coeficiente dilatação linear α_l, condutividade térmica k e constante de Wiedemann–Franz L

Material	Cp (J/kg.K)	αl $(°C)^{-1} \times 10^{-6}$	K (W/(m.K))	L $((\Omega.W)/K^2) \times 10^{-6}$
Alumínio	900	23.6	247	2.20
Cobre	386	17.0	398	2.25
Ferro	448	11.8	80	2.71
Aço1025	486	12.0	51.9	-
Vidro borosilicato ("pyrex")	850	3.3	1.4	-
Polietileno alta densidade	1850	106 - 198	0.46 - 0.50	-
Náilon 6.6	1670	144	0.24	-

Fonte: Adaptado de Callister Jr., 2008

2.4 Propriedades elétricas

Quanto às propriedades elétricas, os materiais dividem-se em três grupos: isolantes, semicondutores e condutores.

A resistência elétrica R, símbolo Ω, de um material depende da resistividade ρ, em Ω.m, do comprimento L_0, em m, e do inverso da área transversal, em m^2.

$$R = \rho \times \frac{L_0}{A}$$

A resistividade ρ é o inverso da condutividade σ:

$$\rho = \frac{1}{\sigma}$$

A constante de Wiedemann–Franz L é definida como:

$$L = \frac{k}{\sigma \times T}$$

Onde: k é a condutividade térmica
σ é a condutividade elétrica
T é a temperatura absoluta

Exemplo

Qual é a resistividade de um fio de cobre a 25°C?

Da Tabela 2.3, vem k = 398 W/m.K

T = 25°C → T = 25 + 273 = 298 K

L = 2,25 10^{-8} Ω.W/K^2

Substituindo na equação de Wiedemann–Franz, e resolvendo para σ, vem:

$$\sigma = 398 \times \frac{W}{m \times K} \times \frac{1}{298\ K} \times \frac{1}{2{,}25 \times 10^{-8}} \times \frac{k^2}{\Omega \times W} = 59358687 \times \frac{1}{\Omega \times W}$$

Para termos a resistividade tomamos o inverso vindo:

Resistividade ρ = 1,6846 10^{-8} Ω.m

2.5 Propriedades magnéticas

A maioria dos materiais não exibem propriedades magnéticas significativas. Alguns como o ferro, o níquel, o cobalto e o gadolíneo são exceções. Considere o solenoide da Figura 2.12. Em (a) temos só o condutor e em (b) é colocado um entreferro dentro do solenoide.

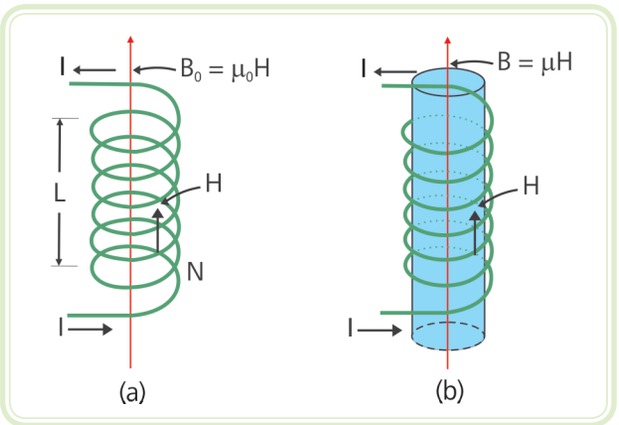


Figura 2.12: Solenoide de N voltas percorrido por uma corrente I (a) e mesmo solenoide mas com um entre-ferro (b)
Fonte: CTISM, adaptado de Callister Jr., 2008

O solenoide de comprimento (l) é constituído por um fio de N espirais (voltas), sendo percorrido por uma corrente I (ampère). O campo magnético H gerado será:

$$H = \frac{N \times I}{L} \quad \text{(ampère.volta/metro)}$$

Dentro do solenoide se formará uma indução magnética B (weber/m^2).

Se o solenoide estiver no vácuo, o valor de B será:

$$B = \mu_0 \times H$$

Sendo μ_0 a permeabilidade magnética no vácuo e de unidade: henry/m.

Mas se no interior do solenoide estiver um material como o ferro, o valor de B será:

$$B = \mu \times H$$

Sendo μ a permeabilidade do ferro. A indução B é maior com o ferro dentro do solenoide. É o princípio do eletroímã. Assim, o fluxo magnético no interior do solenoide depende da permeabilidade do material. Vamos usar estes conceitos para definir ferromagnetismo, diamagnetismo e paramagnetismo, considerando materiais inseridos no solenoide, que podem ser visualizados na Figura 2.13.

- **Ferromagnetismo** – propriedade de concentrar as linhas de força, produzindo uma densidade de fluxo B elevada. Ex.: ferro, níquel.

- **Paramagnetismo** – propriedade de produzir um fluxo B levemente superior ao vácuo.

- **Diamagnetismo** – propriedade de produzir um fluxo B de sentido contrário e de pequena intensidade. Como resultado, materiais diamagnéticos são repelidos por campos magnéticos externos.

Na Figura 2.13, comportamento da indução magnética nos materiais ferromagnéticos, paramagnéticos e diamagnéticos, tendo como referência um solenoide com vácuo no seu interior.

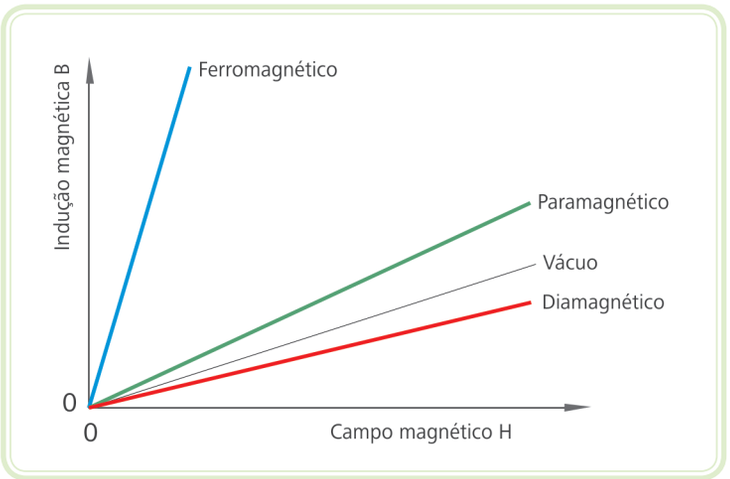


Figura 2.13: Comportamento da indução magnética B nos materiais ferromagnéticos, paramagnéticos e diamagnéticos
Fonte: CTISM, adaptado dos autores

Um material ferromagnético submetido a um campo magnético H tenderá a alinhar todos os seus domínios magnéticos na mesma direção. Após um determinado valor de H, todos os domínios ficam orientados na mesma direção, mesmo aumentando H. É um ponto de saturação. Veja esboço na Figura 2.14.

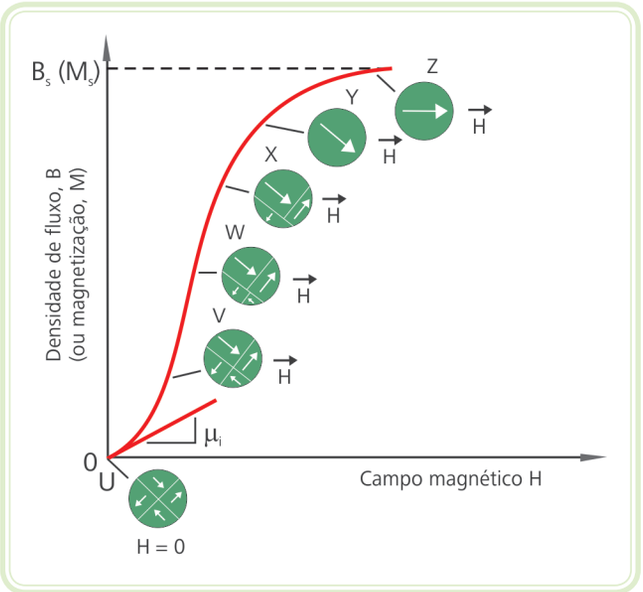


Figura 2.14: Comportamento dos domínios em função de campo magnético H, sendo que a partir de um determinado H ocorre saturação da indução magnética
Fonte: CTISM, adaptado de Callister Jr., 2008

Agora vamos considerar que o campo magnético é aplicado e retirado ciclicamente, apresentando caminhos diferentes para magnetizar e desmagnetizar. Conforme a Figura 2.15, referente a Curva B × H que mostra o caminho da magnetização e desmagnetização.

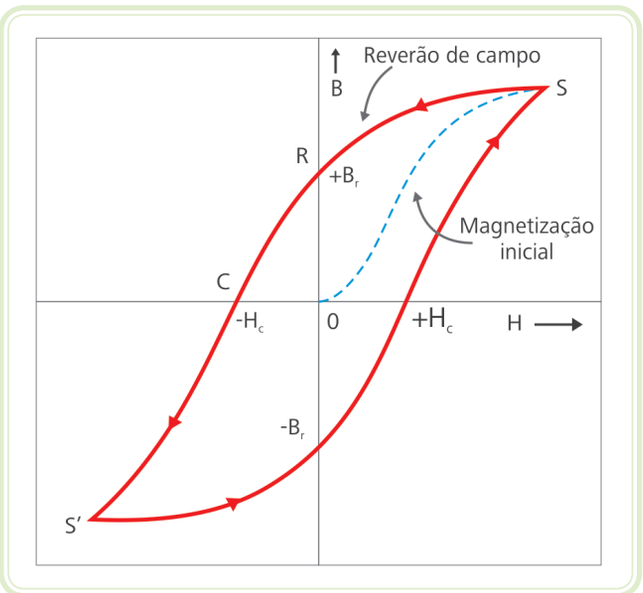


Figura 2.15: Curvas B × H na magnetização e desmagnetização
Fonte: CTISM, adaptado de Callister Jr., 2008

Na curva B × H temos pontos característicos:

- **Indução residual (B_r)** – é a indução magnética B que se conserva após cessado a aplicação do campo magnético H.

- **Força coercitiva (H_c)** – é a intensidade do campo magnético H a ser aplicado para zerar a indução magnética.

Um transformador trabalha com corrente alternada, e deve possuir indução residual $\mathbf{B_r}$ próxima a zero, não sendo assim necessário fornecer energia para retirar a indução residual. Já em um imã permanente é desejável que a indução residual seja a maior possível. Os materiais com alta indução residual B_r, são conhecidos como materiais magnéticos duros (imãs permanentes) e os com baixa indução residual B_r, são conhecidos como materiais magnéticos moles (placas de transformadores), representados na Figura 2.16.

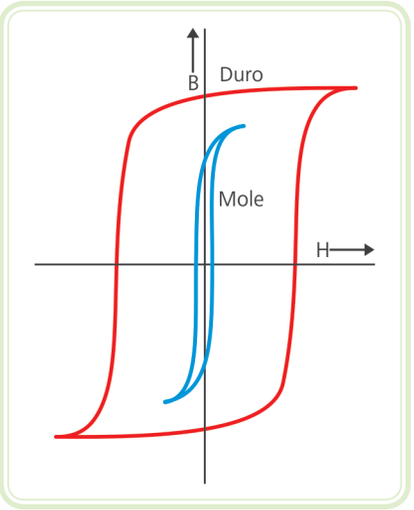


Figura 2.16: Curva BH para materiais magnéticos moles e duros
Fonte: CTISM, adaptado de Callister Jr., 2008

Assista a um vídeo sobre materiais magnéticos e levitação em: https://www.youtube.com/watch?v=BHW1YdGY-00

As propriedades magnéticas dependem da temperatura. Acima da temperatura Curie, que para o ferro é 770°C, o material deixa de ser magnético. Os materiais magnéticos são objetos de pesquisas envolvendo a levitação e suspensão magnética.

2.6 Propriedades químicas

As propriedades químicas retratam o comportamento de um material quando na presença de outro material, sob determinadas condições, como temperatura, catalizador e tempo. São inúmeras situações envolvendo as propriedades

químicas, desde a formação das substâncias simples até comportamento dos materiais à corrosão. As interações entre os materiais, ou reações químicas, podem informar se uma determinada reação é espontânea ou não. A reação espontânea, uma vez iniciada, não depende de fornecimento de energia para continuar ocorrendo. Diz-se que uma reação é espontânea quando a variação da energia livre de Gibbs G é negativa. Na reação não espontânea devemos fornecer energia para que ocorra.

Vamos ver o mecanismo de corrosão.

2.6.1 Corrosão

É a degradação do material em contato com o meio, quando ocorre interação química ou eletroquímica.

Podemos combater a corrosão:

- **Modificando o metal** – substituindo o metal (ou liga) por outro que não reaja com o meio ou reaja com velocidade desprezível.

- **Modificando o meio** – controlando pH, os gases dissolvidos e adição de inibidores.

- **Interpondo uma barreira entre o metal e o meio** – usando revestimentos como tintas.

- **Fornecendo energia** – aplicando proteção catódica ou anódica, para compensar os elétrons perdidos. O material que perde elétrons é o que se corrói.

O mecanismo básico da corrosão é a formação de uma célula galvânica, que ocorre quando os elétrons passam de uma região anódica para uma catódica, conforme Figura 2.17.

- **Anodo** – é de onde saem os elétrons, na figura é o Zn.

- **Catodo** – é onde chegam os elétrons, na figura é o Fe.

Os elétrons saem do anodo – placa de zinco – e vão para o catodo – placa de ferro.

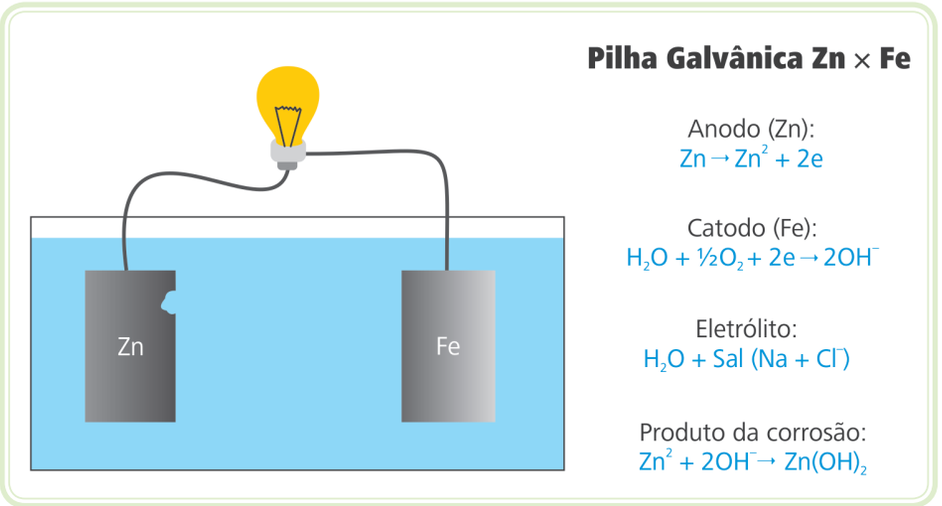


Figura 2.17: Aspecto de uma célula galvânica Fe-Zn. O Zn perde elétrons e sofre corrosão
Fonte: CTISM, adaptado de Gentil, 2003

Na Figura 2.18 temos a f.e.m. (força eletromotriz) de alguns materiais.

	Material	Potencial de eletrodo
	Au	+1.420
	$2H_2O$	+1.229
	Pt	+1.2
Mais catódico (mais inerte)	Ag	+0.800
	Fe^{2+}	+0.771
	$4(OH^-)$	+0.401
	Cu	+0.340
Referência	H_2	0.000
	Pb	-0.126
	Sn	-0.136
	Ni	-0.250
	Co	-0.277
Mais anódico (menos inerte)	Cd	-0.403
	Fe	-0.440
	Cr	-0.744
	Zn	-0.763
	Al	-1.662
	Mg	-2.363
	Na	-2.714
	K	-2.924

Figura 2.18: Potenciais de eletrodo de alguns materiais
Fonte: CTISM, adaptado de Callister Jr., 2008

Dois materiais diferentes possuem potencial de eletrodo diferente, e quando formam uma célula ou pilha galvânica, o mais anódico, que perde elétrons, terá corrosão. As células galvânicas também são criadas quando há diferença de concentração e de temperatura. Assim, os tipos básicos de células galvânicas (ou pilhas eletroquímicas) são:

- Célula galvânica formada por materiais de natureza química diferente.
- Célula galvânica formada pelo mesmo material, mas de eletrólitos de concentração diferentes.

- Célula galvânica formada pelo mesmo material e mesmo eletrólito, porém com teores de gases dissolvidos diferentes.

- Célula galvânica devida a temperaturas diferentes. Tanto para materiais iguais, como para materiais diferentes.

Por que uma sujeira deixada sobre uma pia de aço inoxidável, cria após um tempo um ponto de ferrugem?

Resposta
A área sob a sujeira cria uma diferença de concentração de oxigênio, que acaba criando uma célula galvânica. Outro exemplo de corrosão é a que ocorre em frestas.

Podemos proteger uma tubulação de aço subterrânea usando as chamadas células de sacrifício, que fornecem elétrons continuamente. Em navios são usadas placas de zinco; em lanchas usam-se placas a base de magnésio. Pode-se usar também um circuito eletrônico que fornece os elétrons para proteção do catodo.

Resumo

As principais propriedades mecânicas dos materiais estudadas nessa aula foram: resistência à tração, elasticidade, dureza, ductilidade, fluência (*creep*), fadiga e tenacidade. Um material dúctil apresenta uma grande deformação plástica antes da ruptura, enquanto que um material frágil não apresenta deformação permanente quando rompe. A ductibilidade pode ser avaliada pelo alongamento sofrido pelo material ou pela a estricção durante um ensaio. A tenacidade é a capacidade de absorver energia antes do rompimento, e corresponde à área sob a curva tensão × deformação. Um material tenaz absorve energia antes de romper e um material frágil absorve pouca energia antes de romper.

Na corrosão, quanto mais anódico for um material, mais tendência possui para se degradar por corrosão. Uma forma de minimizar a corrosão é usando placas de sacrifício anódicas, como por exemplo o zinco. Há a formação de células galvânicas entre materiais diferentes, mesmo material, mas com concentrações diferentes, concentração de gases diferentes, ou temperaturas diferentes.

Uma reação é espontânea quando a energia livre de Gibbs é negativa.

Quanto às propriedades magnéticas, os materiais são ferromagnéticos, diamagnéticos e paramagnéticos. Os materiais usados para construir transformadores são materiais magnéticos moles e os usados para construir imãs permanentes são os materiais magnéticos duros.

Atividades de aprendizagem

1. Complete corretamente a frase abaixo de acordo com as alternativas propostas.

Em um material _____, quando retiramos um carregamento aplicado na região _____, haverá o retorno as suas dimensões iniciais, percorrendo a curva no sentido _____.

a) dúctil – elástica – ascendente

b) dúctil – elástica – descendente

c) dúctil – plástica – ascendente

d) frágil – elástica – ascendente

e) frágil – plástica – descendente

2. Assinale a alternativa que identifica o tipo de material representado por 1, 2 e 3 na Figura 2.19, correspondente a curva tensão × deformação, segundo as seguintes afirmações:

I - Material mais resistente.

II - Material mais dúctil.

III - Material mais tenaz.

IV - Material com maior resiliência.

V - Material com comportamento frágil.

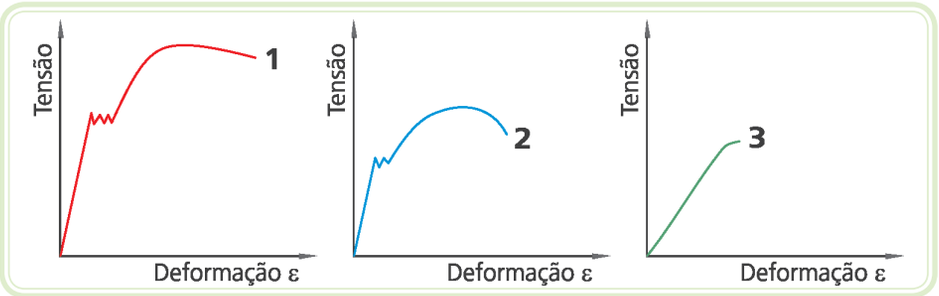


Figura 2.19: Exercício – curvas tensão × deformação
Fonte: CTISM, adaptado dos autores

a) I 1 – II 1 – III 1 – IV 3 – V 3.

b) I 1 – II 1 – III 3 – IV 3 – V 3.

c) I 1 – II 2 – III 1 – IV 3 – V 3.

d) I 2 – II 2 – III 2 – IV 3 – V 3.

e) I 3 – II 1 – III 2 – IV 3 – V 3.

3. Assinale a alternativa correta. Um fio de **alumínio** de comprimento inicial L_0 igual a 500 mm, com área inicial A_0 igual a 5 mm^2 e submetido a uma força de tração F de 100 N, apresentará respectivamente os seguintes valores referentes a tensão mecânica atuante (σ), alongamento total (ΔL) e deformação específica (ε) (considere E = 70 GPa):

a) 10 MPa – 0,0001449 m – 0,001818 m/m.

b) 20 MPa – 0,0000909 m – 0,000289 m/m.

c) 20 MPa – 0,0001449 m – 0,000289 m/m.

d) 30 MPa – 0,0000909 m – 0,000289 m/m.

e) 30 MPa – 0,0001449 m – 0,001818 m/m.

4. Assinale a alternativa correta. Um fio de aço (1020) de comprimento inicial L_0 igual a 500 mm, com área inicial A_0 igual a 5 mm^2 e submetido a uma força de tração F de 50 N, apresentará respectivamente os seguintes valores referentes à tensão mecânica atuante (σ), alongamento total (ΔL) e deformação específica (ε) (considere E = 207 GPa):

a) 10 MPa – 0,00002415 m – 0,00004830 m/m.

b) 10 MPa – 0,0000909 m – 0,000289 m/m.

c) 10 MPa – 0,0001449 m – 0,00004830 m/m.

d) 20 MPa – 0,00002415 m – 0,000144 m/m.

e) 20 MPa – 0,0000909 m – 0,000289 m/m.

5. Associe as colunas e assinale a alternativa que contém a sequência correta:

(A) Dureza.

(B) Ductilidade.

(C) Fluência.

(D) Fadiga.

(E) Tenacidade.

( ) Ruptura do material com cargas alternadas de valor inferior ao limite estático.

( ) Resistência que o material oferece a penetração de uma esfera ou ponta de diamante.

( ) Fenômeno da lenta deformação plástica de um metal em altas temperaturas e com carga constante.

( ) Capacidade do material se deformar plasticamente, sob tração, sem se romper.

( ) Capacidade do material de absorver energia na região plástica.

a) D – A – B – C – E.

b) D – A – C – B – E.

c) D – A – C – E – B.

d) D – B – C – A – E.

e) D – C – A – B – E.

6. Assinale a alternativa correta em relação à estricção:

a) Expressa a dureza em termos de variação das áreas inicial e final.

b) Expressa a fluência em termos de variação das áreas inicial e final.

c) Expressa a tenacidade em termos de variação das áreas inicial e final.

d) Expressa a ductilidade em termos de variação das áreas inicial e final.

e) Expressa a fadiga em termos de variação das áreas inicial e final.

7. Complete corretamente a frase abaixo de acordo com as alternativas propostas:

Um material que não se deforma _____ antes de romper apresenta fratura _____. Caso o material se deforme _____ antes da ruptura, apresenta fratura _____.

a) elasticamente – frágil – plasticamente – dúctil

b) elasticamente – dúctil – elasticamente – frágil

c) plasticamente – frágil – plasticamente – dúctil

d) plasticamente – frágil – elasticamente – dúctil

e) plasticamente – dúctil – plasticamente – frágil

8. Associe as colunas e assinale a alternativa que contém a sequência correta:

(A) Ferromagnetismo.

(B) Paramagnetismo.

(C) Diamagnético.

( ) Produz baixa indução magnética e inferior à produzida pelo vácuo.

( ) Produz alta indução magnética.

( ) Produz indução magnética levemente maior que a produzida pelo vácuo.

a) A – B – C.

b) B – A – C.

c) B – C – A.

d) C – A – B.

e) C – B – A.

9. Um transformador trabalha com corrente alternada, e deve possuir indução residual B_r próxima a zero, não sendo assim necessário fornecer energia para retirar a indução residual. Já em um imã permanente é desejável que a indução residual seja a maior possível.

Com base ao exposto acima assinale a alternativa que completa corretamente a frase a seguir:

Os materiais com _____ indução residual B_r, são conhecidos como materiais magnéticos _____ (imãs permanentes) e os materiais com _____ indução residual B_r, são conhecidos como materiais magnéticos _____ (placas de transformadores).

a) alta – duros – baixa – duros

b) alta – duros – baixa – moles

c) alta – moles – baixa – duros

d) baixa – duros – alta – moles

e) baixa – moles – alta – duros

10. As propriedades magnéticas dependem da temperatura, dessa forma assinale a alternativa que complemente corretamente a frase a seguir:

_____ da temperatura Curie, que para o ferro é _____, o material _____ magnético.

a) Abaixo – 770°C – deixa de ser

b) Abaixo – 770°C – passa a ser

c) Acima – 670°C – deixa de ser

d) Acima – 770°C – deixa de ser

e) Acima – 770°C – passa a ser

11. De acordo com as propriedades químicas de um material, assinale a alternativa que complemente a frase a seguir:

Dois materiais _____ possuem o potencial de eletrodo _____, e quando formam célula ou pilha galvânica, o material _____ anódico _____ elétrons e sofre corrosão.

a) diferentes – diferente – mais – perde

b) diferentes – diferente – menos – ganha

c) diferentes – iguais – mais – perde

d) iguais – diferente – mais – ganha

e) iguais – diferente – menos – ganha

Aula 3 – Diagrama de fases de materiais

Objetivos

Analisar soluções e misturas em geral.

Analisar soluções sólidas substitucionais e intersticiais.

Conhecer sistemas isomorfos e eutéticos.

Identificar as microestruturas do diagrama Fe-Fe_3C; ferrita; austenita; cementita e perlita.

3.1 Considerações iniciais

Nessa aula, estudaremos como é a microestrutura de diversos materiais metálicos básicos do dia a dia, enfatizando o aço. O uso de diagramas de equilíbrio permite visualizar as fases presentes, em função da temperatura e concentração dos constituintes. Para os materiais ferrosos, temos os seus microconstituintes básicos, como a cementita, ferrita e austenita. Para visualizar as microestruturas a amostra é embutida dentro de baquelite, possibilitando assim que seja manuseada e submetida à lixamento e após polimento até que sua superfície fique espelhada. Então um ataque químico de sua superfície, com reagente adequado, revela os contornos de grão, que podem ser observados em um microscópio metalúrgico, conforme Figura 3.1, onde é visto o detalhe de uma amostra embutida em baquelite, sendo assim visualizadas as microestruturas após ataque químico da amostra.

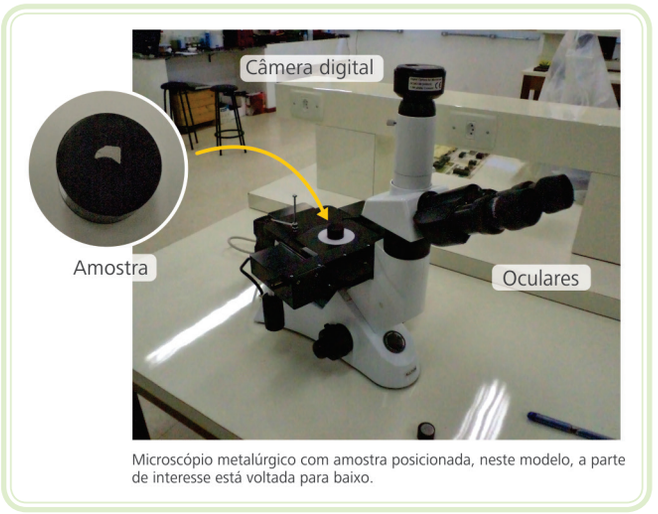


Figura 3.1: Microscópio metalúrgico, onde no detalhe temos a amostra a ser analisada
Fonte: CTISM, adaptado dos autores

3.2 Soluções e misturas

Os materiais que usamos, como os aços, são compostos por mais de um elemento, no caso o ferro e carbono. Apesar de o aço estar no estado sólido, os conceitos envolvidos são os mesmos das soluções líquidas, que estamos mais familiarizados. No aço temos um exemplo de solução sólida formada pelo ferro e pelo carbono. Definimos como fase uma porção homogênea do material com propriedades físicas e químicas uniformes. Por exemplo, misturando álcool e água, em qualquer proporção, teremos apenas uma fase, e dizemos que a solubilidade é ilimitada.

Se adicionarmos sal na água, poderemos dissolver pequenas porções de sal até atingir uma proporção em que começa existir a precipitação do sal, formando duas fases. Se aumentarmos a temperatura poderemos dissolver um pouco mais de sal. O líquido formado, água com pequenas quantidades de sal, forma uma fase homogênea. Quando o sal não se dissolve todo na água, ocorre a sua precipitação, criando uma nova fase.

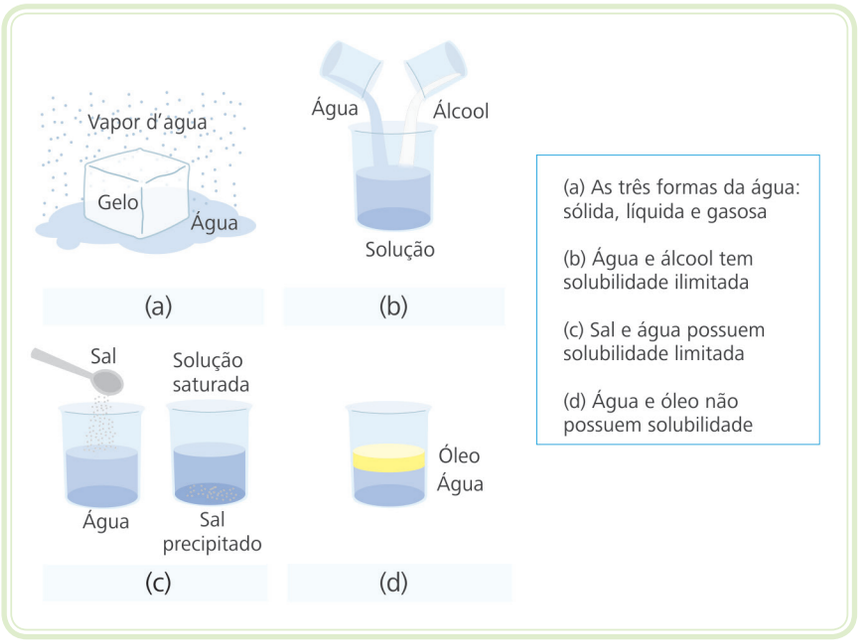


Figura 3.2: Estados físicos e solubilidade das substâncias – água em estado solido líquido e gasoso (a), água e álcool – solubilidade ilimitada (b), sal e água – solubilidade limitada (c) e água e óleo – não solúvel (imiscível) (d)
Fonte: CTISM, adaptado de Askland, 2008

O estado físico de uma substância é resultado da combinação da pressão, volume e temperatura. Por exemplo, o ponto de ebulição da água é 100°C, com a pressão de 1 atm. Diminuindo a pressão, a temperatura de ebulição baixa e vice-versa. Um mesmo elemento pode se apresentar no estado sólido, líquido ou gasoso, ou possuir esses três estados simultaneamente no seu ponto triplo. Para avaliar o equilíbrio entre o estado líquido, sólido e gasoso, considerando a pressão e a temperatura como parâmetros, podemos aplicar a regra de fases de Gibbs:

$$F = C - P + 2$$

Onde: F é o graus de liberdade
C é o número de componentes
P é o número de fases

Se a pressão ou a temperatura forem constantes, a fórmula da regra de fases de Gibbs fica:

$$F = C - P + 1$$

Na Figura 3.3, temos o diagrama de equilíbrio pressão × temperatura da água, e a interpretação dos graus de liberdade F para três situações:

F = 0 (ponto tríplice)
F = 1
F = 2

a) No ponto D temos um componente C – água – e três fases P; aplicando a regra de fases vem **F = 0**, ou seja, zero graus de liberdade significando que não podemos mudar a temperatura e pressão, ou seja, é um **ponto único**.

b) Para o ponto "F", temos C = 1; P = 2 e obtemos F = 1. **F = 1** significa que se mudarmos a temperatura a pressão terá que ser ajustada para continuar na **fronteira** entre o estado líquido e vapor.

c) Para o ponto "G" na região líquida, tem-se **F = 2** (dois graus de liberdade) significando que podemos mudar ambos: a temperatura e a pressão e continuaremos na **região líquida**.

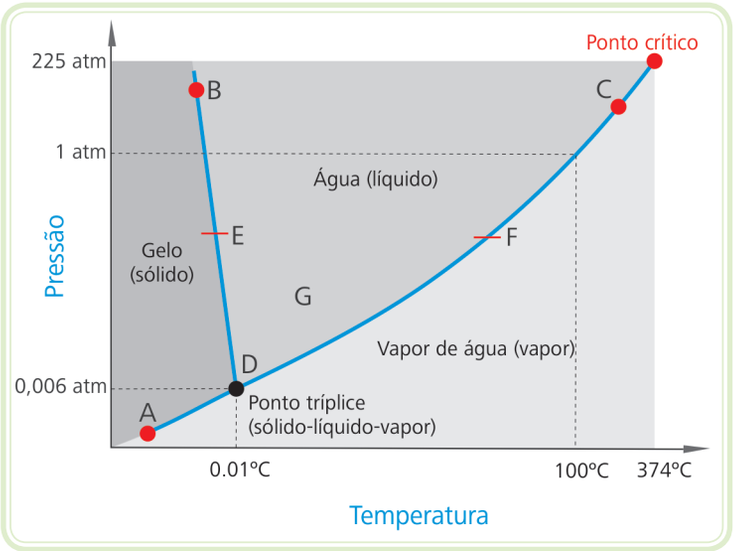


Figura 3.3: Diagrama de equilíbrio da água
Fonte: CTISM, adaptado de www.cienciadosmateriais.org

No caso de misturarmos dois elementos podemos construir o diagrama de equilíbrio das fases presentes, considerando a pressão atmosférica constante. Assim podemos conhecer:

- Temperatura de fusão dos componentes.

- Fases presentes em função da temperatura.
- Composição química das fases.
- Proporção das fases.
- Limite de solubilidade.
- Distribuição de fases em função da concentração e temperatura.

Na Figura 3.4, temos o diagrama de equilíbrio para o sistema água (H_2O) e sal (NaCl). As linhas marcam as divisões das fases existentes. O diagrama possui delimitadas quatro regiões, há um total de três fases: uma líquida (salmoura) e duas fases sólidas (sal e gelo). A fase líquida existe isolada como salmoura e temos uma parte sólida formada por duas fases – gelo e sal.

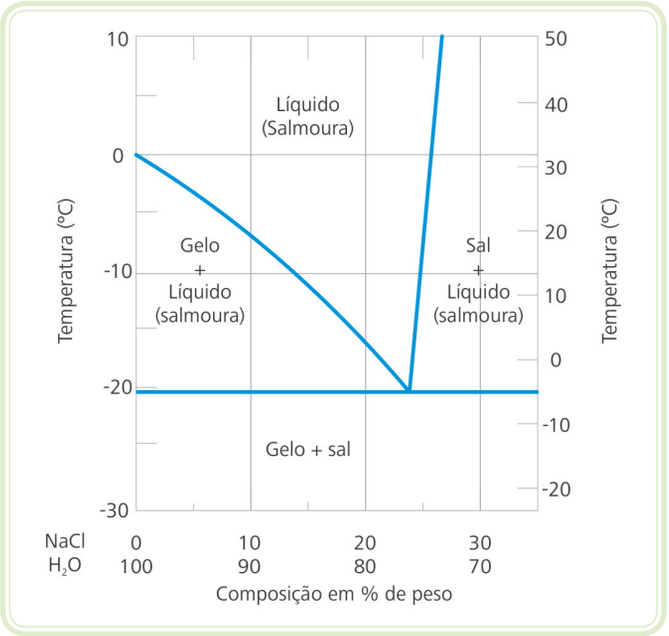


Figura 3.4: Diagrama de equilíbrio água-sal
Fonte: CTISM, adaptado de Callister Jr., 2008

Como a pressão é constante, a regra de Gibbs para fases fica: F = C – P + 1. Em um ponto qualquer dentro da região da fase líquida, temos C = 2 (água e sal), P = 1 (líquido) e os graus de liberdade são F = 2. Isto significa que podemos variar a temperatura e a composição e ainda estaremos dentro da área de fase líquida. Considerando agora a linha de separação líquido/gelo+líquido, temos F = 1 (C = 2; P = 2), ou seja, fixando a temperatura, só temos uma concentração possível e vice-versa. Para o ponto comum a todas

quatro regiões (ponto eutético no caso), temos F = 0 (C = 2; P = 3), ou seja, só existe um ponto com aquela temperatura e concentração.

A solubilidade de um elemento em um outro pode ser parcial ou total.

3.3 Sistemas isomorfos e eutéticos

Quando ocorre a solidificação de dois materiais líquidos misturados, sendo ao menos um deles metal, podemos ter:

- Solubilidade total de um no outro.
- Solubilidade parcial de um no outro.
- Insolubilidade.

Lembre-se que o fato de dois metais serem completamente solúveis (miscíveis) um no outro no estado líquido, não indica que eles serão miscíveis na fase sólida formada. Para uma solução, chama-se soluto a parte que está em menor quantidade, e solvente a parte que está em maior quantidade. A solução pode ser sólida ou líquida. Os tipos básicos de soluções sólidas são a solução sólida substitucional, formada por átomos de tamanho semelhante, e a solução sólida intersticial, onde o soluto apresenta dimensões bem menores e ocupa os interstícios do cristal formado, conforme Figura 3.5.

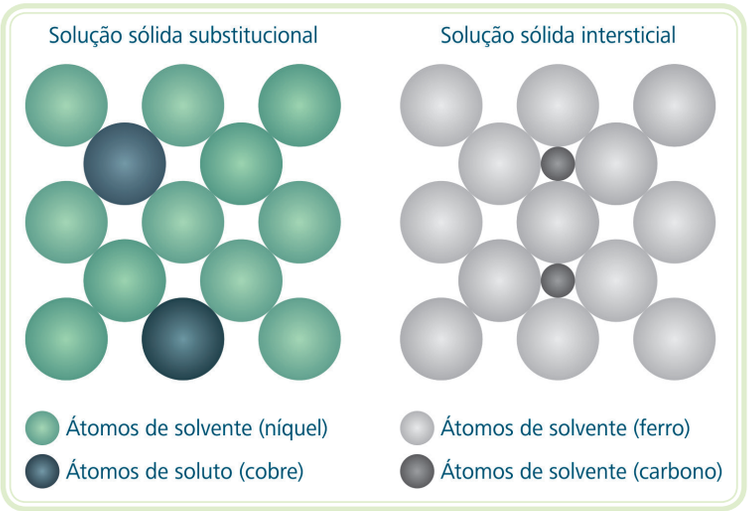


Figura 3.5: Solução sólida substitucional e interstitucional
Fonte: CTISM, adaptado de www.cienciadosmateriais.org

Com base na solubilidade, temos dois tipos de sistemas:

- **Sistema isomorfo** – a solubilidade dos elementos entre si é total.

- **Sistema eutético** – a solubilidade dos elementos é parcial.

As fases sólidas formadas recebem o nome de letras gregas. As linhas que separam as diversas fases são:

- **Linha *liquidus*** – delimita duas regiões, sendo uma região formada com fase totalmente líquida, indicada por L, e a outra por fases sólida e líquida (α + L).

- **Linha *solvus*** – delimita duas regiões adjacentes e sólidas.

- **Linha *solidus*** – delimita duas regiões, sendo uma com fase totalmente sólida e a outra formada por fases sólida e líquida.

Um sistema isomorfo é aquele em que a solubilidade ou miscibilidade dos componentes é total, e no estado sólido forma apenas uma fase. Um exemplo é a liga cobre-níquel, conforme demonstrado do diagrama de equilíbrio Cu-Ni da Figura 3.6. Temos dois componentes Cu e Ni, e no estado sólido formam uma única fase α. Dizemos que a solubilidade dos dois metais é total entre si, pois formam uma única fase. Na Figura 3.6, observa-se que a temperatura de fusão do Cu é 1085°C, e a do Ni é 1453°C. Exemplo de sistema isomorfo. Na região superior temos fase líquida L, e na inferior fase sólida α. Na região central coexistem duas fases L e α. O ponto A possui 60 % de Ni e 40 % de Cu, e está no estado sólido, abaixo da linha *solidus* do diagrama (Figura 3.6). O ponto B possui fases sólida e líquida. Para qualquer ponto, a soma dos constituintes perfaz 100 %.

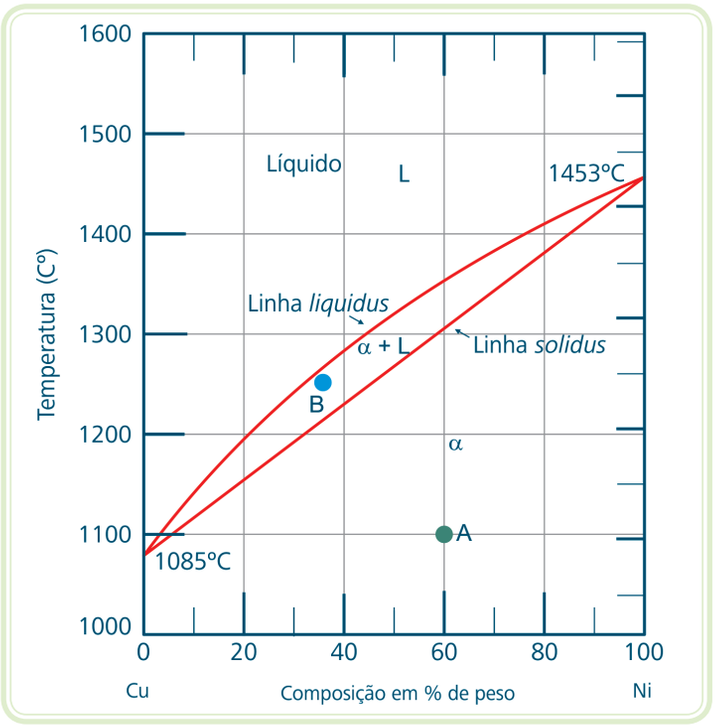


Figura 3.6: Diagrama de equilíbrio Cu-Ni
Fonte: CTISM, adaptado de Callister Jr., 2008

Vamos considerar uma liga com 35 % Ni (65 % Cu). Quando começa a esfriar a primeira fase α formada, possui concentração de 46 % de Ni, conforme Figura 3.7. Quando baixa para o ponto c, a fase sólida α possui agora 43 % Ni. No ponto d, quando termina a transformação para fase sólida α. Observa-se que o centro do grão formado é mais rico em Ni que a sua periferia. Abaixo da linha *solidus* só temos a fase α, para qualquer concentração de Cu e Ni. A solubilidade é total para qualquer concentração.

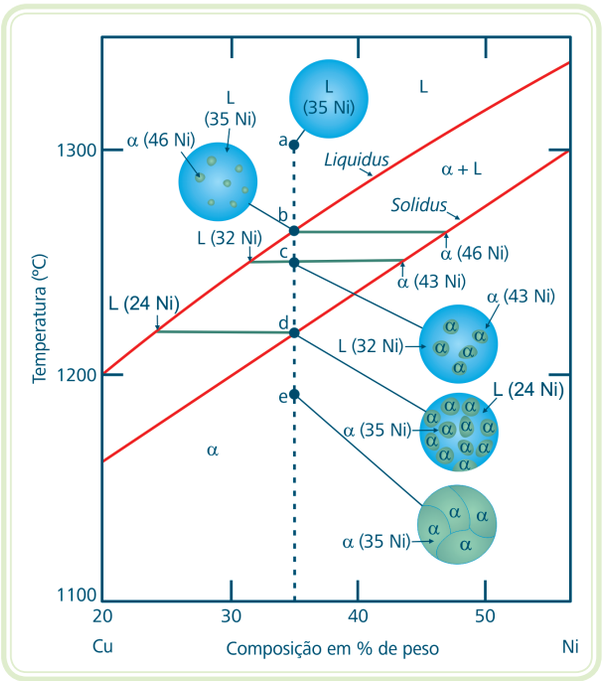


Figura 3.7: Microestrutura formada no esfriamento de uma liga isomorfa Cu-Ni
Fonte: CTISM, adaptado de Callister Jr., 2008

Já o sistema eutético se forma quando a solubilidade dos dois constituintes não é total. Um exemplo é o sistema Pb-Sn, mostrado na Figura 3.8. O ponto de fusão do Pb é 327°C e do Sn é 232°C, mas para uma concentração de 61,9 % de Sn, é 183°C o ponto de fusão. A liga Pb-Sn, com 61,9 % Sn é usada para solda, pois como a sua temperatura é mais baixa é necessária uma menor potência ao aparelho de solda. É um exemplo de sistema eutético. A solubilidade do Pb no Sn e vice-versa não é total, havendo duas fases sólidas α e β, que podem coexistir, sendo identificados no diagrama por $\alpha + \beta$. Apresentam também o ponto eutético formado por 61,9 % de Sn, que apresenta o menor valor de temperatura para a fase líquida, que vale no caso 183°C, que é inferior a temperatura de fusão de seus constituintes (Pb = 327°C e Sn = 232°C).

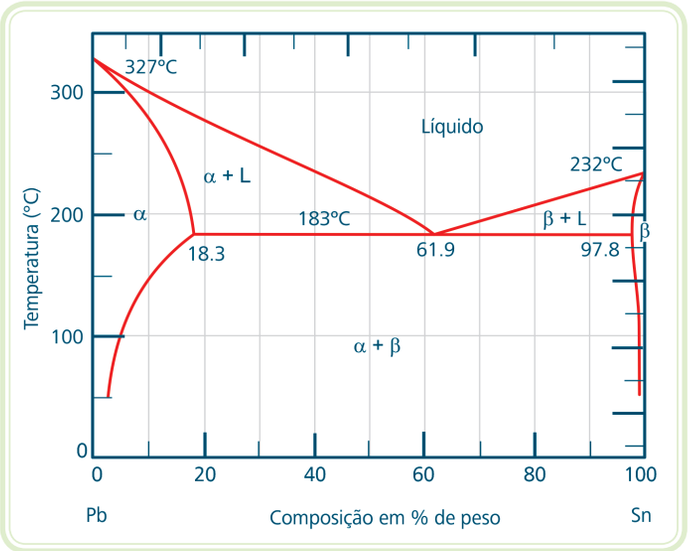


Figura 3.8: Diagrama de equilibrio Pb-Sn (chumbo-estanho). Exemplo de sistema eutético
Fonte: CTISM, adaptado de Callister Jr., 2008

A fase α é formada por Pb com uma pequena quantidade Sn dissolvida. Observe que na temperatura ambiente a quantidade de Sn é muito pequena, mas a 183°C, temos 18,3 % de Sn dissolvido na fase α. A fase β é formada por Pb dissolvido no Sn, contendo no máximo (100-97,8) = 2,2 % de Pb.

O aspecto ao microscópio dependerá da composição considerada. Temos as fases sólidas α e β, sozinhas nos extremos: 100 % Pb ou 100 % Ni. Para o ponto eutético, 61,9 % Sn, é formada uma estrutura composta totalmente de lamelas alternadas, da fase α e da fase β. Afastando-se do ponto eutético, à esquerda, coexistem as microestruturas lamelar e a fase α e na parte com concentração próxima de 100 % de Pb, só distinguiríamos a fase sólida α. Quanto mais perto da concentração do ponto eutético, maior a área de microestrutura lamelar e quanto mais próximo da linha divisória da fase α, maior a quantidade da fase α.

A direita do ponto eutético, o comportamento é análogo, com a diferença que consideramos agora a fase β.

Na Figura 3.9, temos o aspecto da microestrutura formada no ponto eutético, onde a fase líquida dá origem à fase sólida formada por lamelas.

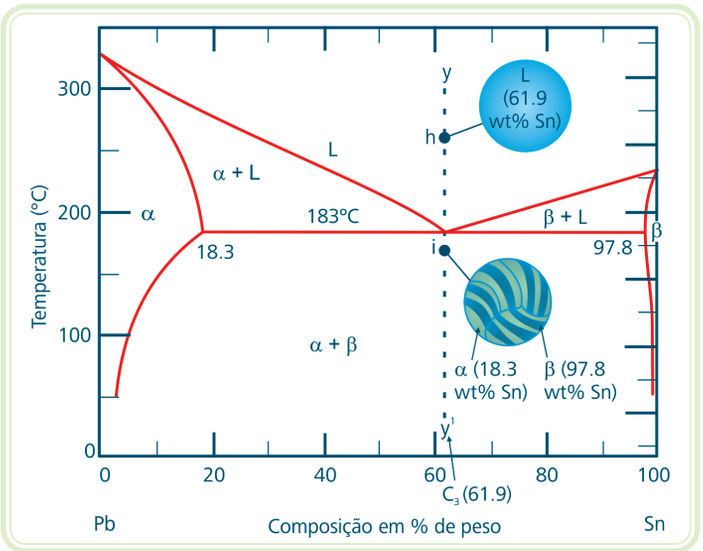


Figura 3.9: Aspecto da microestrutura formada no ponto eutético 61,3 % Sn
Fonte: CTISM, adaptado de Callister Jr., 2008

Na Figura 3.10(c) temos a microestrutura formada com concentrações menores ao do ponto eutético e maiores que 18,3 % de Sn. Observe que na fase liquida temos uma única fase L. Ao cruzar a linha *liquidus*, começa a se formar a fase sólida α, tendo como matriz a fase líquida L, até o patamar da temperatura de 183°C. Ao atingir 183°C, a parte que não se transformou em sólido α, instantaneamente se transforma no composto lamelar.

Na Figura 3.10 podem ser observadas respectivamente as seguintes microestruturas:

a) Aspecto da microestrutura com quase 100 % Pb.

b) Microestrutura com 15 % Sn.

c) Aspecto da microestrutura com 40 % Sn.

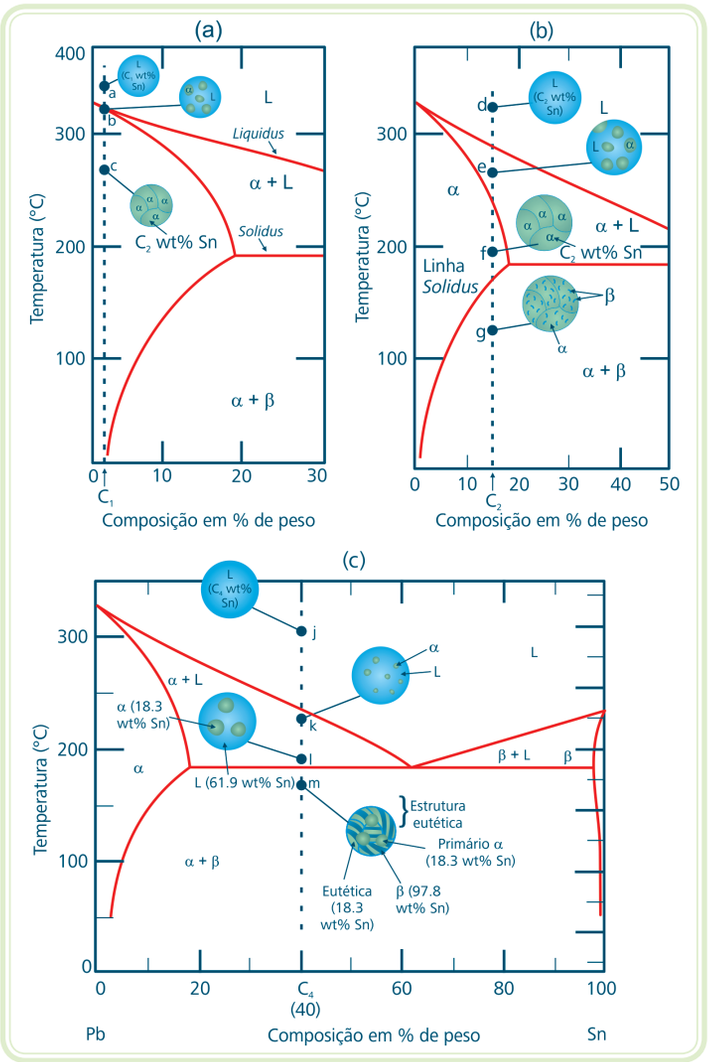


Figura 3.10: Microestruturas em função do percentual de Pb e Sn
Fonte: CTISM, adaptado de Callister Jr., 2008

Agora vamos analisar outra região característica, com a concentração de Sn de 15 %, conforme Figura 3.10(b). Observamos que na região superior só temos a fase líquida L, e abaixando a temperatura começa a formar a fase sólida α, que coexiste com a líquida. Ao atingir a linha *solidus* teremos formada só a fase α. Continuando a baixar a temperatura, atingiremos a linha *solvus*, e abaixo existirão as fases α e β. Como há um excesso de Sn dissolvido, haverá uma precipitação da fase β dentro da fase α, caso haja esfriamento brusco. Caso o resfriamento seja lento, formam-se α e β, sendo α em maior proporção.

Assista a um vídeo para visualizar as microestruturas de um sistema eutético acessando: http://www.cienciadosmateriais.org/index.php?acao=exibir&cap=14

Para concentrações pequenas de Sn menores que 2 %, ou Pb quase puro, forma-se somente a fase α, conforme Figura 3.9(a). As estruturas formadas para concentrações acima de 61,9 % Sn são semelhantes, porém a fase que se forma é a fase β. O ponto eutético caracteriza-se por apresentar o número de graus

de liberdade F = 0, ou seja, a temperatura e o percentual dos componentes são perfeitamente caracterizadas, não existindo outro ponto com essas características.

Assim no ponto eutético, passamos de uma fase líquida para duas fases α e β, e representamos por:

Líquido eutético $\rightarrow \alpha + \beta$

Semelhante ao ponto eutético, existem outros pontos característicos que apresentam também F = 0, que estão a seguir representadas, a partir da(s) fase(s) de maior temperatura para a(s) fase(s) de menor temperatura.

a) Eutético: líquido $\rightarrow \alpha + \beta$

b) Eutetoide: $\alpha \rightarrow \beta + \gamma$

c) Peritético: liquido $+ \alpha \rightarrow \beta$

d) Peritetoide: $\alpha + \beta \rightarrow \gamma$

e) Monotético: L1 $\rightarrow \alpha$ + L2

3.4 Diagrama de equilíbrio ferro-carbono

Dada a importância do aço nas aplicações mecânicas, vamos estudar o diagrama de equilíbrio do ferro com o carbono. O carbono terá sua concentração dada pelo composto Fe_3C, denominado de cementita, de tal forma que com 100 % de cementita, corresponde a 6,7 % de carbono, conforme Figura 3.11. A cementita é um carboneto com estrutura cristalina ortorrômbica, e é extremamente dura. O ferro no estado puro, submetido à pressão de 1 atm, apresenta estrutura cúbica de corpo centrado, conhecida como ferro α (alfa), desde a temperatura ambiente até 912°C. Entre 912°C e 1394°C apresenta estrutura cristalina cúbica de face centrada, conhecido como ferro γ (gama) e entre 1394°C e 1538°C, conhecido como ferro delta (δ), onde volta a ter estrutura cúbica de corpo centrado, de dimensões maiores que a do ferro α. Entre 1538°C e 2875°C está no estado líquido, e acima de 2875°C está no estado gasoso. Acima de 770°C (ponto Curie) deixa de ser ferromagnético. No estado sólido há mudança de estrutura cristalina (alotropia) e na temperatura Curie 770°C torna-se não-magnético.

O diagrama de equilíbrio Fe-Fe_3C, possui diversas fases distribuídas em regiões, que dependem da temperatura e da concentração de carbono. Observe que há regiões em que coexistem duas fases, sendo suas regiões vizinhas formadas por fases únicas. Temos regiões com fases sólidas, indicadas pelas letras gregas δ (delta), γ (gama) e α (alfa), e líquida, indicada por (L). O ponto eutético tem 4,3 % de C.

Temos outro ponto característico dos aços, que é o ponto eutetoide, com 0,76 % de C, a 723°C, onde uma fase sólida γ ao esfriar, se transforma em duas fases α e Fe_3C, e possui formato lamelar, levando o nome de perlita, que é um composto lamelar formado por ferrita (cerca de 80 %), e cementita (cerca de 20 %). A linha *liquidus* da cementita aparece com valores estimados, sendo representada em linha tracejada.

As fases sólidas presentes no diagrama Fe-Fe_3C são: α, γ, δ e Fe_3C, cujos nomes são:

α – ferrita.

γ – austenita.

δ – fase delta.

Fe_3C – cementita.

No ponto com 0,76 % de C – ponto eutetoide – forma-se 100 % de perlita.

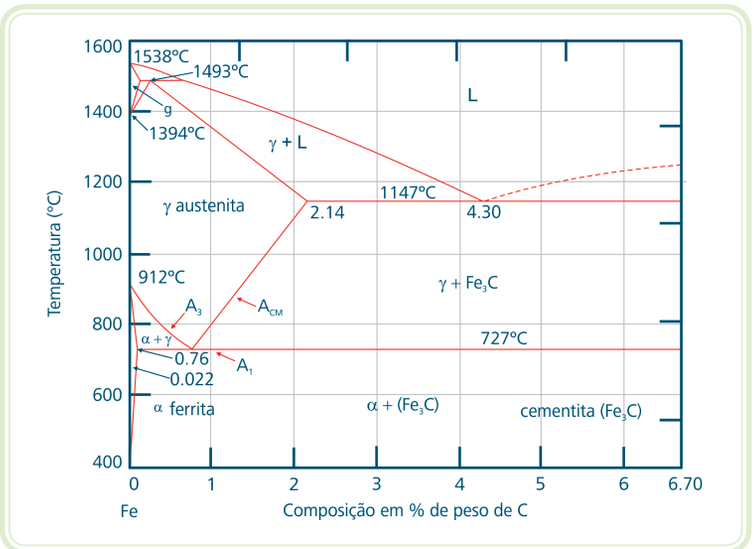


Figura 3.11: Diagrama de equilíbrio Fe-Fe_3C
Fonte: CTISM, adaptado de Callister Jr., 2008

Na Figura 3.11 temos alguns elementos e curvas típicas do diagrama de equilíbrio Fe-Fe_3C, assim denominadas:

- **Cementita** – Fe_3C – carbeto (carboneto) de ferro, fórmula Fe_3C, com 6,67 % de C , estrutura cristalina ortorrômbica, muito duro, dureza maior que 800 HB e frágil. No diagrama de equilíbrio Fe-Fe_3C, com 6,67 % de C, temos só cementita. Possui baixa resistência mecânica, baixa tenacidade e ductibilidade.

- **Ferrita** δ – solução sólida de carbono em ferro δ (CCC). Solidifica a 1538°C e dissolve até 0,1 % de carbono a 1393°C. Não apresenta utilização comercial.

- **Austenita** γ – (ferro gama) solução sólida intersticial de carbono em ferro γ (CFC), com solubilidade máxima de 2,14 % de C a 1147°C e de 0,76 % a 727°C. Vários tratamentos térmicos são feitos dentro desta região da austenita. É não ferromagnética. Possui elevada ductibilidade e tenacidade. Sua resistência mecânica é cerca de 150 MPa.

- **Ferrita** α – solução sólida intersticial de carbono em ferro α (CCC). Dissolve até 0,022 % de C na temperatura eutetoide (727°C). Sua resistência mecânica é cerca de 150 MPa. Possui ótima ductibilidade e tenacidade. É ferro magnético até 770°C.

- **Perlita** – possui aspecto lamelar, formada por 80 % de ferrita e 20 % de cementita, sendo ferrita na área escura.

Para efeitos de análise do diagrama Fe-Fe_3C, temos três linhas características na região do aço, com teor de C menor que 2,1 %, no diagrama. Para teores de carbono acima de 2,1 % de C até 6,7 % de C temos a região dos ferros fundidos.

Linha A_3 – abaixo da linha A_3 começa a se formar ferrita proeutética, que é formada antes da ferrita eutetoide. A ferrita proeutética não se apresenta em lamelas.

Linha A_{cm} – abaixo desta linha começa a se formar cementita proeutetoide, que é formada antes da cementita eutetoide. A cementita proeutetoide não se apresenta em lamelas.

Linha A_1 – abaixo desta linha A_1 não existe austenita.

3.5 Microestruturas do diagrama ferro-carbono

Assista a um vídeo sobre uma animação de microestrura de um aço eutetoide em: http://www.cienciadosmateriais.org/indexphp?acao=exibir&cap=13&top=277

Microestrutura é o aspecto que se apresenta ao microscópio, o arranjo das fases presentes. No diagrama Fe-Fe_3C, à temperatura ambiente, temos duas fases – ferrita e cementita – que formam microestruturas conforme a concentração de carbono. Com 0,76 % de C, temos 100 % formando a microestrutura perlita, conforme Figura 3.12. Outras concentrações de C apresentam a perlita e a ferrita ou cementita.

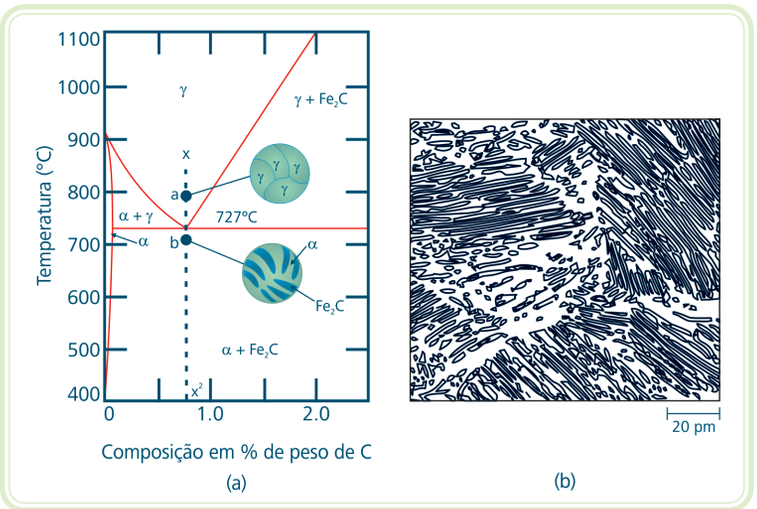


Figura 3.12: Ponto eutetoide do diagrama de equilíbrio Fe-Fe_3C, onde é formado 100 % de perlita (a) e aspecto da perlita ao microscópio (b)
Fonte: CTISM, adaptado de Callister Jr., 2008

Assista a um vídeo de uma animação de microestrura de um aço hipoeutetoide em: http://www.cienciadosmateriais.org/index.php?acao=exibir&cap=13&top=279

Para concentrações abaixo do ponto eutetoide, temos os chamados aços hipoeutetoides, como podem ser observadas nas Figuras 3.13(a) e 3.13(b), que correspondem:

a) Aspecto de microestrutura de aço hipoeutetoide, formada por ferrita proeutetoide (se forma antes do eutetoide) e perlita.

b) Microestrutura de um aço hipoeutetoide com 0,38 % de C.

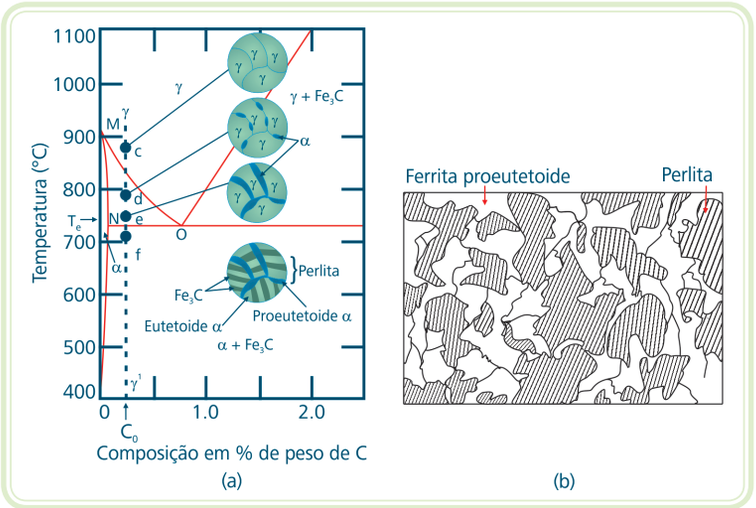


Figura 3.13: Aspecto de microestrutura de aço hipoeutetoide, formada por ferrita proeutetoide (se forma antes do eutetoide) e perlita (a) e microestrutura de um aço hipoeutetoide com 0,38 % de C (b)
Fonte: CTISM, adaptado de Callister, 2008

Para concentrações acima do ponto eutetoide, temos os chamados aços hipereutetoides, com os respectivos aspectos conforme Figura 3.14:

a) Aspecto de microestrutura de aço hipereutetoide, formada por cementita proeutetoide (se forma antes do eutetoide) e perlita.

b) Aspecto da microestrutura do aço hipereutetoide com 1,4 %, onde se vê a perlita e a cementita proeutetoide.

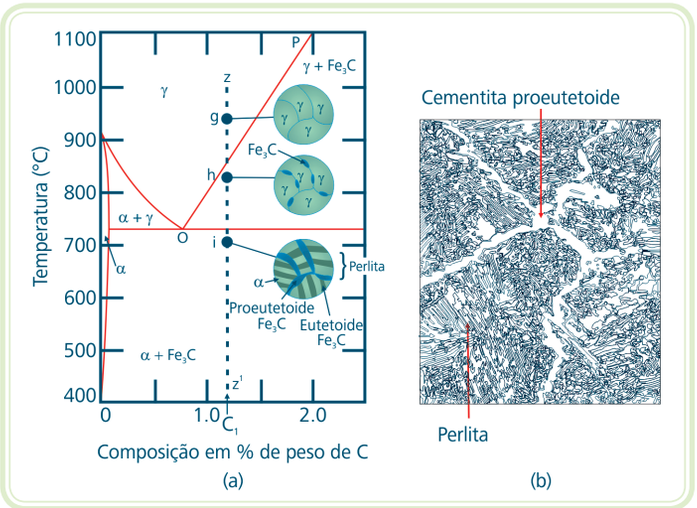


Figura 3.14: Aspecto de microestrutura de aço hipereutetoide, formada por cementita proeutetoide (se forma antes do eutetoide) e perlita (a) e microestrutura da perlita e da cementita proeutetoide (b)
Fonte: CTISM, adaptado de Callister, 2008

Resumo

Nessa aula, podemos verificar que os metais formam soluções no estado sólido. Temos dois tipos básicos: solução sólida substitucional e solução sólida intersticial. Existem dois tipos de sistemas quanto à solubilidade de seus constituintes entre si: sistema isomorfo, com solubilidade total entre si, e sistema eutético, com solubilidade parcial entre si. O ponto eutético é caracterizado por possuir ponto de fusão inferior aos de seus constituintes. A microestrutura formada no ponto eutético apresenta estrutura lamelar.

Um aço apresenta cerca de 0,002 % de C até 2,1 % de C. Acima de 2,1 % de carbono temos os ferros fundidos. O diagrama de equilíbrio do $Fe\text{-}Fe_3C$ apresenta um ponto eutético a 4,3 % de C e um ponto eutetoide com cerca de 0,76 % de C. O ponto eutetoide do aço apresenta uma fase sólida invés da fase liquida do eutético. A microestrutura formada no ponto eutetoide é a perlita, e aços com menos de 0,76 % de C são os hipoeutéticos e com mais de 0,76 % de C são os hipereutéticos. Os microconstituintes básicos do aço são a austenita, a ferrita e a cementita.

Atividades de aprendizagem

1. Complete corretamente a frase abaixo de acordo com as alternativas propostas:

Para uma _____, chama-se _____ a parte que está em _____ quantidade, e _____ a parte que está em _____ quantidade.

a) mistura – soluto – maior – solvente – menor

b) mistura – solvente – menor – soluto – maior

c) solução – soluto – maior – solvente – menor

d) solução – soluto – menor – solvente – maior

e) solução – solvente – menor – soluto – maior

2. Complete corretamente a frase abaixo de acordo com as alternativas propostas:

Os tipos básicos de soluções sólidas são a _____, formada por átomos de tamanho _____, e a solução sólida _____, onde o soluto apresenta dimensões bem _____ e ocupa os interstícios do cristal formado.

a) intersticial – diferente – substitucional – maiores

b) intersticial – semelhante – substitucional – maiores

c) intersticial – semelhante – substitucional – menores

d) substitucional – diferente – intersticial – maiores

e) substitucional – semelhante – intersticial – menores

3. Com base no estudo referente a solubilidade relacione as colunas e assinale a alternativa que identifique corretamente os tipos de linhas que separam as diversas fases.

(A) Linha *líquidus*.

(B) Linha *solvus*.

(C) Linha *solidus*

( ) Delimita duas regiões, sendo uma com fase totalmente sólida e a outra formada por fases sólida e líquida.

( ) Delimita duas regiões, sendo uma região formada com fase totalmente líquida, indicada por L, e a outra por fases sólida e líquida (L).

( ) Delimita duas regiões adjacentes, formadas ambas por fases sólidas.

a) A – B – C.

b) A – C – B.

c) B – A – C.

d) C – A – B.

e) C – B – A.

4. Marque (V) para verdadeiro e (F) para falso para as afirmativas a seguir e assinale a alternativa que contém a sequência correta:

( ) O fato de dois metais serem completamente solúveis (miscíveis) um no outro no estado líquido, não indica que eles serão miscíveis na fase sólida formada.

( ) Sistema isomorfo é aquele em que a solubilidade ou miscibilidade dos componentes é parcial, e no estado sólido forma apenas uma fase (únicas).

( ) Sistema eutético se forma quando a solubilidade dos dois constituintes não é total.

a) V – V – F.

b) V – F – V.

c) V – F – F.

d) F – V – V.

e) F – V – F.

5. Assinale a alternativa correta em relação à fase.

a) Uma porção heterogênea do material com propriedades físicas e magnéticas diferentes.

b) Uma porção homogênea do material com propriedades físicas e químicas uniformes.

c) Uma porção heterogênea do material com propriedades físicas e químicas diferentes.

d) Uma porção homogênea do material com propriedades físicas e magnéticas uniformes.

e) Uma porção heterogênea do material com propriedades físicas e químicas uniformes.

6. Assinale a alternativa que completa corretamente a frase a seguir:

O ferro no estado puro, submetido à pressão de _____, apresenta estrutura _____ de corpo centrado, conhecida como ferro _____, desde a temperatura ambiente até _____.

a) 1 atm – cúbica – α (alfa) – 912°C

b) 1 atm – cúbica – γ (gama) – 1394°C

c) 1 atm – cristalina – α (alfa) – 1538°C

d) 2 atm – cristalina – δ (delta) – 912°C

e) 2 atm – cristalina – δ (delta) – 2875°C

7. Relacione as colunas e assinale a alternativa correta que identifica alguns dos componentes pertencentes às curvas típicas do diagrama de equilíbrio Fe-Fe_3C:

(A) Cementita.

(B) Ferro δ.

(C) Austenita γ.

(D) Ferro α.

( ) Solidifica a 1538°C.

( ) Vários tratamentos térmicos são feitos dentro desta região. Sua resistência mecânica é cerca de 150 MPa.

( ) Dissolve até 0,022 % de C na temperatura eutetoide (727°C).

( ) Fórmula Fe_3C, com 6,67 % de C, muito duro, dureza maior que 800 HB e frágil.

a) B – C – D – A.

b) B – D – C – A.

c) C – B – A – D.

d) D – B – A – C.

e) D – C – B – A.

8. Em relação às linhas características da região do aço C, assinale a alternativa **incorreta**:

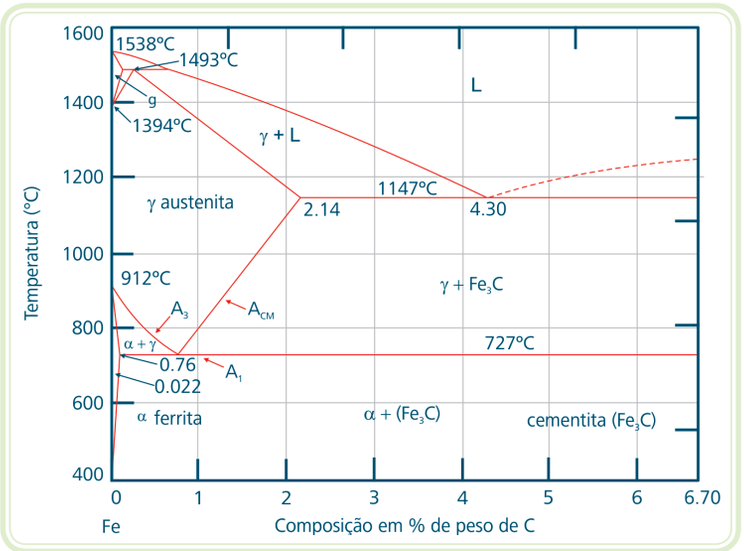


Figura 3.15: Exercício – diagrama de equilíbrio Fe-Fe_3C
Fonte: CTISM, adaptado de Callister Jr., 2008

a) Linha A_3 – abaixo desta linha começa a se formar ferrita proeutetoide.

b) A ferrita proeutetoide se apresenta em lamelas e é formada antes da ferrita eutetoide.

c) Linha A_{cm} – abaixo desta linha ainda apresenta austenita até a linha A_1.

d) Linha A_1 – abaixo desta linha não existe austenita.

e) Acima da linha A_{cm} não há cementita.

9. Assinale a alternativa correspondente às microestruturas presentes na Figura 3.16.

Figura 3.16: Exercício – microestrutura
Fonte: CTISM

a) Austenita e perlita.

b) Cementita e ferrita.

c) Cementita e perlita.

d) Ferrita e austenita.

e) Ferrita e perlita.

Aula 4 – Produção dos materiais metálicos mais comuns

Objetivos

Conhecer os processos básicos de extração de metais: pirometalurgia, hidrometalurgia e eletrometalurgia.

Conhecer o alto forno e conversores usados na produção do ferro gusa e aço.

Conhecer os processos de extração mais comuns para alumínio, zinco e cobre.

4.1 Considerações iniciais

Os materiais metálicos encontram-se na natureza, em especial na crosta terrestre, sob a forma de minérios. Poucos ocorrem em seu estado metálico puro, como o ouro e a platina. Nessa aula, veremos os processos mais comuns de obtenção de materiais metálicos como o ferro, o zinco, o cobre e o alumínio.

A maioria dos metais que utilizamos está na natureza sob a forma de minérios, que são compostos que contém o metal na forma de óxidos, sulfetos, carbonatos, silicatos, sulfatos ou cloretos.

Exemplos

Hematita (Fe_2O_3); bauxita (Al_2O_3); pirita (FeS_2); quartzo (SiO_2); calcopirita ($CuFeS_2$).

Estes compostos podem conter impurezas, que são outros minérios. Para extrair o metal de interesse dos minérios devemos processar um minério rico no composto do metal desejado. Chamamos de redução à operação para extrair um metal do seu respectivo composto. Como regra geral é necessário fornecer energia para romper as ligações químicas existente com o metal, para deixá-lo livre na forma de metal.

Assim, pode-se utilizar um dos seguintes processos, isoladamente ou em conjunto:

- Pirometalurgia.
- Hidrometalurgia.
- Eletrometalurgia.

Para todos os processos existem etapas comuns como moagem, trituração, lavagem, decantação, peneiração, etc. que dependem do processo particular e minério usado.

4.1.1 Pirometalurgia

A pirometalurgia faz uso de altas temperaturas para a redução do minério.

Por exemplo, o alto-forno usado para produção do ferro gusa trabalha em temperaturas acima de 1000°C. Nas altas temperaturas, e nas diversas reações que lá ocorrem, o oxigênio que estava ligado com o ferro, formando óxido, tem a sua ligação rompida, troca o ferro pelo carbono, formando dióxido de carbono, resultando então em ferro metálico líquido, devido à temperatura elevada.

As fases da pirometalurgia são:

- **Calcinação** – elimina produtos voláteis (gases ou líquidos) do minério.

  Exemplo
  $PbCO_{3(s)} \rightarrow PbO_{(s)} + CO_{2(g)}$

  O carbonato de chumbo se transforma em óxido de chumbo e o dióxido de carbono é liberado.

- **Ustulação** – se um minério é formado por sulfetos, é mais fácil a sua transformação em óxido para posterior processamento. Assim, os sulfetos presentes no minério são eliminados através da formação de um óxido.

  Exemplo
  $2ZnS_{(s)} + 3O_{2(g)} \rightarrow 2ZnO_{(s)} + 2SO_{2(g)}$. Agora o minério para a extração do zinco é o ZnO.

- **Fusão** – na parte final do processo, os materiais produzidos são separados, podendo aparecer o metal propriamente dito e a escória.

4.1.2 Hidrometalurgia

A hidrometalurgia compreende os processos de extração de metais de minérios usando soluções aquosas de água, ácido, base ou sal com os minérios que contém o metal de interesse, também conhecido como lixiviação. Pode ser obtido o metal nesta etapa, ou como no alumínio, o metal é obtido com outro processo posterior (eletrometalurgia). Na produção do alumínio (processo de Bayer) é usado a hidrometalurgia para extrair a alumina Al_2O_3 da bauxita, dissolvendo a bauxita inicialmente em uma solução de NaOH (hidróxido de sódio), e no final, por evaporação, obtém-se o Al_2O_3, que é base para extração do alumínio. O alumínio é depois extraído por outro processo, a eletrometalurgia, usando a alumina como matéria-prima. O agente lixiviante da bauxita é o hidróxido de sódio.

Exemplo

Obtenção do ouro a partir do íon $Au(CN)^{2-}$

$$2Au(CN)^{2}{}_{-(aq)} + Zn_{(s)} \rightarrow Zn(CN)_4{}^{2}{}_{-(aq)} + 2Au_{(s)}$$

Quadro 4.1: Reagentes em função do tipo de ligação do minério

Mineral/metal	Reagente
Óxidos	H_2SO_4
Sulfatos	H_2O, H_2SO_4
Sulfetos	$Fe_2(SO_4)_3$
Cu/Ni	NH_3,NH_4CO_3
$Al(OH)_3$	NaOH
Au/Ag	NaCN

Fonte: Adaptado de http://www.ct.ufrgs.br/ntcm/graduacao/ENG06631/Lixiviacao.pdf

4.1.3 Eletrometalurgia

A eletrometalurgia engloba os processos de redução de minerais metálicos através da eletrólise, que é reação de redução oposta àquela que ocorre numa célula galvânica, sendo necessário o uso de corrente elétrica para depositar o metal no catodo. É usado na obtenção de metais como sódio, magnésio e alumínio.

Exemplo

Obtenção do alumínio – a alumina é colocada dentro de criolita fundida Na_3AlF_6 (hexafluoraluminato de sódio), que age como fundente, em tanques

de ferro que fazem o papel de cátodo, onde o alumínio se forma, e os anodos são feitos de grafite. Assim obtém-se nos eletrodos:

anodo $C(s) + 2O^{2-}(l) \rightarrow CO_2(g) + 4^{e-}$

catodo $3e^{1-} + Al^3 + (l) \rightarrow Al(l)$ daqui sai o alumínio metálico.

4.2 Produção do ferro fundido e aço – alto-fornos

Os povos antigos obtinham o ferro de maneira artesanal, usando fornos pequenos construídos com barro, sendo o minério e o carvão colocados na parte superior do forno e na parte inferior dispunham foles para insuflar ar, tal qual um pequeno alto-forno. O vídeo referenciado ao lado, mostra a obtenção de ferro artesanalmente, com tecnologia rústica, pelos celtas antigos, usando basicamente minério de ferro e carvão vegetal como combustível, fazendo o metal ferroso vazar na base do forno. Uma vez obtido o material metálico, utensílios e armas podiam ser construídas. Segundo a Associação do Aço do Rio Grande do Sul, o ano de 1587 é a data aceita como a do nascimento da siderurgia brasileira, quando, em São Vicente, próximo à atual cidade de Sorocaba-SP, Afonso Sardinha construiu duas forjas catalãs, de onde saíram para comercialização os primeiros produtos de ferro feitos no Brasil.

Assista a um vídeo da obtenção de ferro pelos povos antigos em: https://www.youtube.com/watch?v=O-b8XhvQMBkerrocelta

Já no Rio Grande do Sul, entre os anos 1700 e 1756, o padre austríaco Antônio Sepp, na Redução Jesuítica de São João Batista, hoje município de Santo Ângelo, usando uma forja tipo catalã, que possuía um sistema de ventilação melhorado se comparado aos foles, deu início a fabricação de cravos, ferraduras e utensílios diversos. A matéria-prima usada era a pedra cupim ou pedra de itacuru, como os índios a conheciam, que tem cor avermelhada e é rica em óxido de ferro.

A obtenção do ferro e aço atualmente não é muito diferente, mudando apenas a escala de produção, sendo que o alto-forno chega até altura equivalente de um prédio de 40 andares, sendo uma atividade econômica estratégica.

Assista a um vídeo a respeito do processo de produção de aço carbono em: https://www.youtube.com/watch?v=5gt5w0g6Tz8

Para a produção do aço e do ferro fundido é necessário:

- **Minério de ferro** – no Brasil o mais comum é hematita – Fe_2O_3. Existe também a magnetita – Fe_3O_4 e a limonita – $2Fe_2O_3$ tri-hidratada.

- **Coque** – é o combustível usado na produção.

- **Calcário** – separa as impurezas, formando uma escória com baixo ponto de fusão.

Esses três componentes – minério, coque e calcário – são triturados e entram continuamente no alto-forno pela parte superior, conforme Figura 4.1. O alto-forno é um reator do tipo chaminé no qual a carga sólida é descendente e os gases redutores ascendentes. Da parte inferior do alto-forno, o ar aquecido entre 900°C e 1350°C, às vezes com adições de combustíveis líquidos, sólidos ou gasosos, é insuflado pelas ventaneiras posicionadas na parte inferior do forno. A combustão do coque previamente carregado e/ou do combustível injetado pelas ventaneiras, fornece o calor necessário ao processo e o gás para a redução dos óxidos.

O alto-forno transforma o minério de ferro, que está na forma de óxido, em ferro metálico, através de sucessivas e simultâneas reações. Estas reações fornecem energia, elevando a temperatura, e reduzem os óxidos para ferro metálico. Durante o processo é formado o óxido chamado wustita, estável só em altas temperaturas.

Assista a um vídeo sobre alto-forno em: https://www.youtube.com/watch?v=9zDa_mEI0N0

Cada óxido é necessariamente transformado obedecendo a sequência: hematita → magnetita → wustita → ferro metálico. Estas diversas reações dependem da temperatura e pressão ao longo do alto-forno. Em temperaturas abaixo de 600°C, não se forma, na sequência mostrada, a wustita.

A carga que entra no topo do alto-forno pode ser compactada em um produto único conhecido como sinter, que consiste de minério de ferro (pó) + carvão moído + calcário + água. A parte responsável pela energia do processo, o coque, são carvões fósseis como turfa e linhito, as hulhas (betuminosas e sub-betuninosas) e o antracito. Assim, o minério de ferro, coque e calcário triturados entram no alto-forno pela parte superior e encontram ar insuflado na parte inferior produzindo a reação de redução do ferro metálico.

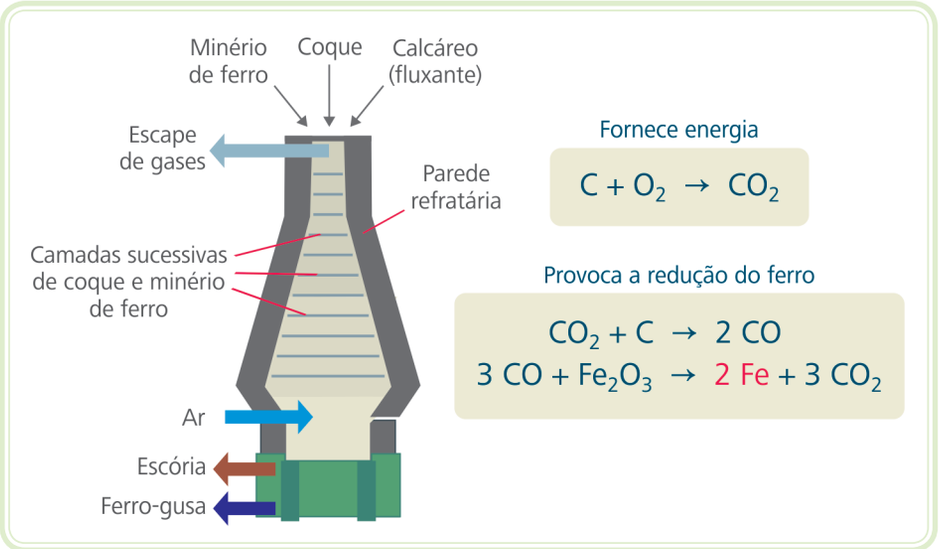


Figura 4.1: O alto-forno é um reator do tipo chaminé no qual a carga sólida é descendente e os gases redutores ascendentes, fornecendo o calor necessário ao processo e o gás para a redução dos óxidos de ferro
Fonte: CTISM

O calcário $CaCO_3$ atua como material fluxante. Como o minério de ferro e o coque metalúrgico apresentam impurezas não metálicas que devem ser separadas do metal produzido, o uso de fluxantes ou fundentes promove a aglutinação destas impurezas para a forma de uma escória de baixo ponto de fusão e que ficará separada do metal líquido produzido na base do alto-forno. Além do calcário pode ser empregada a dolomita ($CaCO_3.MgCO_3$). O alto-forno produz o ferro metálico conhecido como ferro-gusa, que é a base para fabricar o aço, possuindo um teor de carbono elevado, e impurezas como silício, manganês, fósforo e enxofre, e precisa ainda passar por um forno conversor para produzir no final o aço. O ferro-gusa é lingotado para processamento/aproveitamento posterior com ferros fundidos, ou usado ainda líquido na produção do aço. Em oficinas de fundição, o ferro fundido é obtido usando fornos de cubilô que processam o ferro-gusa com adições de silício e coque.

Assista a um vídeo a respeito do processo de produção do aço Cosipa em: https://www.youtube.com/watch?v=qr5Xlf5XOT0

4.3 Conversores

Vimos que o alto-forno é a etapa em que se obtém o ferro gusa. A composição do ferro gusa está longe da composição típica dos aços devendo ser reduzidos os teores de carbono, enxofre, fósforo, manganês entre outros para ser alcançada a condição de aço comum. Este processo é alcançado na aciaria usando fornos conversores.

Assista a um vídeo a respeito de coqueria em: https://www.youtube.com/watch?v=lPR04Zmw1Nk

Assim, a finalidade dos conversores é fazer o ajuste final do ferro gusa reduzindo os teores de carbono e de impurezas. O teor de carbono do ferro-gusa é de cerca de 5 %, e através do conversor este teor será reduzido para menos de 2 %, e o processo básico consiste na injeção de oxigênio (ou ar) dentro do ferro-gusa líquido. O primeiro tipo de forno conversor com alta produtividade foi o de Bessemer, já em desuso, que injetava ar dentro do ferro gusa líquido, popularizando o uso do aço no século 19. Atualmente existem dois processos básicos de aciaria: a base de oxigênio, usando carga líquida, através de conversores LD – (Linz-Donawitz), onde o oxigênio é injetado através de lança no interior do liquido, e a aciaria elétrica, usando carga sólida, através de fornos a arco elétrico.

Assista a um vídeo sobre a adição de elementos de liga no aço em: https://www.youtube.com/watch?v=CrqfRuACeqE

4.4 Produção de outros metais

Os processos de produção dos metais usam basicamente um dos processos: pirometalurgia, hidrometalurgia e eletrometalurgia. Vamos estudar o zinco, o cobre e o alumínio e algumas ligas.

4.4.1 Zinco

O zinco é um metal acinzentado/azulado extraído do sulfeto de zinco, ZnS, conhecido como blenda. Seu uso é em coberturas e galvanizações. São fabricadas ligas como o latão. O latão é formado por zinco e cobre (em maior quantidade). Outra liga do zinco é o Zamac, de aspecto acinzentado, composta de alumínio, cobre, e magnésio. Possui baixo ponto de fusão (400ºC) e é de fácil manuseio com resistência à corrosão razoável. Uso em processos de fundição sob pressão. Em termos de custo, sofre concorrência do alumínio.

4.4.2 Cobre

É um metal avermelhado, dúctil, que possui condutividade elétrica elevada, e boa resistência a corrosão. Sua temperatura de fusão é 1.083°C. Entre seus minérios temos a calcopirita $CuFeS_2$ a calcocita, Cu2S. É usado em condutores em geral como linhas de distribuição e transmissão, fios para máquinas elétricas. Também usado em tubulações hidráulicas e em trocadores de calor.

Assista a um vídeo a respeito da extração do cobre em: https://www.youtube.com/watch?v=Wr7zY46_jHI

Quadro 4.2: Propriedades de ligas de cobre

Liga	Designação UNS	Composição	Tratamento	Tensão limite de resistência (MPa)	Tensão de escoamento (MPa)	Alongamento (% em 50 mm)	Aplicação
Cobre eletrolítico	C11000	0,04 % O	recozido	220	69	45	Fios elétricos, rebites, telas para filtragem, gaxetas e panelas.
Cobre-berílio	C17200	1,9 % Be 0,2 % Co	endurecido p/ precipitação	1140-1310	690-860	4-10	Molas, foles, buchas e válvulas.
Latão p/ cartucho	C26000	30 % Zn	recozido	300	75	68	Radiadores, componentes de munições e acessórios de luminárias.
			trabalhado a frio	525	435	8	
Bronze fosforado	C51000	5 % Sn 0,2 % P	recozido	325	130	64	Foles, discos de embreagem, molas, eletrodos de solda.
			trabalhado a frio	560	515	10	
Cobre-níquel	C71500	30 % Ni	recozido	380	125	36	Tubulações para água salgada e componentes de trocadores de calor.
			trabalhado a frio	515	485	15	
Latão amarelo com chumbo	C85400	29 % Zn 3 % Pb 1 % Sn	fundido	234	83	35	Peças de mobiliário, acessórios de iluminação, grampos de bateria.
Bronze estanhado	C90500	10 % Sn 2 % Zn	fundido	310	155	25	Mancais, buchas, anéis de pistões, engrenagem, conexões para vapor.
Bronze com alumínio	C95400	4 % Fe 11 % Al	fundido	586	241	18	Mancais, engrenagens, roscas sem-fim, buchas, sedes de válvulas.

Fonte: Adaptado de Calliste, 2008

Para aplicações mecânicas é usado na forma de bronze, que é uma liga de cobre e estanho, usado em engrenagens, partes de máquinas, válvulas, etc. A resistência mecânica aumenta com a adição do estanho, atingindo o máximo com 18 % de Sn. Também diminui a ductibilidade (alongamento) à medida que aumenta o teor de Sn. No Quadro 4.2 temos algumas propriedades de ligas de cobre.

4.4.3 Alumínio

É um dos metais mais comuns e é obtido do minério bauxita. Possui baixa densidade, excelente condutividade elétrica e térmica (de 50 a 60 % da condutividade do cobre, resistente à corrosão atmosférica, corrosão em meio aquoso, boa ductilidade, não é ferromagnético. A sua resistência mecânica quando puro é baixa (~90 MPa), mas podem ser usados mecanismos de endurecimento:

Assista a um vídeo a respeito da obtenção do alumínio em: https://www.youtube.com/watch?v=YuTwWJmdo40

- Endurecimento por solução sólida.
- Endurecimento por dispersão de partículas.
- Encruamento.
- Endurecimento por dispersão de partículas (envelhecimento).

A baixa temperatura de fusão (660°C) do alumínio limita o seu uso. O Quadro 4.3 apresenta algumas propriedades de ligas de alumínio.

Quadro 4.3: Propriedades de ligas de alumínio

Liga	Designação UNS	Elemento adicionado	Tratamento	Tensão limite de resistência (MPa)	Tensão de escoamento (MPa)	Alongamento (% em 50 mm)	Aplicação
1100	A91100	0,12 Cu	Forjada e recozida	90	35	35-40	Trocadores de calor, refletores de luz, equipamentos para manuseio de alimentos.
3003	A93003	0,12 Cu 1,2 Mn 0,1 Zn	Forjada e recozida	110	40	30-40	Utensílios de cozinha, vasos de pressão e tubulação.
5052	A95052	2,5 Mg 0,25 Cr	Forjada e encruada	230	195	12-18.	Linhas de combustível em aeronaves, tanques de combustível, rebites e arames.
2024	A92024	4,4 Cu 1,5 Mg 0,6 Mn	Forjada e tratada termicamente T4	470	325	20	Estruturas de aeronaves, rebites, rodas de caminhão.
6061	A96061	1,0 Mg 0,6 Si 0,3 Cu 0,2 Cr	Forjada e tratada termicamente T4	240	145	22-25	Caminhões, canoas, vagões de trem, mobília, tubulações.

Liga	Designação UNS	Elemento adicionado	Tratamento	Tensão limite de resistência (MPa)	Tensão de escoamento (MPa)	Alongamento (% em 50 mm)	Aplicação
7075	A97075	5,6 Zn 2,5 Mg 1,6 Cu 0,23 Cr	Forjada e tratada termicamente T6	570	505	11	Peças de estruturas de aeronaves e peças que sofrem tensão elevada.
295	A02950	4,5 Cu 1,1 Si	Fundida e tratada termicamente T4	221	110	8,5	Alojamento de polias, volantes, rodas de ônibus e aeronaves, cárter.
356	A03560	7,0 Si 0,3 Mg	Fundida e tratada termicamente T6	228	164	3,5	Peças de bombas de aeronaves, caixas de transmissão automotiva, blocos de cilindros resfriados à agua.

Fonte: Adaptado de Callister Jr., 2008

Resumo

Nessa aula, podemos verificar que a redução é a fase em que se obtém um metal a partir de minérios e pode ser através de processos de pirometalurgia, hidrometalurgia e eletrometalurgia. O ferro é obtido de minérios, sendo a hematita o mais comum no Brasil, utilizando o alto-forno, que é um processo pirometalúrgico. O produto obtido no alto-forno é o ferro-gusa, que é a base para fabricação do aço e dos ferros fundidos. O aço é obtido em um forno tipo conversor, onde o carbono é consumido e fica em níveis menores de 2 %. Também são acrescentados elementos de liga ao aço, obtendo-se, por exemplo, os aços inoxidáveis, e outros.

Outro metal comum é o zinco, que junto com o cobre, forma o latão, e é usado na galvanização de aços para proteção contra a corrosão. Também o cobre, principalmente na forma de bronze, com adições de estanho, apresenta inúmeras aplicações mecânicas, possuindo resistência a corrosão.

O alumínio pode atingir também resistências elevadas quando ligado e tratado termicamente, possui baixa densidade.

Atividades de aprendizagem

1. Complete corretamente a frase abaixo de acordo com as alternativas propostas:

Para a produção do aço e do ferro fundido é necessário: _____, sendo a _____ o mais comum. O _____ combustível usado na produção e o _____ responsável pela separação das impurezas, formando uma escória com baixo ponto de fusão.

a) minério de aço – hematita – calcário – coque

b) minério de aço – magnetita – coque – calcário

c) minério de ferro – hematita – coque – calcário

d) minério de ferro – limonita – coque – calcário

e) minério de ferro – magnetita – calcário – coque

2. Complete corretamente a frase abaixo de acordo com as alternativas propostas:

O _____ produz o ferro metálico conhecido como ferro-gusa, que é a base para fabricação do aço, possuindo um teor de carbono _____, e impurezas como silício, _____, fósforo e enxofre.

a) alto-forno – elevado – carbono

b) alto-forno – elevado – manganês

c) alto-forno – reduzido – magnésio

d) conversor – elevado – carbono

e) conversor – reduzido – carbono

3. Faça a relação dos diversos processos de extração de metais.

(A) Eletrometalurgia.

(B) Hidrometalurgia.

(C) Pirometalurgia.

( ) Faz uso de altas temperaturas para a redução do minério.

( ) Compreende os processos de extração de metais de minérios usando soluções aquosas de água, ácido, base ou sal com os minérios que contém o metal de interesse, também conhecido como lixiviação.

( ) Engloba os processos de redução de minerais metálicos através da eletrólise.

a) A – B – C.

b) A – C – B.

c) B – A – C.

d) C – A – B.

e) C – B – A.

4. Marque (V) para verdadeiro e (F) para falso para as afirmativas a seguir e assinale a alternativa que contém a sequência correta.

( ) A finalidade dos conversores é fazer o ajuste final do ferro gusa reduzindo os teores de carbono e de impurezas.

( ) Em oficina de fundição, o ferro fundido é obtido usando fornos de cubilô que processam o ferro gusa com adições de enxofre e coque.

( ) Da parte inferior do alto-forno, o ar aquecido entre 700°C e 1150°C, as vezes com adições de combustíveis líquidos, sólidos ou gasosos, é insuflado pelas ventaneiras.

( ) A carga que entra no topo do alto-forno pode ser compactada em um produto único conhecido como sinter, que consiste de minério de ferro (pó) + carvão moído + calcário + água.

a) V – V – V – F.

b) V – F – F – V.

c) V – F – F – F.

d) F – V – V – V.

e) F – V – F – V.

5. Assinale a alternativa correta em relação ao minério de ferro, coque e calcário triturados:

a) Entram no alto-forno pela parte inferior e encontram ar insuflado na parte superior produzindo a reação de redução do ferro metálico.

b) Saem do conversor pela parte superior e encontram ar insuflado na parte inferior produzindo a reação de redução do ferro metálico.

c) Entram no conversor pela parte superior e encontram ar insuflado na parte inferior produzindo a reação de redução do ferro metálico.

d) Entram no alto-forno pela parte superior e encontram ar insuflado na parte inferior produzindo a reação de redução do ferro metálico.

e) Saem no alto-forno pela parte inferior e encontram ar insuflado na parte superior produzindo a reação de redução do ferro metálico.

6. Marque (V) para verdadeiro e (F) para falso para as afirmativas a seguir e assinale a alternativa que contém a sequência correta:

( ) A finalidade dos alto-fornos é fazer o ajuste final do ferro gusa reduzindo os teores de carbono e de impurezas.

( ) O teor de carbono do ferro gusa é de cerca de 2 %, e através do conversor este teor será reduzido para menos de 0,5 %, e o processo básico é injeção de oxigênio (ou ar) dentro do ferro gusa líquido.

( ) O primeiro forno conversor com alta produtividade foi o tipo Bessemer, já em desuso, que injetava ar dentro do ferro gusa líquido.

a) V – F – V.

b) V – F – F.

c) F – V – V.

d) F – V – F.

e) F – F – V.

7. Em relação ao cobre, assinale a alternativa **incorreta**.

a) É um metal avermelhado, dúctil, que possui condutividade elétrica elevada, e boa resistência a corrosão.

b) Sua temperatura de fusão é 1.283°C.

c) Entre seus minérios temos a calcopirita.

d) É usado em condutores em geral como linhas de distribuição e transmissão, fios para máquinas elétricas.

e) Também usado em tubulações hidráulicas e em trocadores de calor.

Aula 5 – Elementos de liga dos aços

Objetivos

Conhecer a classificação dos aços, ferros fundidos e alumínio.

Conhecer o efeito de cada liga nas propriedades do aço ou alumínio.

Conhecer os tipos de aços inoxidáveis e aplicações.

5.1 Considerações iniciais

Os metais que estudamos até agora foram considerados puros ou em sistemas binários, ou seja, o metal e outro componente, como o aço, formado por ferro e carbono. Se adicionarmos outro componente, metálico ou não, formaremos um material ligado, que apresentará melhoria de suas propriedades em relação ao não-ligado. O carbono e nitrogênio formam carbetos (carbonetos) e nitretos, respectivamente, extremamente duros. Abordaremos os aços e ferros fundidos e as suas ligas usadas em diversas aplicações e veremos a sua classificação; também os aços inoxidáveis são uma categoria de elementos de liga resistentes à corrosão e trabalham em altas temperaturas com considerável resistência mecânica. Também, veremos a classificação das ligas de alumínio, cuja designação e resistência dependerão dos elementos constituintes e tratamentos térmicos, originando as ligas aeronáuticas e duralumínio.

5.2 Tipos de aços

O aço é composto basicamente de ferro com o percentual de carbono variando de 0,022 % até cerca de 2 %. Também pode apresentar pequenas quantidades de impurezas resultantes do processo de fabricação. Além do ferro e do carbono, o aço pode conter adições de elementos de liga. O aço também é disponibilizado em chapas, tarugos, blocos, lâminas que são obtidas por processo de conformação a quente ou a frio. Assim, podem existir inúmeras formas de classificar o aço, em função do teor de carbono, dos elementos de liga, do processo de fabricação, sendo que algumas classificações são restritas a um país ou empresa siderúrgicas. Uma classificação básica dos aços advém do diagrama de equilíbrio, tendo como referência o ponto eutetoide, conforme Quadro 5.1.

Quadro 5.1: Aços hipoeutetoide, eutetoide e hipereutetoide		
Aço	**% de C**	**Microestrutura**
Hipoeutetoide	< 0,76	Ferrita + perlita
Eutetoide	0,76	Perlita
Hipereutetoide	> 0,76 até 2	Perlita + cementita

Fonte: Adaptado Callister Jr., 2008

Os chamados aços "damasco" são produzidos com partes de aço hipereutético e partes de aço hipoeutético, que são entrelaçadas entre si e forjadas simultaneamente, formando um material que apresenta visualmente, a olho nu, um perfil característico, tipo "tigrado", resultado das duas partes de aço forjadas no estado sólido. Mecanicamente, é unida a dureza do aço hipereutetoide com a flexibilidade do aço hipoeutetoide. Na antiguidade eram usados em espadas, e atualmente são populares em facas e espadas para colecionadores.

Outra classificação básica dos aços é em função do teor de carbono, conforme Quadro 5.2; quanto maior o seu teor, mais duro será o material.

Quadro 5.2: Aços em função do teor de carbono	
Aço	**% C**
Extra-doce	≤ 0,15
Meio-doce	0,15 < C ≤ 0,30
Meio-duro	0,30 < C ≤ 0,60
Duro	0,60 < C ≤ 0,70
Extra-duro	0,70 < C ≤ 2,10

Fonte: Adaptado Chiaverini, 1996

Podemos ter uma ideia comparativa do teor de carbono de um aço, observando o espalhamento da fagulha produzida pelo esmerilhamento em um rebolo. Quando maior for o teor de carbono, mais aberto fica o espalhamento da fagulha, conforme Figura 5.1.

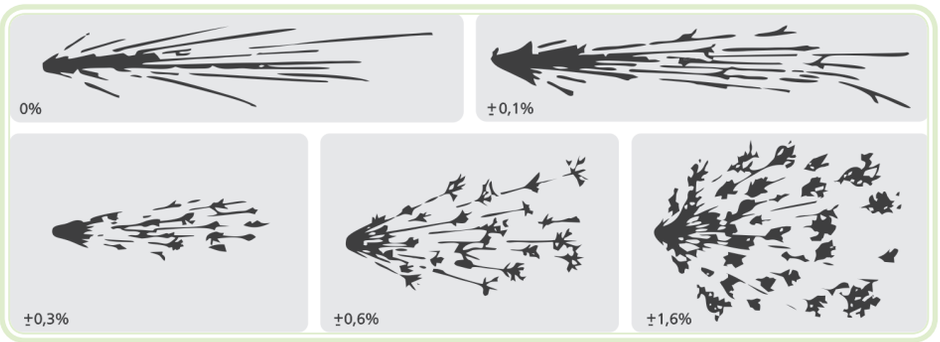


Figura 5.1: Aspecto da fagulha em aços de diferentes teores de carbono
Fonte: CTISM, adaptado de ArcelorMittal, 2013

O teor de carbono influi na soldabilidade, e quanto mais baixo for mais favorável é a solda. Alguns elementos de liga presentes no aço influem no chamado carbono equivalente Ceq dado por:

$$\%Ceq = \frac{\%C + \%Mn}{6} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} + \frac{\%Ni + \%Cu}{15}$$

Quando o % Ceq for menor que 0,55, o material apresenta boa soldabilidade. O tipo de microestrutura apresentada pelo aço também origina as designações:

- **Aço encruado** – tem grãos alongados devido trabalho a frio. Geralmente tem baixo teor de carbono abaixo de 0,4 %.

- **Aço ferrítico** – é um aço hipoeutetoide, esfriado lentamente, com predomínio da ferrita.

- **Aço perlítico** – aço com 100 % de perlita.

- **Aço austenítico** – apresenta, à temperatura ambiente, a austenita, que é não magnética e dúctil.

- **Aço martensítico** – são aços que podem ser temperados, ficando assim duros.

- **Aço bainítico** – são aços mais tenazes que os martensíticos, sendo produzidos a partir do mesmo aço dos martensíticos, porém sofrem tratamento térmico de austêmpera.

- **Aço duplex** – são aços hipoeutetoides com ferrita e martensita, possuindo ductibilidade aliada com resistência mecânica.

- **Aço precipitado** – alguns aços inoxidáveis produzem uma fase precipitada, que confere uma resistência mecânica excepcional.

Na Figura 5.2, temos um esquema de classificação das ligas ferrosas. Elas possuem dois grandes grupos: ferros fundidos e aços. Para os aços temos os aços de alta liga e baixa liga, resultando para os aços comuns de baixo, médio e alto carbono. Os ferros fundidos são constituídos basicamente pelos cinzentos, brancos, nodular, maleável e de grafite compactada. Aço de alta liga possui mais de 10 % de elemento; aço de baixa liga apresenta a soma de todas as ligas inferior a 5 %. Entre 5 % e 10 %, diz-se que é de média liga.

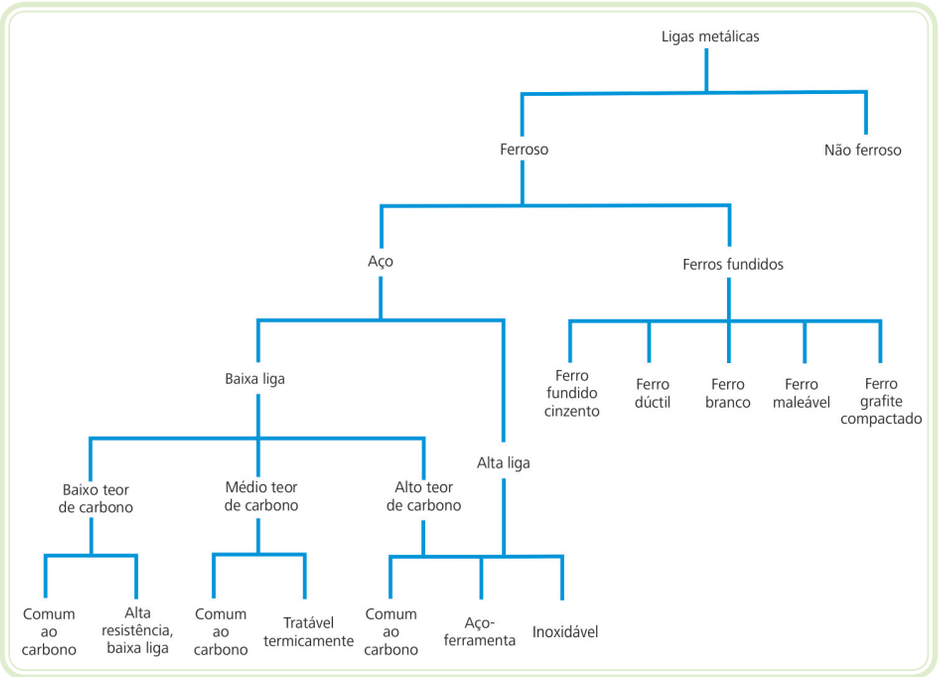


Figura 5.2: Tipos de aços e ferros fundidos em função do teor de carbono e ligas
Fonte: CTISM, adaptado de Callister Jr., 2008

A seguir veremos a classificação segundo normas dos aços e dos ferros fundidos.

5.2.1 Classificação dos aços

Vamos ver agora o significado da codificação do aço. Uma das classificações mais comum dos aços é quanto à composição química, adotada também no Brasil pela ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, é a SAE – *Society of Automotive Engineers*, que é seguida pela AISI – *American Iron and Steel Institute*. Para especificar um aço, usa-se o símbolo da instituição normalizadora seguida por um código que contém a quantidade de carbono e dos elementos de liga.

Por exemplo, um aço sem liga, com 0,4 % de carbono, pode ser representado por:

ABNT 1040, AISI 1040 ou SAE 1040, conforme Quadro 5.3.

A seguir temos a decodificação desta classificação (Quadro 5.3), considerando a composição química:

SAE XXXX
Uma sigla e quatro algarismos
SAE – "sigla" da instituição normalizadora.
1º algarismo – indica o "tipo" de aço.
2º algarismo – indica o "grupo" dentro do tipo.
3º e 4º algarismos – indicam o "percentual médio" de carbono.

1º algarismo – tipo de aço

Tipo de aço designação

1 – aço carbono (sem metal de liga).
2 – aço níquel.
3 – aço níquel-cromo.
4 – aço molibdênio.
5 – aço cromo.
6 – aço cromo-vanádio.
7 – aço tungstênio-cromo.
8 – aço níquel-cromo-molibdênio.
9 – aço silício-manganês.

2º algarismo – grupo dentro do tipo

Quando for formada por um elemento de liga, geralmente indica a percentagem aproximada deste elemento. Nas ligas com dois elementos de liga, algumas vezes, indica a percentagem aproximada do elemento predominante na liga.

3º e 4º algarismo – percentagem média de carbono

Os dois últimos algarismos XX indicam sempre a percentagem média de carbono no aço, em centésimo percentual.

Exemplo

Aço SAE 1020 – o terceiro e quarto dígito são 2 e 0, respectivamente. Então o teor de carbono é 0,20 %.

Quadro 5.3: Classificação dos aços em função dos elementos de liga

Código SAE ABNT, AISI	Descrição ou principais elementos de liga
10xx	Aços-carbono de uso geral.
11xx	Aços de fácil usinagem, com enxofre.
13xx	Manganês (1,75 %).
15xx	Manganês (1,00 %).
23xx	Níquel (3,50 %).
25xx	Níquel (5,00 %).
31xx	Níquel (1,25 %), cromo (0,65 %).
33xx	Níquel (3,50 %), cromo (1,55 %).
40xx	Molibdênio (0,25 %).
41xx	Cromo (0,50 ou 0,95 %), molibdênio (0,12 ou 0,20 %).
43xx	Níquel (1,80 %), cromo (0,50 ou 0,80 %), molibdênio (0,25 %).
46xx	Níquel (1,55 ou 1,80 %), molibdênio (0,20 ou 0,25 %).
47xx	Níquel (1,05 %), cromo (0,45 %), molibdênio (0,25 %).
48xx	Níquel (3,50 %), molibdênio (0,25 %).
50xx	Cromo (0,28 ou 0,40 %).

Código SAE ABNT, AISI	Descrição ou principais elementos de liga
51xx	Cromo (0,80, 0,90, 0,95, 1,00 ou 1,05 %).
61xx	Cromo (0,80 ou 0,95 %), vanádio (0,10 ou 0,15 %).
86xx	Níquel (0,55 %), cromo (0,50 ou 0,65 %), molibdênio (0,20 %).
87xx	Níquel (0,55 %), cromo (0,50 %), molibdênio (0,25 %).
92xx	Manganês (0,85 %), silício (2,00 %).
93xx	Níquel (3,25 %), cromo (1,20 %), molibdênio (0,12 %).
94xx	Manganês (1,00 %), níquel (0,45 %), cromo (0,40 %), molibdênio (0,12 %).
97xx	Níquel (0,55 %), cromo (0,17 %), molibdênio (0,20 %).
98xx	Níquel (1,00 %), cromo (0,80 %), molibdênio (0,25 %).
xxBxx	Aço com boro.
xxLxx	Aço com chumbo (facilita a usinagem).

Fonte: Adaptado Callister Jr., 2008

Exemplos

Aço SAE 1035

1 – caracteriza aço carbono.

0 – sem elemento de liga além da combinação ferro e carbono.

35 – corresponde a uma percentagem média de 0,35 % de carbono na liga.

Aço SAE 5140

5 – caracteriza aço cromo.

1 – percentagem aproximada de cromo na liga – 1 % de Cr.

40 – percentagem média de 0,40 % de C.

Aço SAE 8630

8 – caracteriza aço níquel-cromo-molibdênio.

6 – caracteriza a combinação em determinadas percentagens dos três elementos de liga, cujos valores médios estão especificados nas respectivas tabelas de composição química.

30 – percentagem média de 0,30 % de C.

Aço SAE 51100

5 – caracteriza aço cromo.

1 – percentagem aproximada de cromo na liga – 1 % de Cr.

100 – percentagem média de 1 % de C.

Para a designação de materiais existem diversos órgãos normalizadores, além do SAE e AISI, temos a ASTM (Sociedade Americana de Ensaios e Materiais), a ASME (Sociedade Americana de Engenheiros Mecânicos), a DIN (*Deutsches Institut für Normung*), a JIS (*Japanese Industrial Standards*), a AFNOR (*Association*

Française de Normalisation) e a ABNT no Brasil. Para converter a designação de um aço conforme determinada norma para outra norma, ou seja, achar o seu equivalente, deve-se avaliar principalmente as propriedades mecânicas e a composição química. Nem sempre é possível fazer uma correspondência exata entre as normas, sendo mantida a classificação original.

A ASTM possui uma classificação de aços estruturais formados pela letra "A", seguida por dois, três ou quatro dígitos. A característica dos aços estruturais é de baixo teor de carbono e ductibilidade razoável. Como exemplo, tem-se o aço A36, fornecido em barras, chapas, ou perfis, usados na construção civil, para construção de prédios ou estruturas. A tensão de escoamento mínima é 250 MPa, a tensão limite de ruptura fica entre 400 e 550 MPa. O alongamento vale 23 % (em 50 mm) para placas e barras, e 21 % para perfis. O teor de carbono varia entre 0,25 % e 0,29 % e varia, sendo maior nas peças maiores e nas placas – admitido entre 0,8 % e 1,25 % de manganês. No Quadro 5.4 temos alguns aços e suas propriedades mecânicas.

Quadro 5.4: Propriedades mecânicas de alguns aços

SAE ABNT ANSI ou ASTM	Obs.	Tensão limite de resistência (MPa)	Tensão de escoamento (MPa)	Alongamento (% em 50 mm)	Aplicação
1010	Baixo C	325	180	28	Pregos, arames e painéis de automóveis.
1020	Baixo C	380	205	25	Tubos, aço estrutural e chapas.
A36	Baixo C	400	220	23	Estrutural na construção de pontes e edificações.
A656 classe 1	Aço ARBL	655	552	15	Chassis de caminhão e vagões de trem.
1040	Médio	605-780	430-585	33-19	Virabrequins e parafusos.
1080	Alto C	800-1310	480-980	24-13	Martelos e talhadeiras.
1095	Alto C	760-1280	510-830	26-10	Facas e lâminas de serra.
4063	Aço ligado	786-2380	710-1770	24-4	Molas e ferramentas manuais.
4340	Aço ligado	980-1960	895-1570	21-11	Buchas, tubulações e aeronaves.
6150	Aço ligado	815-2170	745-1860	22-7	Eixos, pistões e engrenagens.

Fonte: Adaptado Callister Jr., 2008

Para unificar os diversos sistemas de classificação química dos materiais e aços em especial, é cada vez mais comum o uso da classificação UNS (*Unified Numbering System*), cuja codificação começa com A: A00001 a A99999,

englobando alumínio e suas ligas, de Z00001 a Z99999, envolvendo zinco e suas ligas, conforme Quadro 5.5.

Quadro 5.5: Classificação dos materiais UNS (*Unified Numbering System*)

UNS (séries)	Metal
A00001 a A99999	Alumínio e suas ligas.
C00001 a C99999	Cobre e suas ligas.
D00001 a D99999	Aços com propriedades mecânicas específicas.
E00001 a E99999	Terras raras e ligas.
F00001 a F99999	Ferros fundidos.
G00001 a G99999	Engloba classificação AISI e SAE para aços e ligas.
H00001 a H99999	Aços de alta resistência AISI e SAE.
J00001 a J99999	Aços fundidos.
K00001 a K99999	Miscelânea de aços e ferros.
L00001 a L99999	Metais e ligas de baixo ponto de fusão.
M00001 a M99999	Miscelânea de metais e ligas não ferrosas.
N00001 a N99999	Níquel e ligas.
P00001 a P99999	Metais preciosos e ligas.
R00001 a R99999	Metais e ligas resistentes ao calor.
S00001 a S99999	Aços inoxidáveis.
T00001 a T99999	Aços ferramentas.
W00001 a W99999	Metal para solda.
Z00001 a Z99999	Zinco e suas ligas.

Fonte: Adaptado de Callister Jr., 2008

Observe que na classificação UNS, a designação SAE/ANSI antes vista, é mantida fazendo a adição da letra G no início e zero (0), no final. Assim o aço SAE 1045, no sistema UNS é designado por: UNS G10450.

5.2.2 Aços ferramenta

Refere-se a um grupo de aço com propriedades adequadas para construir ferramentas que são usadas para fabricar peças e utensílios. Assim, os aços ferramentas são aços de alta liga, que podem ser tratados termicamente, para uso em ferramentas de corte, matrizes e moldes, ou seja processos que envolvem corte, estampagem, embutimento, forjamento, extrusão ou laminação, pois possuem elevada resistência, dureza, dureza a quente, resistência ao desgaste, tenacidade, e resistência ao choque.

Os aços ferramentas são classificados segundo a AISI nos tipos:

T, M – aços rápidos – ferramentas de corte em equipamentos de usinagem.

H – trabalho a quente – matrizes para trabalho a quente para forjamento, extrusão e fundição em moldes.

D – trabalho a frio – matrizes para trabalho a frio de conformação de chapas, extrusão e forjamento a frio.

W – resfriados em água – alto carbono baixa liga.

S – resistentes ao choque – aplicações de elevada tenacidade na conformação e dobramento de chapas.

P – aços para moldes – moldes para plásticos e borrachas.

No Quadro 5.6 temos a composição química dos aços ferramentas.

Quadro 5.6: Composição química dos aços ferramentas

Designação AISI	Designação UNS	Composição %					
		C	Cr	Ni	Mo	W	V
M1	T11301	0,85	3,75	0,30 max	8,70	1,75	1,20
A2	T30102	1	5,15	0,30 max	1,15	—	0,35
D2	T30402	1,50	12	0,30 max	0,95	—	1,10 max
O1	T31501	0,95	0,50	0,30 max	—	0,50	0,30 max
S1	T41901	0,50	1,40	0,30 max	0,50 max	2,25	0,25
W1	T72301	1,10	0,15 max	0,20 max	0,10 max	0,15 max	0,10 max

Fonte: Adaptado de Callister Jr., 2008

Atualmente está bastante difundido o uso na indústria automobilística de aços tipo HLSA (*High Strength Low Alloy*) ou ARBL – de Alta Resistência e Baixa Liga caracterizados pelo baixo carbono e baixa liga, e possuem resistência, alongamento e tenacidade razoavelmente altos, de boa soldabilidade e conformação a frio. Podem usar menor espessura com consequente redução de peso. Os aços ARBL possuem alta resistência ao escoamento e baixa temperatura de transição ao impacto, ou seja, apresentam comportamento dúctil em temperaturas mais baixas.

Para saber mais sobre aços ARBL, acesse: http://www.infomet.com.br/acos-e-ligas-conteudo-ler.php?cod_tema=9&cod_secao=10&cod_assunto=117&cod_conteudo=199

5.3 Efeitos dos elementos de liga nas ligas ferrosas

Em um material ferroso, aço ou ferro fundido, além dos elementos básicos Fe e C, teremos elementos adicionais, resultantes do processo de fabricação, impurezas ou elementos de liga.

Elementos resultantes da elaboração – Mn, Si, Al, Ti.

Impurezas – Sn, Pb, S, Cu.

Elementos de liga – Al, Pb, Co, Cu, Cr, S, P, Mn, Mo, Ni, Si, W e V.

5.3.1 Efeitos dos elementos de liga

- **Alumínio (Al)** – é usado em pequenas quantidades, age como desoxidante e agente de controle do crescimento dos grãos.

- **Chumbo (Pb)** – não se liga ao aço mas, quando adicionado, distribui-se na estrutura em forma de partículas microscópicas. Melhora a usinagem.

- **Cobalto (Co)** – aumenta a dureza do aço sob altas temperaturas.

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

- **Cromo (Cr)** – melhora a resistência à corrosão (aço com cerca de 12 % Cr é conhecido como aço inoxidável), a resistência à tração aumenta em média 80 MPa para cada 1 % de cromo; facilita a têmpera, aumenta a resistência às altas temperaturas e ao desgaste.

- **Enxofre (S)** – na maioria dos casos é um elemento indesejável, oriundo do processo de produção. Se combinado com o ferro na forma de sulfeto, deixa o aço quebradiço. Combinado com o manganês na forma do respectivo sulfeto, favorece a usinagem com a formação de cavacos que se quebram facilmente.

- **Fósforo (P)** – é considerado um elemento prejudicial, resultante do processo de produção. Torna o aço frágil, efeito que se acentua com o aumento do teor de carbono.

- **Manganês (Mn)** – para cada 1 % de manganês, a resistência à tração aumenta cerca de 100 MPa. Para aços temperáveis, aumenta a dureza após o processo de têmpera.

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

- **Níquel (Ni)** – em média, para cada 1 % de níquel, a resistência à tração aumenta 40 MPa, mas o limite de elasticidade é mais favorecido. Melhora significativamente a capacidade de têmpera, possibilitando redução da velocidade de resfriamento. Em teores acima de 25 % torna o aço austenítico em temperatura ambiente e é não magnético e bastante resistente à corrosão. Em conjunto com o cromo, o aço pode ser austenítico com a combinação 18 % Cr e 8 % Ni.

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

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

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

Na Figura 5.3 é visto um comparativo dos efeitos dos elementos de liga nas propriedades dos aços.

Elementos de liga	Propriedades mecânicas																Propriedades magnéticas				
	Dureza	Resistência	Linha de escoamento	Alongamento	Redução de área	Resistência a choque	Elasticidade	Res. mec. a temp. elevada	Velocidade de resfriamento	Formação de carbonetos	Resistência ao desgaste	Forjabilidade	Usinabilidade	Oxidação superficial	Nitretação	Resistência a corrosão	Histerese	Permeabilidade	Coercitividade	Magnetismo remanescente	Perda no ferro (Watt)
Silício	↑	↑	↑↑	↓	—	↓	↑↑↑	↑	↓	↓	↓↓↓	↓	↓	↓	↓	—	↓↓	↑↑	↓↓	—	↓↓
Manganês em aços perlíticos	↑	↑	↑	—	—	—	↑	—	↓	—	↓↓	↑	↓	—	—	—					
Manganês em aços austeníticos	↓↓↓	↑	↓	↑↑↑	—	—	—	—	↓↓	—	—	↓↓↓	↓↓↓	↓↓	—	—	Não magnético				
Cromo	↑↑	↑↑	↑↑	↓	↓	↓	↑	↑	↓↓↓	↑↑	↑	↓	—	↓↓↓	↑↑	↑↑↑			↑	↑↑	
Níquel em aços perlíticos	↑	↑	↑	—	—	—	—	↑	↓↓	—	↓↓	↓	↓	↓	—	—			↑↑	↑↑	
Níquel em aços austeníticos	↓↓	↑	↓	↑↑↑	↑↑	↑↑↑	—	↑↑↑	↓↓	—	—	↓↓↓	↓↓↓	↓↓	—	↑↑	Não magnético				
Alumínio	—	—	—	—	↓	↓	—	—	—	—	—	↓↓	—	↓↓	↑↑↑	—			↑↑	↑↑	
Tungstênio	↑	↑	↑	↓	↓	—	—	↑↑↑	↓↓	↑↑	↑↑↑	↓↓	↓↓	↓↓	↑	—			↑↑↑	↑↑↑	
Venádio	↑	↑	↑	—	—	↑	↑	↑↑	↓↓	↑↑↑	↑↑	↑	—	↓	↑	↑					
Cobalto	↑	↑	↑	↓	↓	↓	—	↑↑	↑↑	—	↑↑↑	↓	—	↓	—	—			↑↑↑	↑↑↑	
Molibdênio	↑	↑	↑	↓	↓	↑	—	↑↑	↓↓	↑↑↑	↑↑	↓	↓	↑↑	↑↑	—			↑		
Cobre	↑	↑	↑↑	—	—	—	—	↑	—	—	—	↓↓↓	—	—	—	↑					
Enxofre	—	—	—	↓	↓	↓	—	—	—	—	—	↓↓↓	↑↑↑	—	—	↓					
Fósforo	↑	↑	↑	↓	↓	↓↓↓	—	—	—	—	—	↓	↑↑	—	—	—					

Aumenta ↑ Diminui ↓ Constante — Não característico — Diversas flechas = efeito + pronunciado

Figura 5.3: Comparativo dos efeitos dos elementos de liga nas propriedades dos aços
Fonte: CTISM, adaptado de http://brasil.arcelormittal.com/pdf/quem-somos/guia-aco.pdf

5.4 Aços inoxidáveis

São caracterizados por apresentar ótima resistência à corrosão e resistência mecânica. No Quadro 5.7, temos suas codificações, tipos e aplicações típicas: ferríticos, martensíticos, austeníticos, duplex e endurecidos por precipitação.

Quadro 5.7: Aços inoxidáveis e suas aplicações

	AISI	ASTM UNS	*Aperam South American*	Aplicações
Austeníticos	301	S30100	P301A	Utilizado para fins estruturais, em equipamentos para indústrias alimentícia, aeronáutica, ferroviária e fabricação de facas e lâminas, pias e cubas, frisos; na caldeiraria e na estampagem geral e profunda.
	301LN	S30153	P301F	Indústria ferroviária: trens e metrô para transporte de passageiros.
	304	S30400	P304A	Construção civil e arquitetura; equipamentos para indústrias aeronáutica, ferroviária, naval, frigorífica, hospitalar, alimentícia, de laticínios, farmacêutica, cosmética, química; utensílios domésticos, instalações criogênicas, petroquímica, de papel e celulose, têxtil, destilarias, destilaria de etanol, fotografias, tubos e tanques em geral, estampagem geral, profunda e de precisão.
	304	S30400	P304T P304N(1)	Equipamentos para indústrias aeronáutica, ferroviária, naval, petroquímica, de papel e celulose, têxtil, frigorífica, hospitalar, alimentícia, de laticínios, farmacêutica, cosmética, química; utensílios domésticos, instalações criogênicas, destilarias, fotografias, tubos e tanques em geral, estampagem geral, profunda e de precisão.

	AISI	ASTM UNS	*Aperam South American*	Aplicações
Austeníticos	304L	S30403	P304C/D	Equipamentos para indústrias aeronáutica, ferroviária, naval, petroquímica, de papel e celulose, têxtil, frigorífica, hospitalar, alimentícia, de laticínios, farmacêutica, cosmética, química; utensílios domésticos, instalações criogênicas, destilarias, fotografias, tubos e tanques em geral, estampagem geral e profunda.
	304H	S30409	P304H	Equipamentos para indústrias petroquímica, de papel e celulose, têxtil, frigorífica, hospitalar, alimentícia, de laticínios, farmacêutica, cosmética, química; instalações criogênicas, destilarias, fotografias, tubos e tanques em geral. Equipamentos em que exige-se maior resistência em altas temperaturas aliadas a maiores exigências de soldabilidade.
	310S	S31008	P310A 310S S31008	Indústria de tratamento térmico para partes de forno, tais como suporte de refratários, partes dos queimadores, correias transportadoras, forração de forno, ventiladores, ganchos de tubos, etc. Na indústria alimentícia, são usados em contato com o ácido cítrico e ácido acético aquecidos.
	316	S31600	P316B	Construção civil e arquitetura; equipamentos para indústrias aeronáutica, ferroviária, naval, química e petroquímica, farmacêutica, cosmética, têxtil, de borracha, de tintas, de laticínios, hospitalar; mineração e siderurgia; refrigeração, refinarias, fabricação de tubos e vasos de pressão, destilarias de álcool, destilarias de etanol e caldeiraria.
	316L	S31603	P316B 316L S31603 P316B	Construção civil e arquitetura; equipamentos para indústrias aeronáutica, ferroviária, naval, química e petroquímica, farmacêutica, cosmética, têxtil de borracha, de tintas, de laticínios, hospitalar; mineração e siderurgia; refrigeração, refinarias, fabricação de tubos e vasos de pressão, destilarias de álcool, destilarias de etanol e caldeiraria.
	317L	S31703	P317A	Indústrias química e petroquímica, indústrias produtoras de papel e celulose; como condensadores em estações geradoras de energia à base de combustível fóssil e nuclear.
	321	S32100	P321A	Componentes termorresistentes em indústria elétrica, componentes soldados, indústria alimentícia, tubos e tanques em geral.
	347/ 347H	S34709	P347A	Equipamentos para indústria aeronáutica, como anéis coletores de turbinas e sistemas de exaustão, juntas de expansão e também para equipamentos de processos químicos em alta temperatura. Também encontra aplicação na indústria petrolífera, especialmente durante o refino, em forma de tubos, conexões ou chapas planas.
Ferríticos	-	-	K03	Transportes: carros ferroviários, vagões, ônibus; usinas de açúcar e álcool: coletores de bagaço, lateral das mesas alimentadoras, piso e lateral de mesas intermediárias, condutores de cana, *Shut Donelly*, difusores, coletores de caldo; prédios, mobiliários urbanos, vigas para pontes, etc.
	409	S40910	K09	Sistemas de exaustão de gases em motores de explosão e estampagem em geral, além de caixas de capacitores.
	430	S43000	K30	Construção civil e arquitetura; utensílios domésticos (baixelas, pias e talheres), eletrodomésticos (fogões, geladeiras, fornos de micro-ondas e lavadoras), cunhagem de moedas, balcões frigoríficos e estampagem em geral.
	-	S43000	K30MD(2)	Utensílios domésticos (baixelas, pias e talheres), cunhagem de moedas, balcões frigoríficos, estampagem geral e profunda.

	AISI	ASTM UNS	*Aperam South American*	Aplicações
Ferríticos	-	S43932	K39MD	Construção civil e arquitetura; usinas de açúcar, sistemas de exaustão (tubos silenciosos), eletrodomésticos (máquinas de lavar roupas, fogões, fornos de micro-ondas) e estampagem geral.
	-	-	K41	Sistema de exaustão (tubos e planos), estampagem (corpo catalisador, silencioso, etc.).
	-	S44400	k44	Construção civil e arquitetura; usinas de açúcar, caixas d'água, aquecedores residenciais de água, aplicações em indústrias química e petroquímica.
Martensíticos	420	S42000	P420A	Cutelaria, instrumentos de medição, hospitalares, odontológicos e cirúrgicos; áreas de mineração e siderurgia, além de lâminas de corte e discos de freios, facas, lâminas e correntes para máquinas de lavar garrafas.
	-	-	P498V	Cutelaria profissional (frigoríficos, abatedouros e açougues).
Duplex	-	S32304	P398A	Digestores da indústria de papel e celulose, indústrias química e petroquímica, pontes e viadutos, trocadores de calor e tubos para manuseio de óleo e gás, tanques de estocagem, tanques de carga para navios e caminhões, sistemas de água do mar, equipamentos de processamento de comida.
	-	S32205/ S31803	P399B	Digestores da indústria de papel e celulose, indústrias química e petroquímica, pontes e viadutos, trocadores de calor e tubos para manuseio de óleo e gás, tanques de estocagem, tanques de carga para navios e caminhões, sistemas de água do mar e equipamentos de processamento de comida.
Série 200	201	S31803	P298A	Pias e cubas, talheres, cestos de máquinas de lavar roupa, gabinetes de máquinas de lavar louça, mesa de fogões, revestimento externo de geladeiras, tubos para indústria moveleira, parte interna de fachadas na construção civil, revestimento de elevadores, restaurantes e cozinhas industriais, tubos para evaporadores, cozedores de usinas de açúcar, corpo de evaporadores, cozedores e outros equipamentos e espelhos em usinas de açúcar.
	-	S20153F	P201F	Aplicações estruturais.

Fonte: Adaptado de Callister Jr., 2008

Para saber mais sobre o aço inoxidável e suas propriedades, acesse: http://www.aperam.com/brazil/port/arquivos/Aco-Inoxidavel-Asolucao-perfeita-para-o-desenvolvimento-sustentavel.pdf

O aço inoxidável apresenta a tensão limite de escoamento variando desde 380 MPa para o aço AISI 409 passando por 515 MPa para o AISI 304 até 1450 MPa para o AISI 17-7PH (endurecíveis por precipitação).

5.5 Ferros fundidos

Os ferros fundidos são ligas ternárias, formadas por ferro, carbono e silício, com o carbono acima de 2,1 %. Comercialmente o teor de carbono está entre 3 % a 4,5 %. Com exceção do ferro fundido branco, os ferros fundidos apresentam carbono, na forma de grafita ou grafite na sua estrutura. No ferro fundido branco o carbono forma a cementita.

As vantagens do ferro fundido são:

- Baixo custo.
- Elevada dureza e resistência ao desgaste.
- Baixo ponto de fusão.
- Boa resistência à corrosão.

As desvantagens do ferro fundido são:

- Fragilidade e baixa ductilidade.
- Soldagem limitada.

Assim, um ferro fundido com seções finas formará ferro fundido branco, com cementita, sem grafita, pois resfria rapidamente, enquanto que as partes espessas formarão ferro fundido cinzento ou, dependendo da composição, nodular, pois o resfriamento é lento, havendo a formação da grafita.

São fatores que favorecem a formação da grafita:

- Alto teor de C.
- Alto teor de Si.
- Resfriamento lento.
- Seções espessas.
- Presença de: Al, Co, Cu, Mg, Ni, P, S, Sb, Sn.

E, possuindo efeito contrário aos fatores anteriores, favorecendo a formação de cementita e não de grafita, temos:

- Baixo teor de C.
- Baixo teor de Si.

- Resfriamento rápido.
- Seções finas.
- Adição de: Cr, Mn, Mo, Ti, V, Zr.

As características gerais do ferro fundido são:

- Boa resistência a compressão.
- Capacidade de amortecimento (absorve vibrações).
- Boa usinabilidade (exceto o ferro fundido branco).
- Baixo custo.

Efeito dos elementos de liga nos ferros fundidos:

- Al, Ni e Si – favorecem a formação da grafita.
- P e S – são impurezas. O S diminui a tenacidade do material. O P forma a esteadita (Fe_3P), que é bastante dura.
- Cr, Mn, Mo, V e W – favorecem a formação da cementita e carbonetos.
- Mn – também é adicionado como dessulfurante formando inclusões de MnS.
- Al, B e Ni – favorecem a formação da grafita.

Diferente do aço, que possui o diagrama Fe-Fe_3C, o ferro fundido apresenta o diagrama Fe-C, ou seja, temos o equilíbrio entre o ferro e a grafita. No diagrama Fe-C, ao invés de cementita temos grafita em equilíbrio (mas se o esfriamento for rápido teremos a formação de cementita). Na prática, a parte inicial do diagrama de equilíbrio Fe-C pode ser considerada igual ao diagrama visto do Fe-Fe_3C. Nos ferros fundidos, o silício provoca a precipitação da grafita e sempre está presente em quantidades até superiores ao carbono. A grafita livre torna o ferro fundido mais dúctil e fácil de usinar. A grafita livre também absorve vibrações, facilita a usinagem e a quebra do cavaco.

Outras vantagens do ferro fundido são a resistência a forças de compressão, baixo custo e a sua alta fluidez, permitindo fundir peças com detalhes ou paredes finas, o que não acontece com o aço fundido.

Os tipos básicos de ferros fundidos são:

- Ferro fundido branco.
- Ferro fundido cinzento.
- Ferro fundido nodular.
- Ferro fundido maleável.
- Ferro fundido vermicular.

5.5.1 Ferro fundido branco

Utilizado em peças em que se necessite elevada resistência a abrasão, e não possui grafite livre em sua microestrutura. Neste caso o carbono encontra-se combinado com o ferro, resultando em elevada dureza e elevada resistência a abrasão, de difícil usinagem. A peça é obtida por fundição com dimensões praticamente iguais a final. É usado em equipamentos de moagem de minérios, pás de escavadeiras e outros componentes de alta abrasão. Quando quebra tem aspecto esbranquiçado, advindo daí seu nome.

A composição química típica ferro fundido branco é:

1,80 a 3,60 % C.

0,50 a 1,90 % Si.

0,25 a 0,80 % Mn.

0,06 a 0,20 % S.

0,06 a 0,20 % P.

5.5.2 Ferro fundido cinzento

É o mais comum, possui boa usinabilidade, devido à presença de grafite livre em sua microestrutura. A sua fundição é facilitada por possuir alta fluidez, ou seja, preenche paredes e detalhes finos; É largamente usado pela indústria de máquinas e equipamentos em geral. Os veios de grafite em sua microestrutura absorvem vibrações e facilitam a usinagem. São utilizados nos estados normalizado ou recozido. Não possuem alongamento, ou seja, são frágeis. Quando quebrado, apresenta aspecto cinzento.

A composição química típica do ferro fundido cinzento é:

3,20 a 3,70 % C.

1,50 a 2,10 % Si.

0,3 a 0,80 % Mn.

0,06 a 0,20 % S.

0,06 a 0,20 % P.

5.5.2.1 Classificação dos ferros fundidos cinzentos

FC-XXX – FC significa ferro fundido cinzento e os dígitos indicam a resistência à tração em MPa.

Exemplo

FC-350 é um ferro fundido cinzento com tensão de ruptura à tração de 350 Mpa.

5.5.3 Ferro fundido nodular

Contém magnésio (Mg) ou cério (Ce) que fazem a grafita ficar na forma esferoidal, possuindo ótima ductibilidade e usinabilidade. É usado em peças que necessitem de maior resistência ao impacto. Possuem alongamento e podem ser tracionados.

A composição química típica do ferro fundido nodular é:

3,2 a 4,1 % C.

1,8 a 3,0 % Si.

0,1 a 1,0 % Mn.

0,005 a 0,020 % S.

0,01 a 0,1 % P.

5.5.4 Ferro fundido maleável

É obtido do ferro fundido branco usando tratamento térmico em altas temperaturas por longos tempos (tratamento de maleabilização), que provoca a aglutinação da grafita, resultando em propriedades do ferro fundido nodular e do cinzento, com média resistência mecânica à tração e média ductilidade. Possuem alongamento e podem ser tracionados.

A composição química típica do ferro fundido maleável é:

2,3 a 2,7% % C.

1,0 a 1,7 % Si .

0 a 0,55 % Mn.

5.5.5 Ferro fundido vermicular

Possui microestrutura em forma vermicular, que é uma forma intermediária entre a grafita em veios e a em nódulos, que são induzidas por adições de magnésio ou cério. Usado em blocos de motores diesel e freios a discos de alto desempenho. Possuem pequeno alongamento e podem ser tracionados.

Assista a um vídeo a respeito das propriedades e classificação dos ferros fundidos e aços em: http://www.infomet.com.br/acos-e-ligas-conteudo-ler.php?cod_tema=9&cod_secao=10&cod_assunto=86&cod_conteudo=145

A composição química típica do ferro fundido vermicular é:

3,1 a 4,0 % C.

1,7 a 3,0 % Si.

0,015 a 0,035 % Mn.

0,06 a 0,13 % Ti.

No Quadro 5.8 temos as propriedades de alguns ferros fundidos.

Quadro 5.8: Propriedades de alguns ferros fundidos

Classe	Designação UNS	Elementos adicionados	Microestrutura	Tensão limite de resistência (Mpa)	Tensão de escoamento (Mpa)	Alongamento (% em 50 mm)	Aplicação
SAE G1800	F10004	3,4-3,7 C 2,55 Si 0,7 Mn	Cinzento com ferrita + perlita.	124	-	-	Fundições onde a resistência não é importante.
SAE G2500	F10005	3,2-3,5 C 2,20 Si 0,8 Mn	Cinzento com ferrita + perlita.	173	-	-	Blocos para cilindros pequenos, cabeçotes de cilindros, pistões, placas de embreagens, caixas de transmissão.
SAE G4000	F10008	3,0-3,3 C 2,0 Si 0,8 Mn	Cinzento com perlita.	276	-	-	Fundições de motores a diesel, revestimentos, cilindros e pistões.
ASTM A536 60-40-18	F32800	3,5-3,8 C 2,0-2,8 Si 0,05 Mg < 0,20 Ni < 0,10 Mo	Grafite nodular com ferrita.	414	276	18	Peças sob pressão como corpos de válvulas e bombas.
ASTM A536 100-70-03	F34800	3,5-3,8 C 2,0-2,8 Si 0,05 Mg < 0,20 Ni < 0,10 Mo	Grafite nodular com perlita.	689	483	3	Engrenagens e componentes de máquinas de alta resistência.
ASTM A536 120-90--02	F36200	3,5-3,8 C 2,0-2,8 Si 0,05 Mg < 0,20 Ni < 0,10 Mo	Grafite nodular e martensita revenida.	827	621	2	Pinhões, engrenagens, cilindros, peças deslizantes.
32510	F22200	2,3-2,7 C 1,0-1,75 Si < 0,55 Mn	Grafite em roseta com ferrita.	345	224	10	Aplicações normais de engenharia a temperatura ambiente e elevada.
45006	F23131	2,4-2,7 C 1,25-1,55 Si < 0,55 Mn	Grafita em roseta com ferrita + perlita.	448	310	6	-
ASTM A842 250	-	3,1-4,0 C 1,7-3,0 Si 0,015-0,035 Mg 0,06-0,13 Ti	vermicular com ferrita	250	175	3	Blocos de motores diesel, discos de freios para trens velozes.
ASTM A842 450	-	3,1-4,0 C 1,7-3,0 Si 0,015-0,035 Mg 0,06-0,13 Ti	vermicular com perlita	450	315	1	-

Fonte: Adaptado de Callister Jr., 2008

5.6 Ligas de alumínio

O alumínio é um metal leve e resistente à corrosão, bom condutor de calor e eletricidade, possui brilho e tem um baixo ponto de fusão.

A codificação do alumínio, em função dos elementos de liga adicionados é:

1XXX – Al puro não ligado com 99,00 % mínimo de Al.

2XXX – ligas contendo **cobre** como elemento de liga principal e adições de outros elementos, principalmente Mg. As ligas da série 2XXX são largamente empregadas na indústria aeronáutica e aeroespacial.

3XXX – ligas contendo **manganês** como elemento de liga principal.

4XXX – ligas contendo **silício** como elemento de liga principal.

5XXX – ligas contendo **magnésio** como elemento de liga principal.

6XXX – ligas contendo **magnésio** e **silício** como elementos de liga principais.

7XXX – ligas contendo **zinco** como elemento de liga principal e adições de Cu, Mg, Cr e Zr.

8XXX – ligas cujas composições apresentam diferentes elementos como Sn ou Li.

Além da liga o alumínio é especificado também pelo tratamento térmico, colocado no final da codificação, como o sufixo T4 ou T6, que se referem ao envelhecimento da liga por precipitação, descritos no item 6.4 (Tratamentos térmicos de ligas de alumínio).

Resumo

Os aços são constituídos por Fe e C, sendo o percentual de carbono inferior a 2,1 %. O aço eutetoide é formado com uma composição eutetoide 0,76 % C e sua microestrutura é 100 % de perlita. O aço hipoeutetoide possui carbono inferior a 0,76 % e apresenta microestrutura formada por ferrita e perlita. O aço hipereutetoide possui carbono superior a 0,76 % e apresenta microestrutura formada por perlita e cementita. A classificação básica ABNT dos aços é do tipo: ABNT XXXX, sendo os dois últimos dígitos o percentual de carbono, e os dois primeiros indicam o tipo de liga predominante. Os aços de baixa liga possuem o total de ligas inferior a 5 %; o de alta liga possui mais de 10 % de

elementos de liga; e os de média liga possuem composição entre 5 e 10 %. Os aços possuem codificação de sua composição química segundo várias entidades, sendo a UNS uma designação unificada.

Os aços inoxidáveis podem ser ferríticos, martensíticos, austeníticos, duplex ou endurecíveis por precipitação. O ferro fundido é uma liga formada basicamente por carbono, ferro e silício e possui grafita, que depende da velocidade de resfriamento. A grafita pode formar veios ou nódulos. O ferro fundido possui ponto de fusão inferior ao aço e menor custo. O alumínio pode ser trabalhado usando tratamentos térmicos ou encruado, dependendo da composição da liga.

Atividades de aprendizagem

1. Complete corretamente a frase abaixo de acordo com as alternativas propostas:

O aço é composto basicamente de ferro e com o percentual de carbono variando de _____ até cerca de _____. Também pode apresentar _____ quantidades de impurezas resultantes do processo de fabricação.

a) 0,022 % – 2 % – pequenas

b) 0,022 % – 3 % – grandes

c) 0,052 % – 2 % – pequenas

d) 0,052 % – 2 % – grandes

e) 0,052 % – 3 % – pequenas

2. Marque (V) para verdadeiro e (F) para falso para as afirmativas a seguir e assinale a alternativa que contém a sequência correta de acordo com a classificação básica dos aços.

( ) Hipoeutetoide: com percentual de C menor que 0,76 % cuja microestrutura é a ferrita mais perlita.

( ) Eutetoide: com percentual de C igual a 0,76 % cuja microestrutura é a perlita.

( ) Hipereutetoide: com percentual de C maior que 0,76 % até 2 % cuja microestrutura é a austenita mais cementita.

a) V – V – F.

b) V – F – V.

c) V – F – F.

d) F – V – F.

e) F – F – V.

3. Com base no tipo de microestrutura apresentada pelo aço, relacione as colunas e assinale a alternativa que identifique corretamente as designações originadas:

(A) Aço encruado.

(B) Aço ferrítico.

(C) Aço perlítico.

(D) Aço austenítico.

( ) Tem grãos alongados devido ao trabalho a frio.

( ) Apresenta, à temperatura ambiente, a austenita, que é não magnética e dúctil.

( ) É um aço hipoeutetóide, esfriado lentamente, com predomínio da ferrita.

( ) Aço com 100 % de perlita.

a) A – C – D – B.

b) A – D – B – C.

c) B – A – D – C.

d) B – C – D – A.

e) C – A – B – D.

4. Complete corretamente a frase abaixo de acordo com as alternativas propostas em relação aos aços ferramenta:

Os aços ferramentas são aços de _____ liga, que podem ser tratados _____, para uso em ferramentas de corte, matrizes e moldes, ou seja, processos que envolvem corte, estampagem, forjamento, extrusão ou laminação, pois possuem _____ resistência, dureza, dureza a quente, tenacidade e resistência ao _____.

a) alta – quimicamente – elevada – desgaste

b) alta – termicamente – elevada – choque

c) alta – termicamente – reduzida – choque

d) baixa – quimicamente – reduzida – desgaste

e) baixa – termicamente – elevada – desgaste

5. Assinale a alternativa correta em relação aos ferros fundidos.

a) Os ferros fundidos são ligas binárias, formadas por ferro, carbono e manganês, com o carbono acima de 2,5 %, sendo que comercialmente o teor de carbono está entre 3 % a 4,5 %.

b) Os ferros fundidos são ligas binárias, formadas por ferro, carbono e silício, com o carbono acima de 2,5 %, sendo que comercialmente o teor de carbono está entre 3 % a 4,5 %.

c) Os ferros fundidos são ligas ternárias, formadas por ferro, carbono e silício, com o carbono acima de 2,1 %, sendo que comercialmente o teor de carbono está entre 3 % a 4,5 %.

d) Os ferros fundidos são ligas ternárias, formadas por ferro, carbono e silício, com o carbono acima de 2,1 %, sendo que comercialmente o teor de carbono está entre 3 % a 5,4 %.

e) Os ferros fundidos são ligas ternárias, formadas por ferro, carbono e manganês, com o carbono acima de 2,1 %, sendo que comercialmente o teor de carbono está entre 3 % a 5,4 %.

6. Complete corretamente a frase abaixo de acordo com as alternativas propostas em relação aos aços ferramenta:

O silício (Si) é um agente desoxidante na produção do aço. Aumenta a resistência à _____ e a resistência à tração, mas prejudica a _____, também aumenta significativamente a _____ elétrica do aço.

a) altas temperaturas – ductibilidade – resistividade

b) altas temperaturas – soldagem – resistividade

c) corrosão – ductibilidade – resistividade

d) corrosão – soldagem – resistência

e) corrosão – soldagem – resistividade

7. Marque (V) para verdadeiro e (F) para falso para as afirmativas a seguir e assinale a alternativa que contém a sequência correta em relação aos efeitos dos elementos de liga.

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

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

( ) Chumbo (Pb) – na maioria dos casos é um elemento indesejável, oriundo do processo de produção. Se combinado com o ferro na forma de sulfeto, deixa o aço quebradiço.

( ) Cromo (Cr) – aumenta a resistência à tração em altas temperaturas.

a) V – V – V – F.

b) V – V – F – V.

c) V – F – F – F.

d) F – V – F – V.

e) F – V – F – F.

8. Assinale a alternativa que relaciona corretamente os tipos de ferros fundidos com suas respectivas características:

(A) Ferro fundido branco.

(B) Ferro fundido cinzento.

(C) Ferro fundido nodular.

(D) Ferro fundido maleável.

( ) Utilizado em peças em que se necessite elevada resistência a abrasão, e não possui grafite livre em sua microestrutura.

( ) É obtido do ferro fundido branco usando tratamento térmico em altas temperaturas por longos tempos.

( ) É o mais comum, possui boa usinabilidade, devida à presença de grafite livre em sua microestrutura.

( ) Contém magnésio (Mg) ou cério (Ce) que fazem a grafita ficar na forma esferoidal, possuindo ótima ductibilidade e usinabilidade.

a) A – B – C – D.

b) A – C – D – B.

c) A – D – B – C.

d) B – C – D – A.

e) C – D – B – A

9. Marque (V) para verdadeiro e (F) para falso para as afirmativas a seguir e assinale a alternativa que contém a sequência correta.

( ) As desvantagens do ferro fundido são: fragilidade, baixa ductilidade e soldagem limitada.

( ) As estruturas e microestruturas do ferro fundido dependem de dois fatores básicos: velocidade de aquecimento e composição química.

( ) São fatores que favorecem a formação da grafita: alto teor de C, alto teor de Si e resfriamento rápido.

( ) São algumas das características gerais do ferro fundido: boa resistência à compressão e capacidade de amortecimento.

a) V – F – V – V.

b) V – F – V – F.

c) V – F – F – V.

d) F – V – F – V.

e) F – V – F – F.

Aula 6 – Tratamentos térmicos e termoquímicos do aço e de ligas de alumínio

Objetivos

Conhecer os tratamentos térmicos mais comuns: têmpera, revenimento, normalização, recozimento, austêmpera, martêmpera.

Conhecer as curvas tempo-temperatura-transformação – TTT.

Conhecer os tratamentos térmicos e termoquímicos mais comuns: cementação, carbonitretação, nitretação e boretação.

Conhecer os tratamentos térmicos de ligas de alumínio: solubilização, envelhecimento e estabilização.

6.1 Considerações iniciais

Nessa aula, veremos os tratamentos térmicos mais comuns de aços e de ligas de alumínio. Os tratamentos térmicos modificam as propriedades do material sem alterar sua composição química, pela modificação da microestrutura, sendo as variáveis básicas o tempo, a temperatura e a velocidade de resfriamento. Assim uma peça de aço pode ser temperada, aumentando a sua dureza, ou pode ter uma diminuição de sua dureza, como no recozimento. O prego, que é um aço encruado por trabalho mecânico a frio, mas se submetido a um tratamento de recozimento, diminuirá a sua resistência mecânica, acompanhado de aumento da ductilidade, inviabilizando seu uso. Estudaremos as curvas TTT dos tratamentos térmicos dos aços e o envelhecimento de ligas de alumínio. Os tratamentos termoquímicos visam o endurecimento superficial do material. Assim, usando processos de difusão, usando atmosferas sólidas, líquidas ou gasosas, a superfície do material em uma fina camada tem um aumento, por exemplo, de carbono, no processo chamado de cementação, de nitrogênio, na nitretação, e de boro, na boretação. Após o tratamento termoquímico pode vir um tratamento térmico. Os tratamentos de superfície aumentam a resistência ao desgaste, à corrosão e à fadiga.

Os tratamentos térmicos podem ser:

- Convencionais.
- Termoquímicos.

Observamos que uma determinada peça pode passar por diversos tratamentos térmicos – normalização, recozimento, austenização, revenido e nitretação –, até se obter o produto final.

6.2 Tratamentos térmicos do aço

Os tratamentos térmicos modificam as propriedades do material sem alterar sua composição química, pela modificação da microestrutura, sendo as variáveis básicas o tempo, a temperatura e a velocidade de resfriamento.

Os tratamentos térmicos possuem dois grandes objetivos:

- Endurecimento.
- Recozimento.

No endurecimento, um material apresenta um endurecimento, que é acompanhado por aumento de sua resistência mecânica. No recozimento, o material apresenta um alívio de suas tensões residuais e pode apresentar recristalização. Os tratamentos térmicos produzem modificações nas propriedades do aço e são feitos provocando:

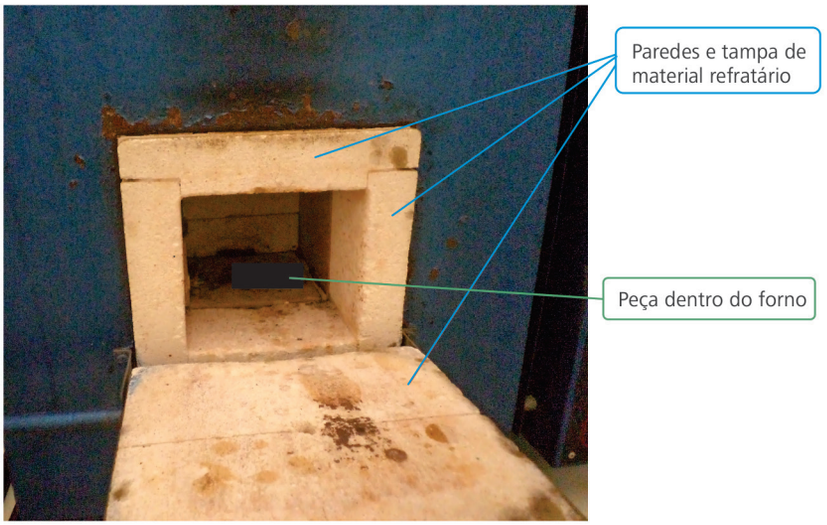
- Alívio de tensões internas.
- Aumento ou diminuição da dureza.
- Aumento da resistência mecânica.
- Alteração da ductilidade.
- Alteração da usinabilidade.
- Alteração da resistência ao desgaste.

- Alteração da resistência à corrosão.

- Alteração da resistência ao calor.

Resta selecionar qual tratamento térmico é indicado para o caso de nossas aplicações.

O tratamento térmico utiliza um forno, de dimensões adequadas à peça, e com controle de temperatura, conforme Figura 6.1. Os tratamentos térmicos, também, podem ser feitos de forma contínua, como na fabricação de fios, perfis e chapas metálicas em geral. O tratamento térmico mais comum é a têmpera, que consiste em aquecer uma peça de aço dentro do campo da austenita, e provocar um resfriamento rápido que não possibilite a transformação para a perlita. No diagrama de equilíbrio Fe-Fe_3C estudado, as fases e microestruturas lá presentes pressupõem transformações bastante lentas, que não é o caso da têmpera, que devido à alta velocidade de resfriamento produz a martensita, que é uma fase metaestável de ferro e carbono, de estrutura cristalina ortorrômbica. Os ferros fundidos também podem ser tratados termicamente. De maneira geral, todos os metais e ligas podem ser tratados termicamente.



A temperatura e o tempo no forno são ajustados de acordo com o tratamento desejado

Figura 6.1: Aspecto de um forno para tratamento térmico
Fonte: CTISM, adaptado dos autores

Os tratamentos térmicos dos aços envolvem mudanças de fases e dependem da velocidade do esfriamento. Para entendê-los precisamos considerar:

a) O diagrama de equilíbrio do Fe-Fe_3C, que nos mostra as diversas fases em função da temperatura e concentração de carbono.

b) O diagrama tempo-temperatura-transformação (TTT), que informa as microestruturas em função da velocidade de resfriamento.

c) A temperatura de recristalização. Acima desta temperatura os grãos tendem a aumentar (a temperatura de recristalização de um aço baixo carbono é cerca de 538°C).

Na Figura 6.2, é possível observar a faixa de temperatura em função do tratamento e percentual de carbono para a normalização, recozimento pleno, esferoidização e recozimentos sem transformação de fases.

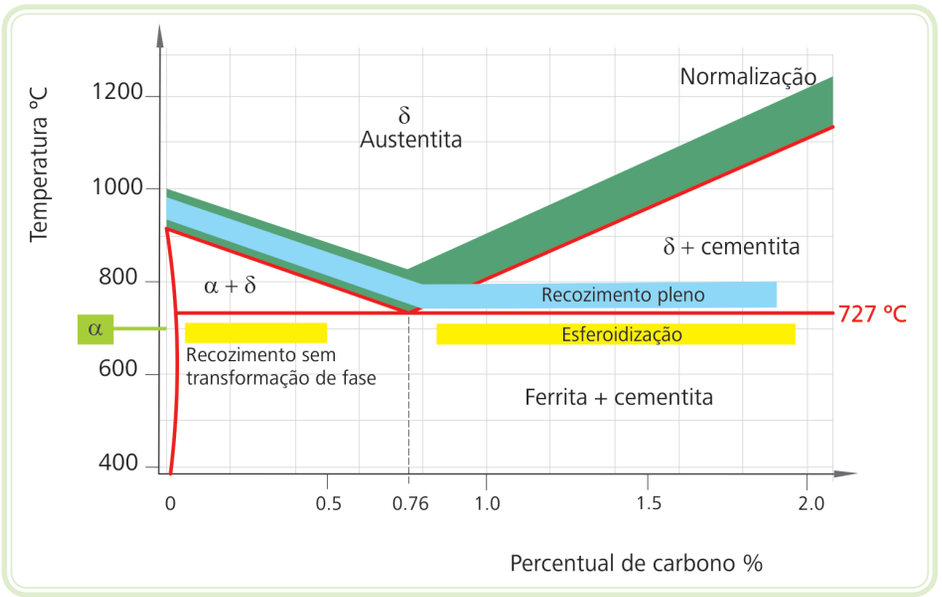


Figura 6.2: Visualização das temperaturas
Fonte: CTISM, adaptado de Callister Jr., 2008

O diagrama tempo-temperatura-transformação (TTT) informa as microestruturas formadas em função da velocidade de resfriamento, que podem ser a perlita, fina ou grossa, a bainita ou a martensita.

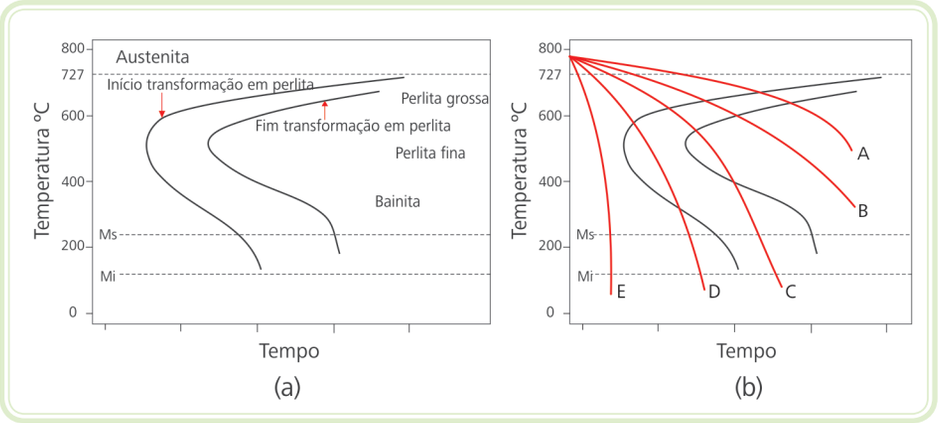


Figura 6.3: Representação de uma curva TTT de um aço eutetoide
Fonte: CTISM, adaptado de Callister Jr., 2008

A curva E representa a têmpera; a curva A representa recozimento dentro do forno; a B representa a normalização, com resfriamento ao ar. Na curva D se forma perlita e martensita. N acurva C se forma perlita com grãos finos.

Na Figura 6.3, observa-se a curva TTT de um aço eutetoide e as microestruturas possíveis em função da velocidade de resfriamento, onde se vê as duas curvas, que na parte superior, indicam o início de formação de perlita e o fim da transformação em perlita. O aço é aquecido até cerca de 50°C acima de 727°C, ficando com estrutura da austenita. Analisando diversos resfriamentos com velocidades diferentes, temos na curva de resfriamento A, na Figura 6.3(b), recozimento onde ocorre formação de perlita grossa, obtida por resfriamento dentro do forno; na curva B obtemos perlita fina, sendo resfriada ao ar livre, que é a normalização; em C temos uma perlita mais fina obtida por esfriamento com ar insuflado; em D forma-se perlita mais martensita, pois a curva não cruzou a linha do fim da transformação em perlita; e em E forma-se 100 % de martensita, pois a curva de esfriamento não cruzou o início de formação da perlita. Em peças de dimensões grandes pode ocorrer de na periferia ser formada a martensita e no interior, que resfria mais lentamente, ser formada uma parte de perlita. As curvas de início e fim de transformação em perlita são deslocadas para a direita com a adição de elementos de liga no aço. Isto significa que fica mais fácil temperar o aço ligado. A exceção fica por conta do cobalto, que desloca a curva para a esquerda.

Os tipos básicos de tratamentos térmicos convencionais são:

- Recozimento.

- Normalização.

- Têmpera.

- Revenimento.

Agora vamos descrever estes tratamentos:

O recozimento proporciona a redução da dureza do aço, melhorando a usinabilidade e homogeinização dos grãos.

Os tipos de recozimento são:

- **Recozimento total ou pleno** – o aço é aquecido na zona austenítica, cerca de 50°C acima da linha A_3 para os aços hipoeutetoides ou A_1, conforme visto na Figura 3.11, para os aços hipereutetoides, com resfriamento lento dentro do forno. Figura 6.3(b) curva A.

- **Recozimento subcrítico** – o aquecimento se dá a uma temperatura abaixo da linha A_1 (Figura 3.11), seguido de resfriamento ao ar. É usado para alivio de tensões de materiais encruados e também soldados, ocorrendo a recristalização dos grãos.

- **Esferoidização** – consiste num aquecimento e resfriamento e produz uma microestrura globular ou esferoidal de carboneto no aço, que melhora a usinabilidade de aços com alto teor de carbono. Uma das maneiras de obtê-lo consiste em aquecer por um longo tempo logo abaixo da linha A_1 (Figura 3.11).

A normalização é usada para homogeneizar os grãos após operações de forjamento, ou antes da têmpera. O aço deve ser aquecido logo acima das linhas A_3 ou A_{cm} (Figura 3.11), com posterior resfriamento ao ar.

A têmpera é o tratamento térmico mais comum, onde o endurecimento ocorre pela formação da martensita, que é uma fase metaestável criada devido ao resfriamento rápido, não havendo tempo dos átomos de carbono assumirem posições estáveis. A martensita é uma estrutura ortorrômbica formada por ferro e carbono. O aço deve ser levado ao campo austenítico, acima das linhas A_1 e A_{cm} (Figura 3.11), seguido por resfriamento por imersão em água, óleo ou banho de sais. O aço temperado é frágil e deve, após a têmpera, ser submetido ao revenimento.

A temperabilidade dos aços, cujo ensaio é feito pela norma SAE J1268, depende do percentual de carbono e dos elementos de liga, sendo que aços com baixo teor de carbono, menor que 0,2 %, não "pegam" têmpera.

O revenido é usado após a têmpera, que deixa o material frágil. O revenimento deixa o material menos duro e mais tenaz. Consiste em aquecer a peça temperada em uma temperatura com posterior resfriamento. Dependendo da temperatura que a peça é aquecida existem as propriedades características.

A martêmpera visa evitar trincas e empenamentos que ocorrem na têmpera, consistindo em fazer um esfriamento brusco até uma temperatura da ordem de 400°C e em seguida continuar como se fosse uma têmpera. Deve ser feito revenimento após. A peça apresenta uma tenacidade maior do que a temperada, conforme Figura 6.4.

A austêmpera produz uma estrutura bainítica, sendo obtida por resfriamento brusco antes da transformação em martensita, e mantida na temperatura até ser formada uma estrutura 100 % de bainita. Não precisa revenido.

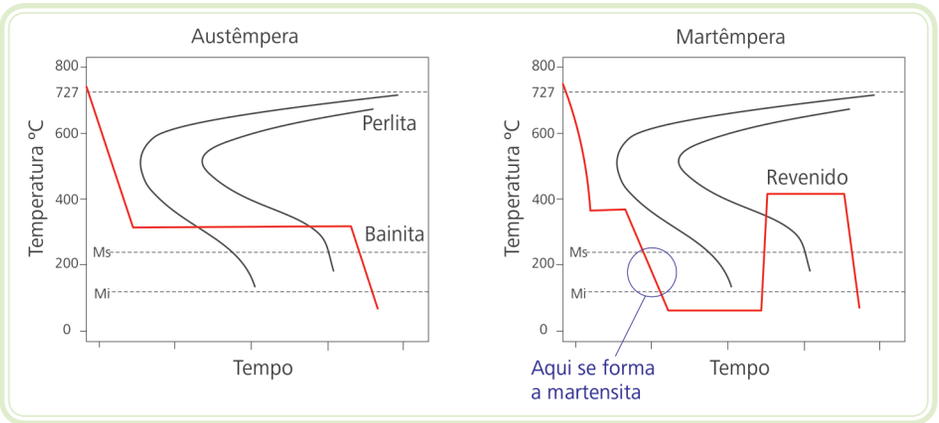


Figura 6.4: Representação da austêmpera e martêmpera
Fonte: CTISM, adaptado de Callister Jr., 2008

Como exemplo de aplicação de tratamento térmico, vamos considerar uma recomendação para o beneficiamento, constante em catálogo, conforme Figura 6.5, que mostra a sequência recomendada de tratamentos térmicos para o aço SAE 4140.

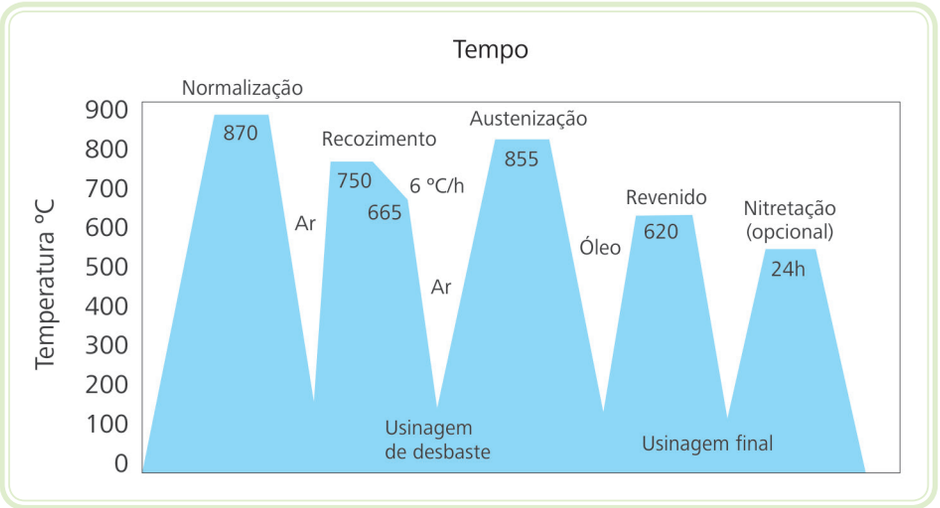


Figura 6.5: Sequências de tratamentos térmicos do aço SAE 4140 até o produto final
Fonte: CTISM, adaptado de https://www.belgo.com.br/produtos/industria/acos_para_construcao_mecanica/pdf/acos_para_construcao_mecanica.pdf

6.3 Tratamentos termoquímicos do aço

Os tratamentos térmicos termoquímicos provocam modificação superficial da superfície, de pequena espessura, por processo de difusão ou deposição química, tornando-a mais resistente ao desgaste, à corrosão e também à fadiga. Por exemplo, ao cementar os dentes de uma engrenagem, aumenta a resistência ao desgaste, e o núcleo da engrenagem permanece mais tenaz, menos duro, havendo resistência ao impacto.

Os tipos básicos de tratamentos térmicos termoquímicos são:

6.3.1 Cementação

Deposição superficial, dentro da região austenítica, do carbono em aços de baixo carbono. A temperatura de aquecimento é superior a linha A_3 conforme visto na Figura 3.10. A atmosfera carbonetante pode ser sólida, líquida ou gasosa. Posteriormente é temperada.

6.3.2 Nitretação

É feito o enriquecimento superficial de nitrogênio, que forma nitretos de alta dureza. É feita abaixo da zona austenitica, usando gases ou banho de sal, e não precisa tratamento posterior.

6.3.3 Carbonitretação ou cianetação (meio líquido)

Ocorre a introdução simultânea, na superfície do aço na região austenítica, de carbono e de nitrogênio, usando banhos de sal, e seguido por tempera.

6.3.4 Boretação

A peça em contato com atmosfera contendo boro, forma boretos, de grande dureza.

6.4 Tratamentos térmicos de ligas de alumínio

As ligas de alumínio são de dois tipos:

- Ligas de trabalho mecânico.
- Ligas para fundição.

As ligas para trabalho mecânico são classificadas em função do elemento de liga principal:

1XXX – Al puro não ligado com 99,00 % mínimo de Al.

2XXX – ligas contendo **cobre** como elemento de liga principal e adições de outros elementos, principalmente Mg. As ligas da série 2XXX são largamente empregadas na indústria aeronáutica e aeroespacial.

3XXX – ligas contendo **manganês** como elemento de liga principal.

4XXX – ligas contendo **silício** como elemento de liga principal.

5XXX – ligas contendo **magnésio** como elemento de liga principal.

6XXX – ligas contendo **magnésio** e **silício** como elementos de liga principais.

7XXX – ligas contendo **zinco** como elemento de liga principal e adições de Cu, Mg, Cr e Zr.

8XXX – ligas com diferentes elementos como Sn ou Li.

As ligas 1XXX, 3XXX, 4XXX e 5XXX não são endurecíveis por tratamento térmico: são endurecíveis por trabalho mecânico de encruamento.

As ligas 2XXX, 6XXX, 7XXX e 8XXX são endurecíveis por tratamento térmico, e encruamento também, sendo para o alumínio os mais comuns a solubilização e o envelhecimento. O recozimento pode ser usado em ambos os grupos.

Após a especificação do alumínio, é adicionado um sufixo que indica o tipo de trabalho ou tratamento térmico, que são:

F – como fabricado.

O – recozido.

H – endurecido por encruamento.

H1 – produtos conformados que apresentam encruamento e não sofreram nenhum tratamento suplementar.

H2 – produtos encruados e parcialmente recozidos para um determinado valor de dureza. Os dígitos seguintes a H2 indicam a quantidade de encruamento residual após o produto ser parcialmente recozido.

H3 – produtos encruados e envelhecidos naturalmente para um determinado valor de dureza.

T – tratado termicamente.

T1 – produtos resfriados a partir da temperatura de conformação mecânica a quente e envelhecidos naturalmente para uma condição de propriedades mecânicas estáveis.

T2 – produtos resfriados a partir da temperatura de conformação mecânica a quente, encruados e envelhecidos naturalmente para uma condição de propriedades mecânicas estáveis.

T3 – produtos solubilizados, encruados e envelhecidos naturalmente para uma condição de propriedades mecânicas estáveis.

T4 – produtos solubilizados e envelhecidos naturalmente para uma condição de propriedades mecânicas estáveis.

T5 – produtos resfriados a partir da temperatura de conformação mecânica a quente e envelhecidos artificialmente.

T6 – produtos solubilizados e envelhecidos artificialmente.

T7 – produtos solubilizados e superenvelhecidos ou estabilizados.

T8 – produtos solubilizados, encruados e envelhecidos artificialmente.

T9 – produtos solubilizados, envelhecidos artificialmente e encruados.

T10 – produtos resfriados a partir da temperatura de conformação mecânica a quente, encruados artificialmente.

Como curiosidade, o material conhecido como Duraluminio, liga a base de Al, com Cu (0,45 a 1,5 %), magnésio (0,45 a 1,5 %) e Mn (0,6 a 0,8 %), tem seu nome derivado de Duren, cidade alemã onde ele foi descoberto, por Alfred Wilm em 1906.

Os tratamentos térmicos comuns do alumínio são:

- Solubilização/envelhecimento.
- Recozimento pleno.
- Estabilização.

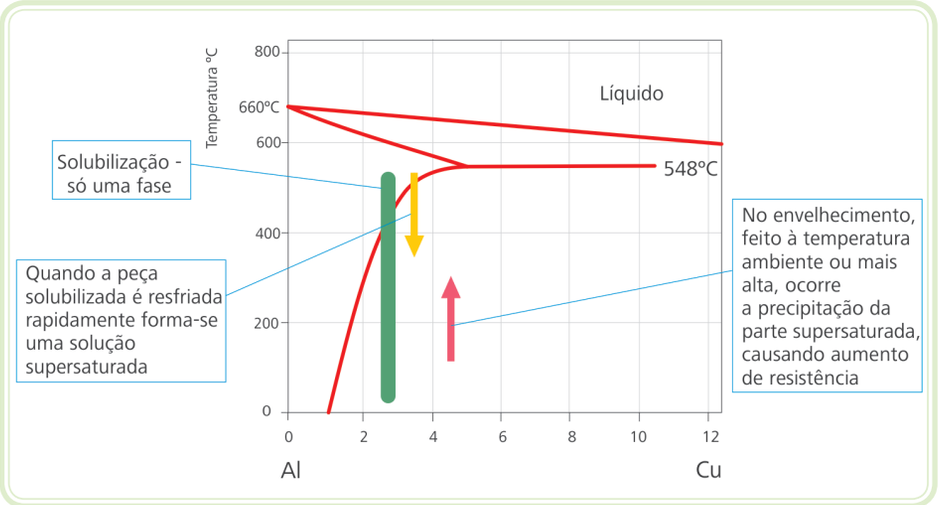


Figura 6.6: Diagrama Al-Cu
Fonte: CTISM, adaptado dos autores

Para realizar o envelhecimento do alumínio, é feita a solubilização logo acima da linha *solvus*, seguida de resfriamento rápido. O envelhecimento pode ocorrer a temperatura ambiente ou maior, quando ocorre precipitação da fase saturada.

6.4.1 Solubilização e envelhecimento

Fornece as ligas uma maior resistência mecânica.

O processo é o seguinte:

- O metal é aquecido uniformemente até cerca de 500°C, acima da linha *solvus*, dependendo da liga, produzindo uma fase única. Abaixo da linha *solvus* há duas fases, conforme Figura 6.6, para uma liga Al-Cu.

- Após um resfriamento rápido, geralmente em água, não há tempo para a precipitação dos elementos que estão agora instavelmente supersaturados em uma única fase.

Aos poucos vai ocorrendo a precipitação da fase supersaturada, formando discordâncias na estrutura cristalina e que causam um grande aumento da resistência mecânica. A precipitação pode ser à temperatura ambiente ou mais alta.

Note que enquanto não ocorre a precipitação, o material é mole e pode ser trabalhado facilmente.

6.4.2 Recozimento

Ocorre a recristalização total do alumínio deixando-o dúctil, removendo o encruamento existente.

6.4.3 Estabilização

Nas ligas encruadas série 5XXX, após algum tempo ocorre uma recuperação, diminuição das discordâncias. A estabilização, em temperaturas de 150°C, acelera este processo.

Resumo

Os tratamentos térmicos modificam as propriedades do material sem alterar sua composição química, pela modificação da microestrutura, sendo as variáveis básicas o tempo, a temperatura e a velocidade de resfriamento. O mais comum é a têmpera. Os tratamentos térmicos possuem dois grandes objetivos: endurecimento ou recozimento. Os tipos básicos de tratamentos térmicos convencionais são: recozimento, normalização, têmpera e revenimento. As curvas TTT fornecem as estruturas resultantes de um aço eutetoide levado à zona austenítica quando submetido a um resfriamento. Se for rápido temos

a têmpera, e se for lento temos o recozimento. Os tratamentos térmicos termoquímicos provocam modificação na superfície, de pequena espessura, por processo de difusão ou deposição química, tornando-a mais resistente ao desgaste, à corrosão e também à fadiga. Os tipos básicos de tratamentos térmicos termoquímicos são: cementação, nitretação, cianetação, carbonitretação e boretação. O alumínio e suas ligas pode ser tratado termicamente, sendo o tratamento mais comum o envelhecimento, que é a precipitação de uma fase supersaturada, obtida por solubilização. Algumas ligas encruadas precisam ser estabilizadas devido a recuperação espontânea das discordâncias.

Atividades de aprendizagem

1. Complete corretamente a frase abaixo de acordo com as alternativas propostas:

Os tratamentos térmicos modificam as propriedades do material sem alterar sua composição química, pela modificação da microestrutura, sendo as variáveis básicas o _____, _____ e _____.

a) material – calor – velocidade de aquecimento

b) material – calor – velocidade de resfriamento

c) tempo – material – velocidade de resfriamento

d) tempo – temperatura – velocidade de aquecimento

e) tempo – temperatura – velocidade de resfriamento

2. Marque (V) para verdadeiro e (F) para falso para as afirmativas a seguir e assinale a alternativa que contém a sequência correta.

( ) Os tratamentos de superfície aumentam a resistência ao desgaste à corrosão e à fadiga.

( ) No encruamento um material apresenta um endurecimento, que é acompanhado por aumento de sua resistência mecânica.

( ) No recozimento, o material apresenta um aumento de suas tensões residuais e pode apresentar recristalização.

( ) Os tratamentos térmicos produzem modificações nas propriedades do aço e são feitos provocando aumento ou diminuição da resistência mecânica.

a) V – V – V – V.

b) V – V – F – V.

c) V – V – F – F.

d) F – V – F – V.

e) F – F – V – F.

3. Complete a frase abaixo de acordo com as alternativas propostas em relação aos aços ferramenta:

O tratamento térmico mais comum é _____, que consiste em aquecer uma peça de aço até que sua estrutura seja _____, e depois provocar um resfriamento _____ que não possibilite a formação de _____.

a) a têmpera – austenita – lento – perlita

b) a têmpera – austenita – rápido – perlita

c) a têmpera – ferrita – lento – perlita

d) o revenido – austenita – rápido – cementita

e) o revenido – ferrita – lento – austenita

4. Marque (V) para verdadeiro e (F) para falso para as afirmativas a seguir e assinale a alternativa que contém a sequência correta em relação aos tratamentos térmicos dos aços.

( ) Os tratamentos termoquímicos modificam a superfície dos materiais em uma profundidade alta, e aumentam a resistência ao desgaste, à corrosão e à fadiga.

( ) Nitretação – é feito enriquecimento superficial de nitrogênio, que forma nitretos de alta dureza.

( ) Cementação – difusão superficial do carbono em aços de alto teor de carbono.

( ) Boretação – a peça em contato com atmosfera contendo boro, forma boretos, de grande dureza.

a) V – V – V – F.

b) V – F – V – V.

c) F – V – F – V.

d) F – V – F – F.

e) F – F – F – V.

5. Com base nos tipos básicos de tratamentos térmicos convencionais, assinale a alternativa que identifique corretamente cada tratamento.

(A) Normalização.

(B) Recozimento.

(C) Revenimento.

( ) Usada para refinar os grãos após operações de forjamento ou antes da têmpera.

( ) Deixa o material menos duro e mais tenaz. Consiste em aquecer a peça temperada em uma temperatura com posterior resfriamento.

( ) Proporciona a redução da dureza do aço, melhorando a usinabilidade e homogeinização dos grãos.

a) A – B – C.

b) A – C – B.

c) B – A – C.

d) B – C – A.

e) C – B – A.

6. Complete corretamente a frase abaixo de acordo com as alternativas propostas em relação ao processo de solubilização, em uma liga Al-Cu:

O metal é _____ uniformemente até cerca de _____, _____ da linha *solvus*, dependendo da liga, produzindo uma fase única.

a) aquecido – 400°C – acima

b) aquecido – 500°C – abaixo

c) aquecido – 500°C – acima

d) resfriado – 400°C – abaixo

e) resfriado – 500°C – acima

Referências

ARCELORMITTAL. **Guia do aço**: aços longos. mar. 2013. Disponível em: <http://brasil.arcelormittal.com.br/pdf/quem-somos/guia-aco.pdf>.

ASHBY. M. F.; JONES, D. R. H. **Engenharia de materiais**: uma introdução a propriedades, aplicações e projeto. 3. ed. Rio de Janeiro: Editora Campus, 2007.

ASKELAND, D. R.; PHULÉ, P. P. **Ciência e engenharia dos materiais**. São Paulo: Cengage Learning, 2008.

CALLISTER JR., W. D. **Ciência e engenharia de materiais**: uma introdução. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**. 7. ed. São Paulo: ABM, 1996.

_____. **Tecnologia mecânica**. 2. ed. São Paulo: Editora Mc Graw Hill, 1986.

COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4. ed. São Paulo: Editora Blücher, 2008.

GENTIL, V. **Corrosão**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003.

LOKENSGARD, E. **Plásticos industriais**: teoria e aplicações. São Paulo: Cengage Learning, 2013.

VAN VLACK, L. H. **Princípios de ciências dos materiais**. São Paulo: Editora Blücher, 2002.

Currículo do professor-autor

O professor **Carlos Roberto Cauduro** é professor adjunto da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), e está lotado no Colégio Técnico Industrial de Santa Maria (CTISM).

- Graduado em Engenharia Mecânica (UFRGS).
- Mestrado e doutorado na área de Instrumentação no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e Materiais (PPGEMM-UFRGS).

No CTISM, ministra as disciplinas de Ciência dos Materiais I, Ciência dos Materiais II, Resistência dos Materiais com Elementos de Máquinas I e Resistência dos Materiais com Elementos de Máquinas II, para o curso Superior em Tecnologia de Fabricação Mecânica.

O professor **Alessandro de Franceschi**, atualmente, trabalha como Professor de Ensino Básico, Técnico e Tecnológico no Colégio Técnico Industrial de Santa Maria (CTISM), vinculado a Universidade Federal de Santa Maria (UFSM).

- Técnico em Mecânica (CTISM – UFSM).
- Técnico em Eletrotécnica (CTISM – UFSM).
- Graduado em Engenharia Mecânica (UFSM).
- Formação Pedagógica – Licenciatura Plena em Ensino Profissionalizante pela Universidade de Ijuí (UNIJUI).
- Especialização em:
  Engenharia e Segurança do Trabalho (UFSM).
  Gerenciamento da Qualidade (UFSM).
  Gerenciamento de Máquinas e Equipamentos Agrícolas (UFPEL).
- Mestrado em Engenharia de Produção (UFSM).
- Doutorado em Engenharia Agrícola – área de Mecanização Agrícola (UFSM).

No CTISM, ministra as disciplinas de Elementos de Máquinas para o curso Técnico em Mecânica, Administração e Organização do Trabalho, Ergonomia e, Tecnologias e Processos Industriais III para o curso Técnico em Segurança do Trabalho, Segurança em Soldagem para o curso Técnico em Soldagem e Introdução a Segurança de Máquinas e Equipamentos, Gestão Industrial I e II para o Curso Superior em Tecnologia de Fabricação Mecânica.

A professora **Alexsandra Matos Romio**, atualmente trabalha como Professora de Ensino Básico, Técnico e Tecnológico no Colégio Técnico Industrial de Santa Maria (CTISM), vinculada a Universidade Federal de Santa Maria (UFSM).

- Graduação em Engenharia Mecânica (UFSM).
- Formação Pedagógica – Licenciatura Plena no Programa Especial de Graduação de Formação de Professores para a Educação Profissional (UFSM).
- Mestrado em Engenharia de Produção (UFSM).

No CTISM, ministra as disciplinas de Elementos de Máquinas, Metrologia, Gestão e Planejamento Industrial, Empreendedorismo, Tecnologia Mecânica e Desenho Técnico. Anteriormente trabalhou como Engenheira de Processos na TCS Indústria Metalúrgica Ltda., onde foi responsável pela implementação do sistema integrado de gestão, melhorias no sistema, gestão de estoque e engenharia nas listas de materiais (2008-2013).

Prestou consultoria em otimização de processos de fabricação e gestão da produção, além de já ter sido professora substituta no CTISM em 2011 e 2012. Atua nos temas de Processos Produtivos, Sistemas Integrados de Gestão e Implantação de Sistemas de Gestão da Produção, Estoques, Engenharia Econômica e Custos e como tutora do curso de Automação Industrial EaD do CTISM.