

A complex network graph composed of numerous glowing blue nodes and connecting lines, set against a dark blue gradient background.

KLS

# Ciência dos materiais



# Ciência dos materiais

Éder Cícero Adão Simêncio

© 2016 por Editora e Distribuidora Educacional S.A.  
Todos os direitos reservados. Nenhuma parte desta publicação poderá ser reproduzida ou transmitida de qualquer modo ou por qualquer outro meio, eletrônico ou mecânico, incluindo fotocópia, gravação ou qualquer outro tipo de sistema de armazenamento e transmissão de informação, sem prévia autorização, por escrito, da Editora e Distribuidora Educacional S.A.

**Presidente**  
Rodrigo Galindo

**Vice-Presidente Acadêmico de Graduação**  
Mário Ghio Júnior

**Conselho Acadêmico**  
Dieter S. S. Paiva  
Camila Cardoso Rotella  
Emanuel Santana  
Alberto S. Santana  
Lidiane Cristina Vivaldini Olo  
Cristiane Lisandra Danna  
Danielly Nunes Andrade Noé  
Ana Lucia Jankovic Barduchi  
Grasiele Aparecida Lourenço  
Paulo Heraldo Costa do Valle  
Thatiane Cristina dos Santos de Carvalho Ribeiro

**Revisor Técnico**  
João Carlos dos Santos

**Editoração**  
Emanuel Santana  
Lidiane Cristina Vivaldini Olo  
Cristiane Lisandra Danna  
André Augusto de Andrade Ramos  
Erick Silva Griep  
Adilson Braga Fontes  
Diogo Ribeiro Garcia  
eGTB Editora

---

#### Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

S588c      Simêncio, Éder Cícero Adão  
              Ciência dos materiais / Éder Cícero Adão Simêncio.  
– Londrina : Editora e Distribuidora Educacional S.A., 2016.  
              216 p.

ISBN 978-85-8482-536-3

1. Materiais. I. Título.

CDD 620.112

---

2016  
Editora e Distribuidora Educacional S.A.  
Avenida París, 675 – Parque Residencial João Piza  
CEP: 86041-100 – Londrina – PR  
e-mail: editora.educacional@kroton.com.br  
Homepage: <http://www.kroton.com.br/>

# Sumário

<b>Unidade 1   Estrutura atômica e ligações químicas</b>	<b>7</b>
Seção 1.1 - Introdução à ciência dos materiais	9
Seção 1.2 - Classificação dos materiais	21
Seção 1.3 - O átomo e sua estrutura	33
Seção 1.4 - Ligações químicas e forças intermoleculares	45
<b>Unidade 2   Estruturas cristalinas</b>	<b>59</b>
Seção 2.1 - Estructuras cristalinas	61
Seção 2.2 - Sistemas cristalinos	73
Seção 2.3 - Imperfeições cristalinas	83
Seção 2.4 - Difusão	95
<b>Unidade 3   Propriedades dos materiais</b>	<b>109</b>
Seção 3.1 - Propriedades dos materiais metálicos	111
Seção 3.2 - Propriedades dos materiais cerâmicos	123
Seção 3.3 - Propriedades dos materiais poliméricos	135
Seção 3.4 - Propriedades dos materiais compósitos	147
<b>Unidade 4   Processamento e desempenho dos materiais</b>	<b>161</b>
Seção 4.1 - Processamento e desempenho dos materiais metálicos	163
Seção 4.2 - Processamento e desempenho dos materiais cerâmicos	175
Seção 4.3 - Processamento e desempenho dos materiais poliméricos	187
Seção 4.4 - Processamento e desempenho dos materiais compósitos	199



# Palavras do autor

Sejam bem-vindos à introdução do estudo da ciência dos materiais. Neste livro você aprenderá que essa ciência nasceu da necessidade do homem de ter materiais disponíveis para aplicar em determinados projetos, o que consequentemente permitiu o desenvolvimento tecnológico e social. O objetivo principal deste estudo é lhe ajudar a compreender as importantes relações entre as estruturas químicas, os processamentos, as propriedades e o desempenho de um material. A partir da compreensão dessas relações, você será capaz de selecionar materiais adequados para uma determinada aplicação, de modo a atender às características de desempenho esperadas, tanto no que se refere às características de serviço quanto às de processamento.

O livro está estruturado da seguinte maneira: Na Unidade 1 abordaremos alguns aspectos históricos e relacionados à composição dos materiais, isto é, a importância do estudo da química para compreensão dos princípios fundamentais da ciência dos materiais que lhe permitirão classificá-los em quatro grandes grupos. A Unidade 2 apresentará as principais estruturas cristalinas dos diferentes tipos de materiais e seus sistemas cristalinos, assim como os tipos de imperfeições ou defeitos estruturais que são importantes na difusão no estado sólido. Já na Unidade 3 vamos conhecer as principais propriedades dos materiais metálicos, cerâmicos, poliméricos e compósitos. Na Unidade 4 finalizaremos nossos estudos com o desempenho e processamento das diferentes classes de materiais. Dessa forma, o estudo das quatro unidades de ensino deste livro terá envolvido os quatro componentes pilares da ciência dos materiais. No desenvolvimento deste livro didático e nos demais materiais dessa disciplina foi utilizada a metodologia ativa de aprendizagem conhecida como *Flipped classroom* ou sala invertida. Nessa metodologia, você aluno é o protagonista e centro do processo de ensino, o que lhe permitirá uma aprendizagem ativa, inclusiva e investigativa. Faça um bom uso deste material que apresenta algumas características que irão acelerar a sua aprendizagem como: linguagem dialogada, links interativos, material atualizado e interdisciplinar. Bons estudos e um ótimo semestre.

*"Não é no silêncio que os homens se fazem, mas na palavra, no trabalho, na ação-reflexão."*

(Paulo Freire)



# Estrutura atômica e ligações químicas

## Convite ao estudo

Caros(as) alunos(as), sejam bem-vindos(as) à nossa primeira unidade do livro didático da disciplina de Ciência dos Materiais. Neste livro você será apresentado(a) ao universo das características básicas, propriedades e aplicações de diferentes tipos de materiais que são utilizados em diversos projetos das engenharias: mecânica, produção, civil, química, entre outras áreas do conhecimento. O entendimento dessa ciência lhe permitirá compreender a natureza dos materiais para que você seja capaz de fazer escolhas inteligentes sobre quais os materiais mais adequados para uma determinada aplicação, atendendo às características de desempenho e processamento. Agora vamos pensar um pouco, quais são os materiais mais utilizados pelas indústrias e que fazem parte do nosso cotidiano? É muito fácil, vocês estão lendo esse material e olhando para uma tela de computador, tablet ou smartphone e esses componentes possuem diversas partes feitas de plásticos, ou melhor, polímeros. Mas os polímeros apesar de serem conhecidos há décadas não são materiais tão velhos assim. Agora, se você viajar no tempo, verá que as madeiras, rochas e metais são utilizados desde os primórdios e foram muito importantes para o desenvolvimento das civilizações, tanto que os antropólogos definem as épocas históricas pelos materiais utilizados por diferentes civilizações como a idade da pedra, cobre, bronze e ferro. No mundo contemporâneo um dos grandes desafios de cientistas e pesquisadores é a inovação e o desenvolvimento de novos materiais. Vamos iniciar nossos desafios? Você é um(a) engenheiro(a) recém-formado(a) e conquistou uma vaga de *trainee* na área de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) na montadora de automóveis Nintai, indústria japonesa que pretende expandir sua

atuação no mercado brasileiro. As indústrias automotivas são centros de desenvolvimento de novos materiais, em especial de materiais que combinam resistência mecânica versus densidade. Nesta primeira etapa você será inserido no universo dos materiais, posteriormente conhecerá as diferentes classificações. Mais adiante entenderá a importância da estrutura atômica e por fim compreenderá a importância das ligações químicas para os materiais. Mas esses são apenas alguns exemplos, como diretor da área de P&D da Nintai garanto que teremos muitos outros desafios e lhe pergunto: o que você sabe sobre as pesquisas de novos materiais? Você comprehende a importância da química para os materiais? Conhece as diversas propriedades de polímeros, cerâmicas e metais? E compósitos? Já ouviu falar dessa classe de materiais? Esse é apenas o início da nossa jornada, parabéns pela vaga e seja bem-vindo(a) à nossa equipe. Bom trabalho!

# Seção 1.1

## Introdução à ciência dos materiais

### Diálogo aberto

A ciência dos materiais é uma ciência relativamente nova. O oferecimento de cursos como os de Engenharia de Materiais ou de Tecnólogos são recentes quando comparados, principalmente, as demais engenharias. O primeiro curso de Engenharia de Materiais oferecido na América Latina data menos de cinquenta anos, enquanto o primeiro curso de engenharia oferecido no Brasil foi em 1699, século XVII, por determinação de Dom Pedro II, para que as construções no Brasil Colônia não ficassem totalmente dependentes dos engenheiros vindos de Portugal (BORGES; CANAS, 2005).

Na história da ciência dos materiais encontraremos algumas curiosidades interessantes como a história de Charles Goodyear e a descoberta da borracha vulcanizada que desencadeou na produção dos primeiros pneus e a história de Bibendum. Mas quem foi Bibendum? Bom, essa talvez não seja uma questão tão fácil, mas certamente você o conhece, já o encontrou por aí ou simplesmente o viu quando estava de passagem por algum lugar. É isso mesmo, você certamente já o encontrou em algum lugar.

Agora, para lhe auxiliar em sua pesquisa, nesta seção vamos discutir sobre as perspectivas históricas da ciência dos materiais, definir termos importantes como estrutura e propriedade, apresentar exemplos que correlacionam esses termos e conhecer os principais tipos de materiais. Também veremos que disponibilidade e preço desses recursos são muitas vezes fatores determinantes em um projeto, assim como o processamento e o desempenho desses materiais.

Além deste material, faça o uso das diferentes bibliografias básicas e das bibliografias complementares que estão disponíveis em nossas bibliotecas e explore os periódicos on-line que lhes são disponibilizados gratuitamente.

Hoje é seu primeiro dia na nossa empresa, você como nosso(a) engenheiro(a) trainee terá contato com nossas pesquisas que buscam por novos materiais e inovações na indústria automotiva. O objetivo principal desses estudos é introduzir no mercado

brasileiro um carro que apresente alguns diferenciais dos nossos concorrentes, como segurança, menor custo e baixo consumo de combustível. Neste primeiro dia você fará um levantamento sobre os aspectos históricos da ciência dos materiais e identificará os principais materiais que são consumidos por indústrias do nosso setor. Essa pesquisa será importante para você se familiarizar com o nosso ambiente de trabalho e ter informações suficientes para que em nossa reunião semanal você nos apresente quais são os pilares da ciência dos materiais e os principais tipos de materiais que utilizamos na Nintai.

### Não pode faltar

A utilização dos materiais é notória desde o início da existência humana, é possível imaginarmos como era difícil sobreviver na pré-história. Os primeiros homens conheciam um número limitado de materiais disponíveis na natureza como a madeira, couro, pedras e rochas. Assim, a história da ciência dos materiais coincide com o próprio avanço da humanidade, se olharmos para as antigas civilizações veremos que as denominações mais conhecidas referentes a esse período foram baseadas nos tipos de materiais que eram utilizados nas fabricações de armas e ferramentas. Por exemplo, na Idade da Pedra se utilizavam de pedras e rochas lascadas como armas, como você pode ver na Figura 1.1.

Figura 1.1 | Lança e faca pré-históricas feitas com madeira e pedras



Fonte: <<https://en.wikipedia.org/wiki/Spear>>. Acesso em: 4 jan. 2016.

Já na Idade do Cobre, também conhecido como Período Calcolítico (pedra + cobre), é quando se observa os primeiros traços da utilização desse metal em armas e utensílios. Esse período data de 9.000 a.C. A Figura 1.2 apresenta alguns exemplos de armas que eram utilizadas nesse período da civilização.

Figura 1.2 | Lança e faca datadas do Período Calcolítico



Fonte: <[https://en.wikipedia.org/wiki/Old\\_Copper\\_Complex](https://en.wikipedia.org/wiki/Old_Copper_Complex)>. Acesso em: 4 jan. 2016.

Na Idade do Bronze e do Ferro nossos ancestrais descobriram como produzir suas armas e ferramentas com qualidade superior àquelas que eram produzidas com madeiras, ossos e pedras. Uma observação interessante é que embora não tenhamos a Idade da Cerâmica, a presença de vasos e jarros de barro queimado utilizados como utensílios domésticos são conhecidos desde 3.000 a.C.



#### Pesquise mais

Quer conhecer mais um pouco da história das civilizações e do desenvolvimento dos materiais? Então leia: NAVARRO, R. F. A evolução dos materiais. Parte 1: da pré-história ao início da era moderna. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 1, n. 1, p. 1-11, 2006.

Disponível em: <<https://aplicweb.feevale.br/site/files/documentos/pdf/32246.pdf>>. Acesso em: 4 jan. 2016.

A descoberta e o desenvolvimento de novas técnicas de fabricação e de novos materiais acompanharam a evolução da sociedade. Dessa forma, vamos direto para o século XIX, um período marcado por importantes pesquisas e descobertas nas áreas da química, física, matemática e engenharias. Foram estas pesquisas que nos deram base para os diversos avanços tecnológicos que vimos no século XX e que hoje usufruímos em pleno século XXI. Quer um exemplo? Se não tivéssemos os pneus, como você faria para ir ao trabalho, para faculdade e para as tão sonhadas viagens de férias? Certamente não seria tão rápido e cômodo como é hoje, e devemos essa facilidade aos exaustivos estudos do americano Charles Goodyear que após anos de pesquisa e com muita perseverança, um dia deixou cair acidentalmente uma mistura de borracha

e enxofre em cima de uma chapa quente. Charles observou que essa mistura em contato com a chapa quente não derreteu. Dessa forma, ele concluiu que a adição de enxofre e calor tornavam a borracha mais resistente e assim estudou a relação entre temperatura e tempo de aquecimento para obter uma borracha com melhor qualidade, isto é, uma borracha impermeável. É claro que após essa descoberta outros estudos foram realizados e todo o processo que conhecemos como vulcanização foi aprimorado e patenteado. Porém, apesar de ser detentor de diversas patentes, Charles Goodyear teve uma vida simples, com dificuldades financeiras e faleceu sem colher os louros de sua pesquisa. Uma curiosidade é que a famosa empresa de pneus que leva o sobrenome do pesquisador, a Goodyear, é uma homenagem a Charles. Seus filhos e descendentes jamais fizeram parte da companhia.



### Refletá

Vamos fazer uma pausa e pensar nas palavras deste importante pesquisador:

*"Um homem tem motivos para arrependimento apenas quando ele semeia e ninguém colhe."* Charles Goodyear

*"Eu não estou disposto a reclamar de ter plantado e outros terem reunido os frutos."* Charles Goodyear

Os estudos de Charles sobre vulcanização alavancaram o desenvolvimento de materiais plásticos termofixos a partir da borracha natural. Em 1856, o inglês Alexander Parker patenteou o parkesine, o primeiro plástico sintético utilizado na substituição do marfim.



### Assimile

Na história de Charles Goodyear é importante notar o quanto o desenvolvimento de um novo produto demanda tempo, dinheiro, trabalho e muito estudo até a sua aplicação, e essas são etapas comuns em qualquer pesquisa independente da área do conhecimento.

Já na França, em 1889, os irmãos Édouard Michelin e André Michelin tocavam uma pequena fábrica de borracha, quando um ciclista apareceu precisando de um reparo no pneu de sua bicicleta. Naquela época os pneus eram colados ao aro e este reparo levou, acreditem, três dias já que o pneu reparado era deixado à noite para secar. Então, Édouard ficou tão entusiasmado que convenceu seu irmão, em juntos

desenvolver a sua própria versão de pneus que não precisavam ser coladas ao aro. Em 1891 os irmãos Michelin patentearam os pneus removíveis e três anos mais tarde ao participarem da Exposição Universal de Lyon, Édouard notou que em seu estande os pneus estavam empilhados na forma de um homem sem braços, assim nascia Bibendum, o tão famoso boneco da Michelin (Figura 1.3).

Figura 1.3 | Mascote da Michelin, Bibendum



Fonte: <<https://en.wikipedia.org/wiki/Bibendum>>. Acesso em: 4 jan. 2016.



### Faça você mesmo

A história da ciência dos materiais foi construída graças a cientistas persistentes e corajosos. Que tal você fazer uma pesquisa sobre outras histórias curiosas desse universo?

A ciência dos materiais é definida como o estudo da relação entre as estruturas e propriedades dos materiais. Os cientistas dessa área desenvolvem ou sintetizam novos materiais enquanto o papel do engenheiro é criar novos produtos e procedimentos de fabricação utilizando materiais inovadores ou já conhecidos com propriedades predeterminadas (CALLISTER; RETHWISCH, 2012). É um desafio e tanto! Hoje são conhecidos mais de 50.000 tipos de materiais que estão à nossa disposição para serem aplicados nos mais diversos projetos que possamos imaginar (ASHBY; JONES, 2007). Mas antes é necessário definir o que entendemos como estrutura: de maneira concisa, estrutura de um material relaciona-se ao arranjo dos seus componentes internos, desde o nível atômico e organização dos átomos da escala micro a macroscópica (CALLISTER; RETHWISCH, 2012). Também devemos definir o que é a propriedade de um material: de forma geral, é uma característica do material em termos da magnitude da resposta a um determinado estímulo que lhe é imposto, como, por exemplo, a luz refletida por uma superfície metálica polida (CALLISTER; RETHWISCH, 2012). As propriedades dos materiais são divididas em diferentes grupos: mecânicas, elétricas, ópticas, térmicas e magnéticas.



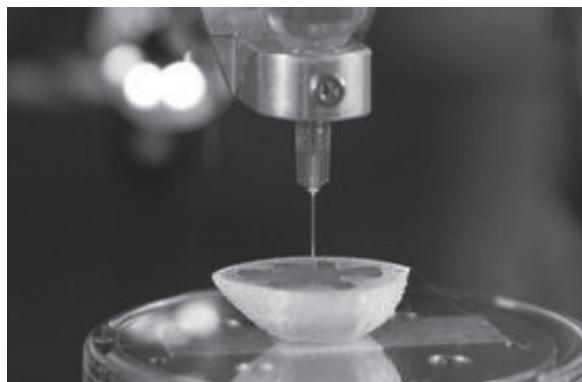
## Exemplificando

A reflexão da luz em uma superfície metálica é uma propriedade óptica do metal, quando desastrosamente derrubamos nosso celular novinho no chão e a tela está trincada ou os cantos amassados estamos falando sobre as propriedades mecânicas dos materiais que são utilizados na fabricação desses aparelhos.

Essas propriedades futuramente serão abordadas em nosso livro didático e você estará apto para analisar as correlações entre as diferentes respostas dos materiais e suas respectivas propriedades. Fique tranquilo!

O desenvolvimento e a pesquisa de novos materiais nos asseguram uma vida mais confortável em termos de qualidade de vida. Você conseguiria viver em mundo sem internet, tecnologias e sem o conforto da sua casa? Eu certamente teria muita dificuldade, mas o fato é que muitos avanços tecnológicos nos proporcionaram uma expectativa de vida maior e melhor. Graças a materiais inovadores conseguimos captar a energia solar e converter em energia elétrica, produzimos meios de transportes cada vez mais velozes e seguros, e é claro que eu não poderia me esquecer dos meios de comunicação e nosso indispensável smartphone. Mas essa tecnologia não é restrita apenas a essas linhas de estudos, na área da saúde, por exemplo, é evidente a importância dos materiais para os projetos de próteses ortopédicas que antes eram produzidas com metais, madeira e plásticos, e agora são substituídos por fibra de carbono. Muitas vezes quando lemos algumas notícias temos a impressão que estamos em um filme de ficção científica, mas a realidade é que já temos impressoras 3D de células-tronco, vasos sanguíneos, pele, cartilagens, ossos e, no futuro próximo, a impressão de órgãos. A Figura 1.4 mostra uma impressora 3D fazendo a impressão de uma prototipagem biológica, enquanto a Figura 1.5 apresenta uma amostra de tecido de válvula cardíaca também impresso utilizando essa mesma tecnologia.

Figura 1.4 | Impressora 3D de prototipagem biológica



Fonte: <<https://healthinformatics.wikispaces.com/3D+Printing>>. Acesso em: 5 jan. 2016.

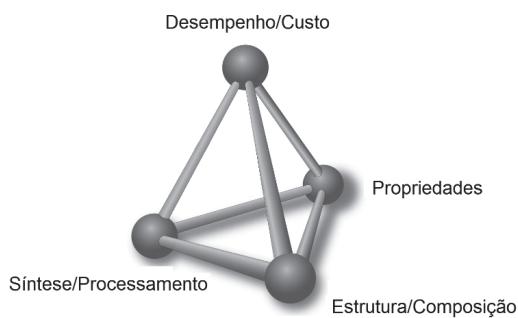
Figura 1.5 | Tecido de válvula cardíaca produzido por uma impressora 3D



Fonte: <[https://en.wikipedia.org/wiki/Tissue\\_engineering](https://en.wikipedia.org/wiki/Tissue_engineering)>. Acesso em: 5 jan. 2016.

Neste momento espero que você esteja se questionando: como é possível descobrir novos materiais ou então inovar os que já conhecemos? E como é possível fabricar componentes, peças e produtos que atendam às necessidades de uma aplicação específica? Se interpretarmos as informações que já temos é possível concluirmos que a procura de um determinado material surge da necessidade do homem, posteriormente, é necessário compreender a estrutura e as propriedades para que possamos estudar outros dois componentes muito importantes, o processamento e o desempenho desses materiais. A Figura 1.6 apresenta os princípios fundamentais da ciência dos materiais, também conhecida como tetraedro da Ciência dos Materiais.

Figura 1.6 | Tetraedro da ciência dos materiais

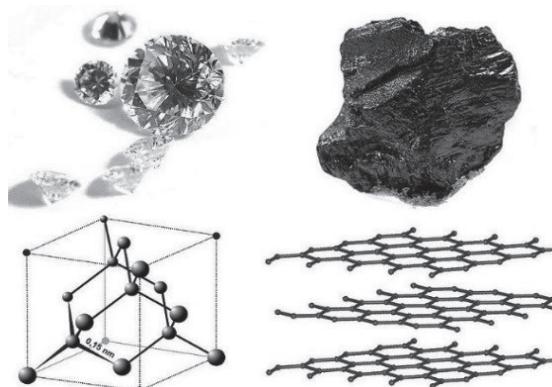


Fonte: <[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Materials\\_science\\_tetrahedron\\_-\\_pt-br.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Materials_science_tetrahedron_-_pt-br.svg)>. Acesso em: 5 jan. 2016.

Assim, é possível observar as inter-relações que devemos considerar em um projeto entre desempenho/custo, síntese/processamento, estrutura/composição e propriedades. Vamos ver um exemplo real de como essas relações são importantes? O diamante e a grafita são materiais compostos exclusivamente por átomos de

hidrogênio e carbono, sendo diferentes apenas em relação ao tipo de ligação intermolecular e ao arranjo espacial, isto é, a estrutura. Isso faz toda diferença! Os diamantes são formados nas profundezas da Terra sob altas temperaturas e pressões extremas e algumas de suas propriedades são: elevada resistência e rigidez, excelente condutividade térmica e baixa condutividade elétrica. Já a grafita, é relativamente macia, apresenta baixa condutividade térmica e elevada condutividade elétrica. A Figura 1.7 apresenta o diamante e a grafite com suas respectivas estruturas atômicas.

Figura 1.7 | Diamante, grafita e seus respectivos arranjos atômicos



Fonte: <[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d9/Diamond\\_and\\_graphite2.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d9/Diamond_and_graphite2.jpg)>. Acesso em: 5 jan. 2016.

E quanto aos custos desses dois materiais? São exatamente o oposto, uma mulher jamais aceitaria um anel de noivado com uma grafita.



### Vocabulário

**Nintai:** palavra de origem japonesa que traduzida para o português significa perseverança, paciência e resistência.

**Trainee:** trai.nee (trēi-nī) s m+f (ingl.) profissional, geralmente recém-formado ou em início de carreira, que passa por um processo de aprendizado prático, numa determinada empresa.

### Sem medo de errar

O tempo realmente voa quando estamos atarefados, não é mesmo? Hoje já é nossa primeira reunião semanal. Você é nosso(a) mais recente *trainee* de P&D e logo

no seu primeiro dia foi lhe dado uma tarefa: fazer um levantamento sobre os aspectos históricos da *Ciência dos Materiais*, identificar os principais materiais que utilizamos aqui na Nintai e reconhecer quais são os pilares que sustentam essa ciência. Portanto, esperamos encontrar na sua apresentação que a *Ciência dos Materiais* surgiu da necessidade do homem em criar novos produtos que de certa maneira melhoraram nossa qualidade de vida. Você deve compreender que o desenvolvimento de um novo produto depende de disciplina, dedicação e perseverança de um cientista e que esses comprometimentos deverão ser transferidos para a vida acadêmica. Ao fazer um levantamento bibliográfico para sua pesquisa deve ter ficado claro que essas fontes precisam ter credibilidade como: artigos científicos publicados em revistas internacionais e nacionais, bibliografias padrão e periódicos. Aliás, como está o seu inglês? Ainda temos muitas referências bibliográficas na área de engenharia que não existem no nosso idioma, as pesquisas mais recentes e de grande impacto no meio acadêmico são publicadas em revistas internacionais. No ensino superior não é aceitável utilizarmos trabalhos prontos de outros estudantes como referência ou então sites que trabalham com conteúdos direcionados aos estudantes do Ensino Médio. Você já passou dessa etapa. Durante seus estudos você foi capaz de identificar os principais materiais que conhecemos e também que são utilizados em uma grande montadora: os materiais metálicos, cerâmicos, poliméricos e compósitos. Esses materiais apresentam características bem distintas uns dos outros que estão alinhadas com o pilar da *Ciência dos Materiais* e nessa altura você já deverá ter concluído que a inter-relação entre processamento, estrutura, propriedades e desempenho é o que permite termos alguns materiais com a mesma composição e que apresentam aspectos físicos, químicos e propriedades tão distintas. Nos seus estudos, além de conhecer histórias de outros pesquisadores que contribuíram para a evolução dos materiais, você compreendeu que o desenvolvimento de um novo produto depende de disciplina, dedicação e perseverança. E será que só o desenvolvimento de um novo material depende disso? Não, esses são comprometimentos que podemos levar para nossa vida pessoal, profissional e principalmente para nossa vida acadêmica. O desenvolvimento tecnológico que usufruímos é fruto de muito tempo de pesquisa e de muita dedicação de muitos cientistas. A lição que você deve ter aprendido é a de ser perseverante.



### Atenção

Saber pesquisar e utilizar boas referências bibliográficas traz credibilidade ao seu trabalho.

Na vida profissional de um engenheiro, participar de reuniões é algo de praxe, sempre teremos projetos, prazos e assuntos para alinhar.



## Lembre-se

A Ciéncia dos Materiais é definida como o estudo da relação entre as estruturas e propriedades dos materiais.

## Avançando na prática

Pratique mais	
<b>Instrução</b>	
Desafiamos você a praticar o que aprendeu transferindo seus conhecimentos para novas situações que pode encontrar no ambiente de trabalho. Realize as atividades e depois compare-as com a de seus colegas.	
<b>Introdução à ciéncia dos materiais</b>	
<b>1. Competéncia geral</b>	Conhecer conceitos que permitam ao aluno selecionar materiais adequados para uma determinada aplicação que atendam características desejadas.
<b>2. Objetivos de aprendizagem</b>	Articular os levantamentos bibliográficos e compor um texto original, identificar as propriedades básicas dos materiais poliméricos que serão aprofundadas futuramente e examinar a inter-relação processamento, estrutura, propriedades e desempenho.
<b>3. Conteúdos relacionados</b>	Análise de fontes bibliográficas, evolução tecnológica da Ciéncia dos Materiais, identificação das diferentes classes de materiais e suas propriedades básicas.
<b>4. Descrição da situação-problema</b>	Você é um engenheiro de materiais e foi contratado para trabalhar em uma indústria de óleos vegetais. Atualmente toda produção de óleos é envasada em frascos de vidro, no entanto, com a economia instável o preço desses frascos aumentaram exponencialmente. Você tem como desafio fazer um levantamento e propor um novo material que substitua as garrafas de vidro nas quais os óleos são envasados. Esse material não pode ter interação com o produto, como, por exemplo, alterar o sabor, deve ser seguro, resistente e de menor custo. Neste momento também é importante pontuar o impacto ambiental desse novo material, é ideal que ele seja reutilizado.
<b>5. Resolução da situação-problema</b>	Ao fazer o levantamento bibliográfico você deverá apresentar fontes confiáveis e conceituadas no meio académico. Após essa verificação, concluir-se que diferentes materiais poliméricos são utilizados para esse fim, com destaque para o policloreto de vinila (PVC). O PVC é um dos polímeros mais estudados devido à sua versatilidade. Suas aplicações vão além da indústria de calçados, embalagens, tubos de conexão, entre outros. Neste caso específico o PVC apresenta toxicidade atendendo às expectativas para o produto. É um material inócuo, apresenta resistência a impactos desejável, boa aparéncia e é um material relativamente barato. Além de todos esses pontos levantados, o PVC é um material 100% reciclável.



### Pesquise mais

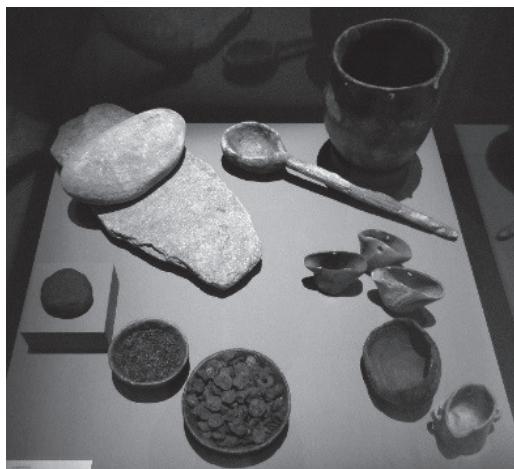
O artigo científico: *Desenvolvimento de PVC reforçado com resíduos de Pinus para substituir madeira convencional em diversas aplicações* traz outras informações quanto às diversas aplicações deste plástico. Este artigo está disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0104-14282006000100005&lng=pt&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-14282006000100005&lng=pt&nrm=iso)>. Acesso em: 22 abr. 2016.

Não deixe de enriquecer o seu conhecimento!

### Faça valer a pena

1. Na história da humanidade é possível identificar a importância de diversos materiais, tanto que alguns períodos importantes das civilizações são denominados de acordo com a utilização do material.

Figura 1.8 | Utensílios domésticos



Fonte: <<https://en.wikipedia.org/wiki/Neolithic>>. Acesso em: 6 jan. 2016.

Analizando a figura acima, assinale a alternativa correta sobre o período da civilização:

- a) Trata-se do período conhecido como a Idade do Bronze.
- b) Os utensílios são datados da Idade do Cobre.
- c) A figura refere-se a objetos do Período Calcolítico.
- d) Os objetos apresentados foram encontrados por arqueólogos e retratam a Idade do Ferro.
- e) A figura apresenta utensílios que eram utilizados na Idade da Pedra.

**2.** A Ciência dos Materiais está para os cientistas e engenheiros como uma paleta de cores está para um artista. Da mesma forma que um pintor pode criar diferentes quadros utilizando e inventando diferentes tons de cores, os pesquisadores podem criar diferentes materiais a partir dos elementos da tabela periódica ou modificar as propriedades de materiais já existentes.

Dessa forma é correto afirmar que os princípios fundamentais da Ciência dos Materiais são:

- a) Processamento, estrutura, propriedades e desempenho.
- b) Processamento, síntese, estrutura e composição.
- c) Processamento, propriedades, desempenho e custo.
- d) Síntese, estrutura, composição e propriedades.
- e) Síntese, estrutura e desempenho.

**3.** Sobre a metodologia científica, Lakatos e Marconi (2007) explanam:



“[...] o conhecimento popular não se distingue do conhecimento científico nem pela veracidade nem pela natureza do objeto conhecido: o que os diferencia é a forma, o modo ou o método e os instrumentos do conhecer.”

Assinale a alternativa correta no que se refere a uma pesquisa científica:

- a) O conhecimento popular se distingue do conhecimento científico pela veracidade de informações.
- b) Os avanços tecnológicos são frutos de ocasionalidades dentro do meio acadêmico.
- c) A pesquisa científica colabora para a melhoria da vida humana e para o desenvolvimento tecnológico.
- d) O conhecimento científico se distingue do conhecimento popular pela origem do objeto conhecido.
- e) A metodologia científica não contempla a sistematização de ideias.

# Seção 1.2

## Classificação dos materiais

### Diálogo aberto

Seja bem-vindo(a), hoje você completa mais uma semana aqui conosco como *trainee*, no laboratório de P&D da Nintai motors. Na semana passada, solicitamos que você fizesse uma pesquisa sobre os pilares fundamentais da *Ciência dos Materiais*: processamento, estrutura, propriedades e desempenho e você compreendeu o quanto importante é a inter-relação entre esses componentes, e percebeu também que uma determinada propriedade de um material está diretamente relacionada com a sua estrutura química, com o processamento e desempenho. Um exemplo que utilizamos foi o diamante e a grafita, você se lembra? Esses materiais são compostos pelos mesmos elementos químicos, mas apresentam ligações intermoleculares e arranjos atômicos diferentes, consequentemente, apresentam propriedades distintas: o diamante, por exemplo, é o material mais duro que conhecemos enquanto a grafita é mole e desgasta facilmente. Neste estudo você aprendeu um pouco da história da *Ciência dos Materiais* e constatou o quanto uma pesquisa demanda tempo, estudo e dedicação. Ao realizar as pesquisas para sua apresentação, você também identificou a importância em utilizar referências bibliográficas confiáveis como livros, artigos científicos publicados em revistas com reconhecimento acadêmico, instituições de ensino renomadas, entre outras. Certamente esse aprendizado será necessário todas as vezes que você precisar fazer um novo trabalho, uma pesquisa ou mesmo aprender algo novo sobre um determinado assunto. Exatamente como faremos agora, a Nintai terá um estande no Salão de Automóveis e precisamos levar inovação. Atualmente os assoalhos dos nossos miniautomóveis são fabricados com chapas de aço, mas o carro está relativamente pesado o que aumenta o consumo de combustível. Você precisa pesquisar alternativas e nos trazer uma proposta de um novo material que possa ser utilizado na substituição do aço para essa aplicação. É muito importante você pensar nas características desse novo material como: quais as propriedades mais interessantes que justificam a substituição? Como produzir esse material? Esses são pontos que deverão fazer parte da sua proposta. Ao longo desta unidade você conhecerá conceitos que lhe permitirão selecionar materiais adequados para uma determinada aplicação, de modo a atender às características de desempenho esperadas, tanto no que se refere às características de serviço quanto aos de processamento. Nessa

pesquisa também será necessário, resumidamente, classificar esse novo material entre os principais tipos metálicos, cerâmicos, poliméricos e compósitos.

Pronto para o trabalho?

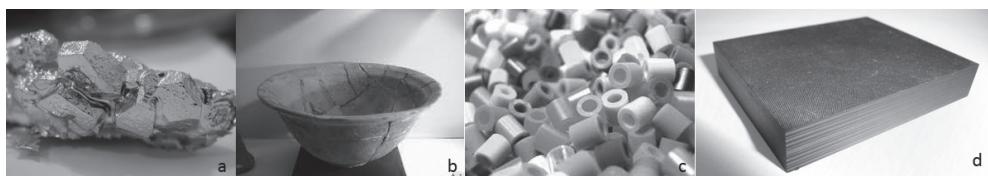
Aproveitamos para lhe desejar uma boa pesquisa e deixamos um pensamento do cirurgião americano Maxwell Maltz:

*"A vida está cheia de desafios que, se aproveitados de forma criativa, transformam-se em oportunidades."*

### Não pode faltar

Existem milhares de materiais disponíveis para uso nas mais variadas aplicações, seja na área das engenharias, da saúde e do nosso cotidiano. A maioria dos materiais que conhecemos são classificados em três grandes classes que têm por base a composição química e as forças de ligações interatômicas. Estas três classificações são metálicos, cerâmicos e poliméricos. No entanto, temos alguns materiais que são a combinação entre dois ou mais materiais diferentes e resultam no que chamamos de compósitos. A Figura 1.9 apresenta, respectivamente, um exemplo de cada tipo de material: a) metálico, b) cerâmico, c) polimérico e d) compósito.

Figura 1.9 | Exemplos de materiais



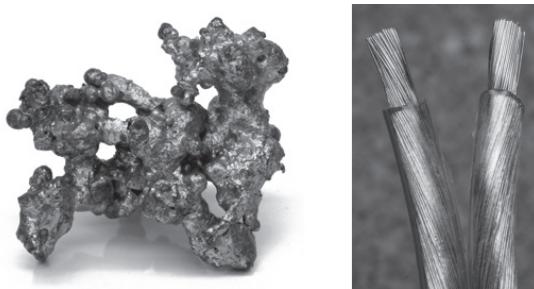
Fonte: <[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/92/Gallium\\_crystals.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/92/Gallium_crystals.jpg)>; <[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/f4/Cattien\\_ceramic\\_bowl.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/f4/Cattien_ceramic_bowl.png)>; <<http://www.coladaweb.com/wp-content/uploads/2014/12/polimeros-545x330.jpg>>; <[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b8/Composite\\_laminate\\_specimen.JPG](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b8/Composite_laminate_specimen.JPG)>. Acesso em 28 set. 2016.

### Metais

Os materiais metálicos representam cerca de dois terços de todos os elementos da tabela periódica e aproximadamente 24% da massa do planeta. Os materiais metálicos são substâncias que podem ser compostas por um único elemento (ferro, zinco, cobre, prata e ouro), ou por mais elementos metálicos como no caso do bronze que é uma liga metálica de cobre e estanho, e ainda conter elementos não metálicos como carbono, nitrogênio e oxigênio. Os metais e suas ligas apresentam muitas propriedades que nos são úteis como resistência mecânica, ductilidade, condutividade térmica e elétrica, entre várias outras e essas propriedades estão relacionadas com a composição, estrutura química e processamento (SHACKELFORD, 2008). Você já se perguntou por que os metais são bons condutores elétricos? É nesse momento

que você compreenderá a importância de estudarmos sobre a estrutura atômica e as ligações entre os átomos. Os metais são bons condutores elétricos, pois possuem muitos elétrons livres, isto é, os elétrons podem se movimentar livremente de um átomo para o outro. A facilidade no movimento desses elétrons livres também faz os metais serem bons condutores de calor. A Figura 1.10 apresenta o cobre encontrado na natureza e já processado como fios.

Figura 1.10 | Cobre nativo e fios de cobre



Fonte: <<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/f0/NatCopper.jpg>> e <[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/19/Lautsprecherkabel\\_Makro\\_nah.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/19/Lautsprecherkabel_Makro_nah.jpg)>. Acesso em 28 set. 2016.



### Assimile

Após o processamento, o cobre (composição/estrutura) já na forma de fios é utilizado como condutor elétrico (propriedades) em redes elétricas (desempenho). Você viu como é possível identificar os fundamentos da Ciência dos Materiais?

As cerâmicas, tradicionalmente, são definidas como um material sólido inorgânico formado entre elementos metálicos e não metálicos. Em sua maioria, são: óxidos como o óxido de alumínio mais conhecido como alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ); nitretos, como o nitreto de silício ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) e carbetas, como o carbeto de silício (SiC). O cimento e o vidro são exemplos de materiais cerâmicos tradicionais e são formados a partir de minerais argilosos e processos de fabricação relativamente simples. Quanto às suas propriedades os cerâmicos comumente exibem baixa condutividade elétrica, elevada dureza, resistência e fragilidade. No entanto, já existem estudos com esses materiais que melhoraram significativamente a resistência à fratura. Adicionalmente, dependendo do processamento, a cerâmica pode ser densa ou leve, transparentes, translúcidas ou opacas (ASKELAND; WRIGHT, 2014). Quando comparados aos metais e polímeros, os materiais cerâmicos são mais resistentes a altas temperaturas e a ambientes severos de trabalho. Então, vamos ver um exemplo de aplicação desses materiais nestas condições extremas: a utilização na construção de ônibus espaciais e aeronaves. Estas aplicações incluem sistemas térmicos de proteção em cones de exaustão do foguete, telhas de isolamento do ônibus espacial, componentes de motor e revestimentos

cerâmicos embutidos no vidro do para-brisa de muitos aviões. Esses revestimentos são transparentes e conduzem a eletricidade para manter o vidro transparente em condições de nevoeiro e gelo. Fibras cerâmicas são utilizadas como isolantes térmicos e escudos de calor contra incêndios em aeronaves e ônibus espaciais. A Figura 1.11 apresenta o ônibus espacial Discovery que foi lançado pela primeira vez em 1984 e sua última missão foi em 2011, com um sistema de proteção térmica que utilizava sílica e outros materiais.

Figura 1.11 | Ônibus espacial Discovery



Fonte: <[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/44/Space\\_Shuttle\\_Challenger\\_\(04-04-1983\).JPEG](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/44/Space_Shuttle_Challenger_(04-04-1983).JPEG)> e <[https://en.wikipedia.org/wiki/Space\\_Shuttle\\_orbiter](https://en.wikipedia.org/wiki/Space_Shuttle_orbiter)>. Acesso 28 set. 2016.

O sistema de proteção térmica da Discovery protegia os passageiros de um frio de -121 °C no espaço e de uma temperatura de reentrada na órbita terrestre de 1.649 °C. Esse é mais um dos exemplos que temos da importância do desenvolvimento de novos materiais.



### Pesquise mais

Quer saber outras aplicações de materiais cerâmicos em ambientes extremos? Leia o artigo disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/ce/v50n316/a0250316.pdf>>. Acesso em: 22 abr. 2016. O artigo trata de materiais cerâmicos para células a combustível.

## Polímeros

Os materiais poliméricos também conhecidos popularmente como plásticos, são materiais mais recentes quando comparados aos metais e cerâmicas. Neste grupo também fazem parte os elastômeros (borrachas). Os polímeros podem ser definidos como um material que possui várias partes quimicamente ligadas, já que a própria palavra polímero significa “muitas partes”. Mas, uma definição mais científica diz que polímeros são compostos orgânicos de elevada massa molecular formados por unidades que se repetem, denominadas meros, formando cadeias de longas extensões (CANEVAROLO, 2006). Normalmente, os polímeros são divididos em classes a partir das suas propriedades mecânicas, estrutura e ligações interatômicas em termoplásticos

(polietileno), termorrígidos ou termofixos (resina epóxi) e elastômeros (neopreno). Esses materiais podem ser de ocorrência natural, como é o caso da borracha, ou sintéticos como o cloreto de polivinila (PVC). Uma das características importantes dos materiais poliméricos é a baixa densidade, assim a relação entre a sua massa específica e sua rigidez são comparadas aos materiais metálicos e cerâmicos. Os polímeros apresentam propriedades que variam consideravelmente, isto é, podemos ter um polímero duro e frágil e outro dúctil e flexível. A baquelite, por exemplo, é um polímero duro, frágil, isolante térmico e devido a essas propriedades é utilizado na produção de cabos de panelas, interruptores, entre outras. Já o polietileno de baixa densidade (PEBD) é um polímero flexível e dúctil e muito utilizado na fabricação de frascos e mangueiras. Assim como os demais materiais, os polímeros são muito importantes para diversas aplicações tecnológicas e são muito atrativos para determinadas aplicações. No entanto, o consumo desenfreado desses materiais resultou em um grave problema ambiental. Muitos plásticos não são recicláveis e muitos outros são descartados de forma incorreta o que gera um acúmulo de lixo nas ruas, rios, florestas e oceanos. Uma simples sacola plástica, em média, leva 400 anos para se decompor na natureza. Podemos ver a quantidade de plásticos e outros lixos que chegam às praias (Figura 1.12).

Figura 1.12 | Poluição oceânica



Fonte: <<https://www.flickr.com/photos/usoceangov/3750090474>>. Acesso em: 18 jan. 2016.

Além do problema sobre o impacto ambiental, outra desvantagem dos materiais poliméricos é a decomposição em temperaturas relativamente baixas.



## Refletá

No nosso país, você acredita que existem políticas públicas que incentivam a reciclagem dos plásticos? Se existem, são eficientes? É o momento de fazermos essa reflexão!

## Compósitos

Um material compósito pode ser definido como a combinação de dois ou mais materiais distintos, cada um com suas propriedades específicas que juntos criam um novo material com combinações de propriedades que não são observadas em um material isolado. O objetivo de desenvolvemos um material compósito é obter um novo material que combine as melhores características dos materiais que os compõem. Esses materiais são possíveis por meio da combinação entre metais, cerâmicas e polímeros. Em sua grande maioria consiste de um material de reforço que apresenta boa resistência mecânica e baixa densidade, envolto por uma matriz de resina colante, geralmente dúctil ou dura, como a resina epóxi (CALLISTER; RETHWISH, 2012).



## Exemplificando

Entenda melhor como fazer um material compósito. O link abaixo é de um vídeo que mostra como fazer o molde de uma peça utilizando fibra de vidro e resina. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=FCQO8t7Zxmw>>. Acesso em: 18 jan. 2016.

A fibra de vidro é um dos exemplos clássicos de materiais compósitos, mas o concreto e os pneus também fazem parte desse tipo de materiais. A fibra de vidro é feita com pequenas fibras de vidros que são envolvidas por uma resina polimérica, esse tipo de material é conhecido como compósito reforçado com fibras. O concreto é um compósito formado pela mistura de cimento (matriz), areia e brita (particulados). Esse tipo de material é denominado compósito reforçado com partículas. Já o carbono/epóxi é conhecido como um compósito estrutural, neste tipo de compósito além das propriedades dos materiais, o projeto geométrico dos elementos estruturais são extremamente importantes. A Figura 1.13 apresenta um laminado carbono/epóxi utilizado na indústria aeronáutica produzido a partir de camadas sobrepostas de mantas de fibra de carbono envolvidas em resina epóxi. Nessa indústria, os laminados compósitos são importantes na substituição de ligas metálicas e exibem excelentes características como rigidez e resistência mecânica, além de suportar em condições de serviço elevadas temperaturas.

Figura 1.13 | Compósito estrutural laminado carbono-epóxi



Fonte: elaborada pelo autor.



### Faça você mesmo

Os materiais compósitos são utilizados nas mais diversificadas situações. Faça uma pesquisa e liste outros tipos de materiais compósitos utilizados na indústria têxtil.

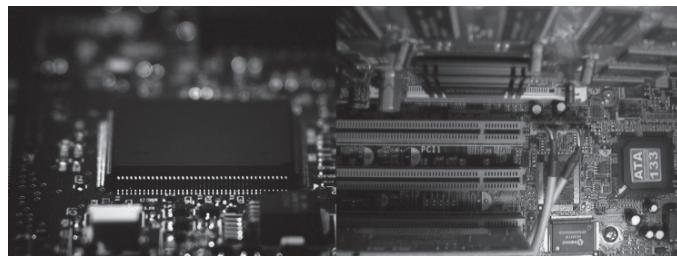
## Materiais avançados

A busca por novos materiais é incessante dentro da *Ciência dos Materiais*, tanto que materiais que são utilizados em aplicações de alta tecnologia são denominados materiais avançados. Normalmente esses materiais nascem da melhoria de algumas propriedades de materiais já existentes e de novos materiais que apresentam alto desempenho. Os materiais avançados podem ser divididos em semicondutores, biomateriais, materiais inteligentes e nanomateriais.

## Semicondutores

Os materiais semicondutores exibem propriedades intermediárias entre os materiais condutores elétricos e isolantes, como a condutividade elétrica. Esses materiais são utilizados na fabricação de vários tipos de dispositivos eletrônicos utilizados em circuitos integrados, dispositivos de potência e sensores ópticos (ASKELAND; WRIGHT, 2014). Os materiais semicondutores foram essenciais para a revolução da indústria de produtos eletrônicos e que impactaram diretamente nossas vidas. A Figura 1.14 apresenta exemplos de circuitos integrados fabricados a partir de materiais semicondutores.

Figura 1.14 | Circuito fabricado com materiais semicondutores



Fonte: <<https://www.flickr.com/photos/yusamoilov/14011462899>>. Acesso em: 19 jan. 2016.

### Biomateriais

Os chamados biomateriais são materiais geralmente feitos a partir de muitos componentes e que podem ser de ocorrência natural ou sintética. Os biomateriais frequentemente são utilizados em aplicações médicas para aumentar, melhorar ou substituir uma função natural. Duas importantes características desses materiais são a toxicidade e compatibilidade com os tecidos do corpo.

### Materiais inteligentes

Os materiais inteligentes são materiais revolucionários e projetados para alterar suas propriedades de forma significativa, a partir de controles externos, tais como temperatura, umidade, pH ou campos magnéticos. Basicamente um material inteligente requer um sensor que será responsável pela detecção do sinal de entrada e um atuador que executará uma determinada função de resposta e adequação. As ligas com memória da forma, as cerâmicas piezoelétricas e os materiais magneto-construtivos são alguns exemplos de materiais utilizados com atuadores.

### Nanomateriais

Os nanomateriais são materiais que podem ser materiais metálicos, cerâmicos, poliméricos ou compósitos que possuem estruturas na ordem do nanômetro (10-9nm) e atualmente são estudados em aplicações na área da saúde, eletrônicos, cosméticos, têxteis e tecnologia da informação.

### Sem medo de errar

Um novo emprego é sempre um grande desafio não é mesmo? O diretor da Nintai garantiu que você terá muitos desafios. Futuramente iremos participar do Salão de Automóveis e nesta semana você ficou encarregado de pesquisar possíveis materiais

que serão utilizados como substitutos das chapas de aço que são utilizadas como assoalhos em nossos miniautomóveis. Quais as propriedades mais interessantes desse novo material e que justifica a substituição? Como produzir esse material? Nessa pesquisa também foi necessário, resumidamente, classificar esse novo material entre os principais tipos metálicos, cerâmicos, poliméricos e compósitos.

Após o levantamento de informações e de várias pesquisas é importante você ter concluído que a utilização de materiais compósitos em automóveis é crescente e uma realidade que já vivemos. Um dos materiais que poderiam substituir as chapas de aço é o laminado carbono-epóxi. Este material é classificado como um material compósito. Os materiais compósitos laminados com resina epóxi são materiais que apresentam baixa densidade quando comparados às chapas de aço, ao mesmo tempo que oferecem uma excelente resistência mecânica e dureza, assim como um bom desempenho sob condições de fadiga. São materiais que resistem a temperaturas relativamente altas, apresentam boa resistência química e estabilidade térmica. As baixas densidades desses materiais resultam em automóveis mais leves e consequentemente mais econômicos quando pensamos no consumo de combustível, o que justifica a substituição das placas de aço como assoalhos de carros.



### Atenção

O artigo intitulado: *Inspeção termográfica de danos por impacto em laminados de matriz polimérica reforçados por fibras de carbono* de TARPANI, J. R. et al. apresenta um estudo de materiais compósitos utilizados na indústria aeronáutica avaliados por termografia do infravermelho. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0104-14282009000400012](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-14282009000400012)>. Acesso em: 20 jan. 2016.

Esses materiais compósitos com matriz polimérica utilizam de um material de reforço, neste caso a manta de fibra de carbono envolta em uma matriz polimérica, a resina epóxi. As camadas de manta de carbono são dispostas com determinadas orientações para que tenhamos as propriedades desejadas, principalmente baixa densidade e resistência mecânica ao impacto. No entanto, existem outros materiais compósitos que poderiam ser utilizados como o laminado de matriz termoplástica reforçado com fibras de carbono denominadas laminados PPS-C.



### Pesquise mais

O vídeo do link abaixo apresenta a fabricação de materiais compósitos. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=kW4SI-d-8b8>>. Acesso em: 20 jan. 2016.

A utilização de materiais compósitos não se restringe apenas a indústrias que são verdadeiros centros de desenvolvimento de pesquisa e inovação como as indústrias automobilísticas e aeronáuticas. São materiais que são utilizados em indústrias têxtil, em construções civis no reparo e reforço de estruturas, na construção de viadutos, passarelas e pontos, na fabricação de hastes de óculos, entre outros. Parabéns pelas conclusões, este desafio fez você novamente pensar nos pilares da *Ciência dos Materiais*.

### Avançando na prática

Pratique mais	
Instrução	Classificação dos materiais
<b>1. Competência geral</b> Desafiamos você a praticar o que aprendeu transferindo seus conhecimentos para novas situações que pode encontrar no ambiente de trabalho. Realize as atividades e depois compare-as com a de seus colegas.	Conhecer conceitos que permitam ao aluno selecionar materiais adequados para uma determinada aplicação que atendam características desejadas.
<b>2. Objetivos de aprendizagem</b>	Selecionar e identificar materiais com baixa densidade e boa propriedade mecânica, articular informações obtidas em pesquisas e observar o tetraedro da <i>Ciência dos Materiais</i> .
<b>3. Conteúdos relacionados</b>	Estrutura, propriedades, processamento e desempenho de materiais. Seleção de materiais de baixa densidade.
<b>4. descrição da situação-problema</b>	Você como um apaixonado(a) por carros resolveu fazer uma adaptação dos componentes internos do seu automóvel, principalmente na disposição dos alto-falantes traseiros. Um dos seus amigos que trabalha contigo, sugeriu que você construisse uma peça de madeira ou então contratasse um marceneiro que facilmente poderia fazer esse serviço. No entanto, você pouco domina a arte da marcenaria e não tem o dinheiro suficiente para encomendar a peça neste momento. Como você poderia fazer essa adaptação? Qual material poderia ser utilizado?
<b>5. Resolução da situação-problema</b>	Ao realizar uma pesquisa na internet é possível identificar vários materiais compósitos, como os compósitos de fibra de carbono, a própria madeira que é considerada um compósito natural e a fibra de carbono. Neste caso, poderíamos excluir a madeira, já que não temos o dinheiro para pagar a encomenda da peça e tampouco conhecemos a arte da marcenaria; nossas opções são os compósitos com fibra de carbono e a fibra de vidro. Neste momento, ao pesquisarmos como os compósitos com fibras de carbono são feitos precisaríamos criar vácuo e o processo de fabricação é mais complicado do que o processo da fibra de vidro. A fibra de vidro é um material versátil e utilizado em diversas aplicações. Esse material é muito utilizado na confecção de componentes para automóveis.

Anos atrás esse material era muito utilizado nos carros de fórmula 1 e foi sendo substituído pela fibra de carbono, já que esta segunda apresenta maior resistência mecânica. No nosso carro, a fibra de vidro é o material mais indicado. Primeiramente é necessário medir as dimensões da peça que será inserida no automóvel, posteriormente você deverá desenhar essas medidas em um bloco de espuma que será esculpida a peça. Nessa espuma será utilizado um spray desmoldante e posteriormente será aplicada a resina que ficará em repouso até completa secagem. Esse passo será repetido algumas vezes de acordo com a resina que será utilizada e a indicação do fabricante. Adicionalmente a fibra de vidro será encharcada pela resina e colocada sob a resina seca. A fibra de vidro será adicionada até a espessura desejada da peça. Finalmente é aplicada uma camada lisa de massa de fibra de vidro que posteriormente será lixada. A fibra de vidro é um material leve, de baixa densidade, de custo relativamente baixo e que possui boa resistência mecânica e resistência ao impacto – o material ideal para confecção da peça que será adaptada no seu automóvel. A fibra de vidro pode ser utilizada em outras várias aplicações.

### Faça valer a pena

**1.** O pilar da *Ciência dos Materiais*, também conhecido como o tetraedro dessa ciência apresenta a inter-relação entre processamento, estrutura, propriedade e desempenho. A partir desses componentes os materiais são comumente divididos em quatro grandes grupos.

Assinale a alternativa que apresenta as principais classificações dos materiais:

- a) Metais, cerâmicas e condutores.
- b) Metais, polímeros, cerâmicas e compósitos.
- c) Metais, cerâmicas, polímeros e elastômeros.
- d) Laminados, polímeros, metais e compósitos.
- e) Polímeros, elastômeros, compósitos e laminados.

**2.** Os materiais cerâmicos são utilizados em diversas aplicações, desde um simples utensílio doméstico, como uma xícara, à utilização como revestimento de ônibus espaciais.

Assinale a alternativa correta que melhor define essa classe de materiais:

- a) São materiais sólidos inorgânicos formados entre átomos de metais.
- b) São materiais sólidos orgânicos formados entre átomos de metais e não metais.

- c) São materiais sólidos inorgânicos formados entre elementos metálicos e gases nobres.
- d) São materiais sólidos inorgânicos formados entre elementos metálicos e não metálicos.
- e) São materiais sólidos orgânicos formados entre elementos metálicos e não metálicos.

**3.** Em um dos períodos das antigas civilizações, um determinado material passou a ser utilizado na fabricação de armas e utensílios, e hoje sabemos que esses materiais correspondem a aproximadamente um quarto da massa do planeta.

O trecho refere-se a qual classe de materiais?

- a) Cerâmicos
- b) Plásticos
- c) Semicondutores
- d) Compósitos
- e) Metálicos

# Seção 1.3

## O átomo e sua estrutura

### Diálogo aberto

Olá, seja novamente bem-vindo(a) aos nossos estudos sobre a *Ciência dos Materiais*. Ao iniciarmos nossa unidade de ensino, vimos que a *Ciência dos Materiais* está pautada na inter-relação entre composição, processamento, propriedades e desempenho. Você compreendeu que não é possível desenvolver um novo material sem antes pensar em todos esses componentes e este desenvolvimento, demanda disciplina, foco e dedicação que são características importantes encontradas em bons alunos e bons profissionais. Em uma segunda etapa, aprendemos que os materiais são classificados em quatro grandes grupos: metais, cerâmicas, polímeros e compósitos. Sucintamente, podemos dizer que os metais são substâncias formadas por um único elemento metálico, ou então, por mais de um elemento metálico, o qual denominamos de liga metálica. Os materiais cerâmicos são sólidos inorgânicos formados entre elementos metálicos e não metálicos. Já os polímeros são compostos orgânicos de elevada massa molecular e cadeias de longa extensão formadas por mero, enquanto os compósitos são definidos como a combinação de dois ou mais materiais que resultam em determinadas propriedades. A compreensão da *Ciência dos Materiais* lhe permitirá selecionar materiais adequados para uma determinada aplicação, de modo a atender às características de desempenho esperadas, tanto no que se refere às características de serviço quanto aos de processamento.

Mas agora lhe pergunto: por que esses materiais, algumas vezes, são tão diferentes e exibem propriedades opostas como os metais e as cerâmicas? A resposta a essa questão está nos estudos das ligações interatômicas e dos arranjos geométricos dos átomos. No entanto, nesta seção vamos fazer uma breve revisão sobre a estrutura atómica para termos uma base sólida e assim, compreendermos como a estrutura atómica afeta as propriedades, o comportamento e as aplicações dos materiais.

Vamos ao trabalho: nesta semana, como parte do projeto que a Nintai apresentará no Salão de Automóveis, precisamos entender um pouco mais sobre estrutura atómica. Você como nosso(a) *trainee* de P&D está preparado para nos explicar qual a composição de um átomo? Existe diferença entre peso atómico e massa atómica? Na *Ciência dos Materiais* é importante o estudo de todos os modelos atómicos? O que

significa dizer que um átomo se encontra no seu estado fundamental? Ao final desta seção você deverá ser capaz de responder a todos esses questionamentos para que possamos compreender o primeiro componente que estudaremos do tetraedro da Ciéncia dos Materiais: COMPOSIÇÃO/ESTRUTURA.

Bons estudos!

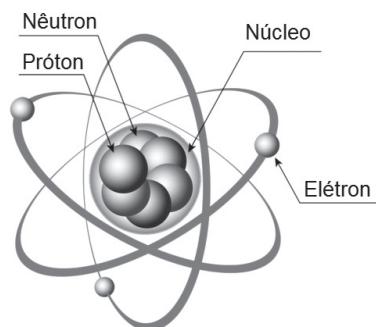
## Não pode faltar

Um átomo é composto por um núcleo muito pequeno onde elétrons em movimento orbitam à sua volta. O núcleo é formado por partículas subatômicas denominadas nêutrons e prótons. Os nêutrons, como o próprio nome sugere, são partículas eletricamente neutras enquanto os prótons e elétrons transportam, respectivamente, cargas elétricas positivas e negativas. A carga elétrica transportada por cada elétron e próton é igual a  $1,60 \times 10^{-19}$  coulomb (C). Neste momento é fácil compreendermos que os elétrons se mantêm ao redor do núcleo devido à atração eletrostática, isto é, prótons e elétrons apresentam cargas elétricas opostas que se atraem.

Os prótons e nêutrons apresentam massas extremamente pequenas na ordem de  $1,67 \times 10^{-27}$  kg, enquanto os elétrons apresentam uma massa menor ainda de  $9,11 \times 10^{-31}$  kg.

A quantidade de números de prótons no núcleo é chamada de número atômico (Z). Por exemplo, um átomo de zinco possui 30 prótons no seu núcleo, assim seu número atômico é igual a 30. Vale ressaltar que quando temos um átomo eletricamente neutro a quantidade de prótons é igual a quantidade de elétrons, isto é, a quantidade de cargas positivas é igual a quantidade de cargas negativas e o átomo permanece neutro. A Figura 1.15 apresenta uma representação esquemática da composição de um átomo.

Figura 1.15 | Representação esquemática de um átomo



Fonte: adaptado de <<http://www.aboutthemcat.org/chemistry/atomic-structure.php>>. Acesso em: 4 fev. 2016.

Outro conceito importante que certamente você já ouviu nos seus estudos em química geral é o de massa atômica ( $A$ ). A massa atômica é a massa total de prótons e nêutrons que estão no núcleo do átomo. No entanto, na natureza é possível encontrarmos elementos que embora possuam o mesmo número de prótons, apresentam número de nêutrons diferentes (ATKINS; JONES, 2006). Na Figura 1.16 é possível observarmos que os três átomos possuem em comum o mesmo número de prótons ( $p^+$ ), ou seja, o mesmo número atômico ( $Z$ ). Assim, trata-se de três átomos do elemento químico hidrogênio. Os átomos de hidrogênio podem ser encontrados com números diferentes de nêutrons e que resultarão em massas atômicas distintas. Esses átomos são chamados de isótopos. A Figura 1.16 apresenta, respectivamente, o átomo de hidrogênio chamado de próton com apenas um próton no núcleo e a ausência total de nêutron. No centro da figura temos o hidrogênio deutério que possui um próton e um nêutron no núcleo. E, por fim, o átomo de hidrogênio tritio com um próton e dois nêutrons no núcleo.

Figura 1.16 | Representação esquemática dos átomos de hidrogênio: próton, deutério e tritio



Fonte: adaptada de <<http://www.aboutthemcat.org/chemistry/atomic-structure.php>>. Acesso em: 4 fev. 2016.



### Assimile

Isótopos são átomos do mesmo elemento químico que possuem o mesmo número atômico, isto é, o mesmo número de prótons e diferentes massas atômicas.

Após compreendermos os conceitos de número atômico e massa atômica fica mais claro assimilarmos o conceito de peso atômico. Segundo Callister e Rethwisch (2012) o peso atômico é definido como a média ponderada das massas dos isótopos de um átomo que ocorrem naturalmente. A unidade de massa atômica (uma) é definida a partir do isótopo mais comum do átomo de carbono, o carbono 12 ( $\text{C}^{12}$ ) e equivale a 1/12 de sua massa atômica. A Equação 1.1 apresenta a relação entre massa atômica ( $A$ ), número atômico ( $Z$ ) e nêutrons ( $N$ ).

$$A \cong Z + N \quad (1.1)$$

Já o peso atômico pode ser expresso pela razão entre uma e átomo ou molécula, no entanto, é frequentemente especificado em termos de massa (em gramas) por mol de matéria. Assim temos a equivalência:

$$1 \text{ uma/átomo} = 1 \text{ g/mol}$$

O número de átomos ou moléculas em um mol é igual a  $6,023 \times 10^{23}$  e é chamado de *número de Avogadro*. Vamos ver a aplicação desses conceitos? Em um mol de prata (Ag), número atômico igual a 47, temos  $6,023 \times 10^{23}$  átomos e 107,87 g ou 107,87 uma. Os cálculos de massa atômica e *número de Avogadro* são importantes para compreendermos um pouco mais sobre as estruturas e as propriedades dos materiais.



### Exemplificando

Será que é possível calcularmos a quantidade de átomos em uma amostra de 100 g de cobre? Para chegar a resolução desse problema basta montarmos uma regra de três simples. Utilizando a tabela periódica encontramos o valor de massa atômica do cobre igual a 63,55 g em  $6,023 \times 10^{23}$  átomos. Assim é só calcularmos para 100g:

$$\text{Número de átomos de Cu} = \frac{(100\text{g}).(6,023 \times 10^{23} \text{ átomos / mol})}{63,55\text{g / mol}} = 9,48 \times 10^{23}.$$

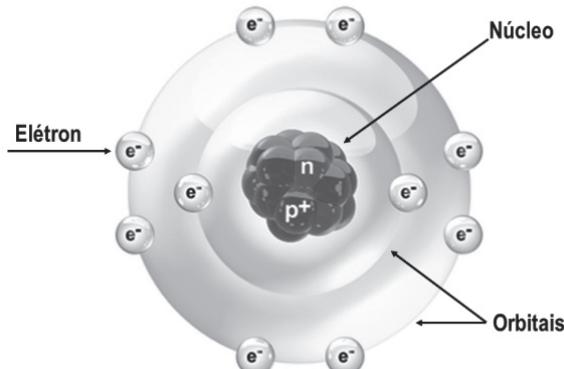


### Faça você mesmo

Agora é a hora de você praticar: utilizando o problema anterior como guia, calcule o número de átomos em amostras de 100 g de ferro e silício.

Agora que já entendemos a composição atômica, veremos a importância de alguns modelos atômicos para a compreensão da *Ciência dos Materiais*. O modelo atômico mudou ao longo do tempo, por séculos diversos cientistas se engajaram no estudo do átomo e propuseram diferentes modelos, que de alguma maneira, contribuíram para chegarmos ao modelo atual. Para compreendermos as propriedades dos materiais, partiremos direto para o modelo atômico proposto pelo físico dinamarquês Niels Henrik David Bohr, responsável por contribuições fundamentais para o entendimento da estrutura atômica e um dos precursores da teoria quântica. No modelo atômico de Bohr os elétrons se movimentam ao redor do núcleo em orbitais distintos e bem definidos como apresentado na Figura 1.17 que traz uma representação do átomo de neon (Ne) que possui número atômico igual a 10.

Figura 1.17 | Modelo atômico de Bohr para o átomo de neon (Ne)



Fonte: adaptado de <[https://en.wikipedia.org/wiki/Discovery\\_of\\_the\\_neutron](https://en.wikipedia.org/wiki/Discovery_of_the_neutron)>. Acesso em: 5 fev. 2016.

Nesse modelo é possível quantizar valores específicos de energia para os elétrons. No modelo de Bohr o elétron pode absorver energia e realizar um salto quântico para um nível (órbita) permitido de maior energia, assim como através da emissão de energia saltar para um nível permitido de menor energia. Esse modelo atômico foi a primeira tentativa em descrever o comportamento dos elétrons nos átomos em relação à sua posição e energia. Naturalmente, o modelo de Bohr foi substituído por não explicar vários outros comportamentos relacionados aos elétrons. Mais tarde, Louis de Broglie sugeriu o Princípio da Dualidade que diz que todo elétron possui tanto características de partículas quanto de ondas. Nesse modelo o elétron não se movimenta mais em um orbital distinto como uma partícula, o movimento do elétron está associado a um determinado comprimento de onda. Posteriormente Heisenberg enunciou o Princípio da Incerteza que sucintamente diz que não é possível determinar a posição e a velocidade do elétron simultaneamente. Finalmente em 1926, Erwin Schrödinger propôs a famosa Equação de Schrödinger na qual é possível calcular a máxima distribuição de probabilidades de se encontrar a posição de um elétron (ATKINS; JONES, 2006).



### Pesquise mais

Quer saber mais sobre a equação de Schrödinger, leia o artigo intitulado: *Quatro alternativas para resolver a equação de Schrödinger para o átomo de hidrogênio*. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-40422002000100025](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422002000100025)>. Acesso em: 5 fev. 2016.

Além da equação que nos permite calcular a probabilidade de determinar a posição de um elétron, Schrödinger propôs que cada elétron é especificado por um conjunto

de quatro parâmetros denominados números quânticos. Estes números descrevem o estado de um elétron, sua distância a partir do núcleo, orientação espacial e o tipo de orbital onde é provável encontrá-lo. São quatro os números quânticos: número quântico principal ( $n$ ) indica a distância mais provável do elétron em relação ao núcleo, isto é, o nível de energia e pode assumir valores iguais a  $n = 1, 2, 3, 4, 5, 6$  e  $7$ . Quanto maior o valor de  $n$ , mais distante o elétron estará do núcleo e maior será o tamanho do átomo e do orbital. Esse é o único número quântico que está vinculado ao modelo atômico de Bohr. O segundo número quântico ou número quântico do momento angular do orbital para cada valor de  $l$  indica um subnível de energia específico s, p, d e f que está limitado ao valor do número quântico principal. O terceiro número quântico ou número quântico magnético ( $m_l$ ) indica o número de orbitais e a da orientação dentro dos subníveis. Dado um valor de  $l$ ,  $m_l$  será um intervalo entre  $-l$  a  $+l$ . Os estados energéticos (orbitais) são representados graficamente por  $\square$ . Nos subníveis de energia s, p, d e f existem, respectivamente, um, três, cinco e sete estados energéticos. Ao contrário do terceiro número quântico, o número quântico magnético de spin ( $m_s$ ) ou quarto número quântico não depende dos outros números quânticos. Ele designa a orientação de spin de cada elétron que pode ter uma rotação de  $+1/2$ , representado por  $\uparrow$ , ou  $-1/2$  representado por  $\downarrow$ . Ao preenchermos os orbitais é importante adotarmos a Regra de Hund que enuncia: todos os elétrons com rotação  $+1/2$  devem ser, primeiramente, distribuídos. Posteriormente, os elétrons com rotação  $-1/2$  são emparelhados dentro do orbital. Para compreendermos a maneira de preencher os diferentes estados eletrônicos com os elétrons é necessário utilizarmos outro conceito quântico conhecido como o Princípio da Exclusão de Pauli, segundo esse princípio cada estado eletrônico comporta no máximo dois elétrons com spins opostos. Dessa maneira os subníveis de energia s, p, d e f comportam, respectivamente, dois, seis, dez e quatorze elétrons. A Tabela 1.1 apresenta os subníveis de energia,  $l$ ,  $m_l$ , número de orbitais, elétrons por subnível e representação gráfica dos orbitais.

Tabela 1.1 | Subníveis de energia e números quânticos do momento angular do orbital ( $l$ ) e número quântico magnético ( $m_l$ )

Subnível de energia	$l$	$m_l$	Número de orbitais	Elétrons por subnível	Representação gráfica dos orbitais
s	0	0	1	2	$\square$
p	1	-1, 0, +1	3	6	$\square\square\square$
d	2	-2, -1, 0, +1, +2	5	10	$\square\square\square\square\square$
f	3	-3, -2, -1, 0, +1, +2, +3	7	14	$\square\square\square\square\square\square\square$

Fonte: elaborada pelo autor.



### Refletá

Quais são os quatro números quânticos que caracterizam o elétron de maior energia do átomo de nitrogênio ( $Z=7$ )?

A representação do modo que os elétrons estão distribuídos em níveis e subníveis de energia é conhecida como configuração eletrônica. Geralmente, a configuração eletrônica é utilizada para descrever os orbitais de um átomo no seu estado fundamental, isto é, quando os elétrons ocupam os níveis de menores energias possíveis. Muitas propriedades físicas e químicas dos elementos estão correlacionadas com suas respectivas configurações eletrônicas. Os elétrons de valência, por exemplo, são os elétrons na camada (nível de energia) mais externa e são o fator determinante de cada elemento químico ser único. A ordem crescente dos níveis de energia preenchidos pelos elétrons é igual a: 1s, 2s, 2p, 3s, 3p, 4s, 3d, 4p, 5s, 4d, 5p, 6s, 4f, 5d, 6p, 7s, 5f, 6d e 7p. No entanto, não é necessário decorarmos essa ordem, uma maneira mais simples e fácil é utilizar o diagrama de energia de Pauling.



### Lembre-se

O diagrama de energia de Pauling foi um dos conteúdos tratados na disciplina Química Geral e Experimental, dê uma olhada nesse material.

A configuração eletrônica de cada elemento químico é única para cada posição da tabela periódica. Nela, o nível de energia é designado pelo período enquanto o número de elétrons é dado pelo número atômico. A tabela periódica é uma ferramenta incrivelmente útil na qual os elementos químicos estão ordenados pelo número atômico, configuração eletrônica e propriedades químicas. Essa ordenação mostra a tendência periódica, os elementos de uma mesma coluna, por exemplo, exibem comportamentos e propriedades semelhantes. A Figura 1.18 apresenta uma tabela periódica moderna já com o novo elemento químico, sintetizado em laboratório, o unonócio (Uuo) com número atômico igual a 118.

Figura 1.18 | Tabela periódica moderna

Grupo →	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
↓ Período	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
	1 H																	2 He
1		3 Li	4 Be										5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
2													13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
3	11 Na	12 Mg																
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba		72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra		104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Uut	114 Fl	115 Uup	116 Lv	117 Uus	118 Uuo
Lantanideos																		
Actinideos																		
	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu			
	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr			

Fonte: <[https://pt.wikipedia.org/wiki/Tabela\\_per%C3%ADodica](https://pt.wikipedia.org/wiki/Tabela_per%C3%ADodica)>. Acesso em: 6 fev. 2016.

A tabela periódica pode ser utilizada para obter relações entre as propriedades dos elementos, e prever as propriedades de novos elementos que ainda não foram descobertos ou sintetizados.

### Sem medo de errar

Chegamos ao final de mais um dia, como nosso *trainee* de P&D da Nintai indústria automobilística, você foi desafiado a responder questões importantes para a compreensão futura dos diversos materiais. Para tanto, iniciamos nossos estudos pelo átomo e sua estrutura atômica, passando pelos modelos atómicos de Bohr e mecânico-ondulatório, números quânticos, configuração eletrônica e finalmente pela tabela periódica. Após os estudos desses temas, você deveria responder: qual a composição de um átomo? Existe diferença entre peso atômico e massa atômica? Na *Ciência dos Materiais* é importante o estudo de todos os modelos atómicos? O que significa dizer que um átomo se encontra no seu estado fundamental? Neste momento você já é capaz de concluir que:

- O átomo é formado por um núcleo muito pequeno no qual elétrons em movimento orbitam à sua volta devido à atração eletrostática. Esse núcleo é formado por partículas subatômicas denominadas nêutrons e prótons. Os nêutrons são partículas eletricamente neutras, enquanto os prótons e elétrons possuem, respectivamente, cargas elétricas positivas e negativas.
- Massa atômica é a massa total de prótons e nêutrons que estão no núcleo do átomo, enquanto peso atômico é definido como a média ponderada das massas dos isótopos de um átomo que ocorrem naturalmente. Isótopos são elementos que apresentam o mesmo número de prótons e diferentes números de nêutrons.
- Todos os modelos atómicos contribuíram de alguma maneira para chegarmos no modelo atômico atual. Na *Ciência dos Materiais* destacam-se o estudo do modelo atômico de Bohr e o modelo mecânico-ondulatório. Esses modelos são importantes para caracterizarmos os elétrons a partir do conjunto dos quatro números quânticos. Os números quânticos descrevem o estado de um elétron, sua distância a partir do núcleo, orientação espacial e o tipo de orbital onde é provável encontrá-lo. O número quântico principal ( $n$ ) indica a distância mais provável do elétron em relação ao núcleo, o número quântico do momento angular do orbital ( $l$ ) que determina a forma do orbital, o número quântico magnético ( $m_l$ ) que indica o número de orbitais e a da orientação dentro dos subníveis e o número quântico magnético de spin ( $m_s$ ) que designa a orientação de spin de cada elétron.
- Quando dizemos que um átomo se encontra no seu estado fundamental estamos dizendo que os elétrons ocupam os níveis de menores energias possíveis.



### Pesquise mais

O vídeo do link abaixo apresenta uma explanação sobre os números quânticos. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=Od9wlu0y2vl&list=PLksgsMD1sK6JU73GRyKhVqs8YKTXfh7OH&index=3>>. Acesso em: 20 jan. 2016.

A compreensão do átomo e da estrutura atômica nos forneceu um alicerce sólido para que possamos prosseguir nos estudos da *Ciência dos Materiais*. Novamente, parabéns pelo trabalho desenvolvido nesta seção e pela sua dedicação.

### Avançando na prática

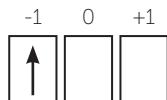
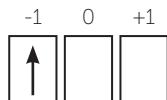
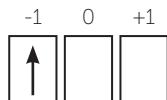
#### Pratique mais

##### Instrução

Desafiamos você a praticar o que aprendeu transferindo seus conhecimentos para novas situações que pode encontrar no ambiente de trabalho. Realize as atividades e depois compare-as com a de seus colegas.

##### O átomo e sua estrutura

<b>1. Competência geral</b>	Conhecer conceitos que permitam ao aluno selecionar materiais adequados para uma determinada aplicação que atendam características desejadas.
<b>2. Objetivos de aprendizagem</b>	Identificar as estruturas do átomo; compreender os conceitos de massa e peso atômico; aplicar e analisar a configuração eletrônica e apontar os quatro números quânticos.
<b>3. Conteúdos relacionados</b>	Modelos atômicos e tabela periódica.
<b>4. Descrição da situação-problema</b>	Uma concorrente da Nintai divulgou na imprensa que os carros fabricados em 2016 terão carrocerias 100% de alumínio. Como é formado o átomo de alumínio no seu estado fundamental? É possível determinarmos a sua configuração eletrônica? E os quatro números quânticos?
<b>5. Resolução da situação-problema</b>	Utilizando uma tabela periódica extraímos algumas informações importantes do átomo de alumínio. O alumínio tem número atômico igual a 13, consequentemente, no seu estado fundamental possui 13 prótons e 13 elétrons. Também é possível verificar que o alumínio possui massa atômica igual a 26,98 uma ou 26,98 g/mol. Conhecendo o número atômico é possível realizarmos a sua respectiva configuração eletrônica utilizando o diagrama de energia de Pauling. Assim temos: $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^1$ A partir da distribuição eletrônica é possível determinarmos os quatro números quânticos: Número quântico principal ( $n$ ) = 3 (O nível de energia mais externo é o nível 3).

	<p>Número quântico do momento angular do orbital (<math>l</math>) = 1 (Na distribuição eletrônica observa-se que o subnível de maior energia é o subnível <math>p</math> que possui valor igual a 1).</p> <p>Número quântico magnético (<math>m_l</math>) = -1 (Sabemos que o subnível <math>p</math> possui 3 orbitais. No átomo de alumínio o subnível <math>p</math> apresenta apenas 1 elétron, dessa forma ao preenchermos os orbitais, obedecendo a Regra de Hund temos apenas 1 elétron).</p> <table style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td style="text-align: center;">-1</td><td style="text-align: center;">0</td><td style="text-align: center;">+1</td></tr> <tr> <td></td><td></td><td></td></tr> </table> <p>Número quântico magnético de spin (<math>m_s</math>) = +1/2</p>	-1	0	+1			
-1	0	+1					
							

### Faça valer a pena

**1.** Os átomos são compostos por partículas subatômicas.

Assinale a alternativa correta que apresenta a partícula subatômica que possui carga elétrica positiva.

- a) Prótons
- b) Elétrons
- c) Nêutrons
- d) Núcleo
- e) Prótons e nêutrons

**2.** Complete as lacunas da frase:

Os \_\_\_\_\_ e \_\_\_\_\_ apresentam massas extremamente pequenas na ordem de  $1,67 \times 10^{-27}$  kg, enquanto os \_\_\_\_\_ apresentam uma massa menor ainda de  $9,11 \times 10^{-31}$  kg.

- a) nêutrons, elétrons, prótons
- b) elétrons, nêutrons, prótons
- c) prótons, elétrons, nêutrons
- d) elétrons, prótons, nêutrons
- e) prótons, nêutrons, elétrons

**3.** Os átomos de hidrogênio conhecidos como prótio, deutério e trítio são isótopos, isto é, apresentam o mesmo número de prótons.

Neste caso é correto afirmar:

- a) O átomo de hidrogênio deutério possui um próton e dois nêutrons no núcleo.
- b) O átomo de hidrogênio prótio possui um próton e dois nêutrons no núcleo.
- c) O átomo de hidrogênio trítio possui dois prótons e um nêutron no núcleo.
- d) O átomo de hidrogênio deutério possui dois prótons e um nêutron no núcleo.
- e) O átomo de hidrogênio trítio possui um próton e dois nêutrons no núcleo.



# Seção 1.4

## Ligações químicas e forças intermoleculares

### Diálogo aberto

Caro(a) aluno(a), seja bem-vindo(a) à nossa última seção da Unidade 1 de *Ciência dos Materiais*. Nesta unidade você foi apresentado(a) ao estudo dos materiais e entendeu a importância de uma boa pesquisa bibliográfica, o quanto é importante a dedicação para se obter sucesso e conheceu a história de perseverança de alguns pesquisadores importantes para essa ciência. Você compreendeu que a *Ciência dos Materiais* está estruturada na inter-relação entre a composição, processamento, propriedades e desempenho de um determinado material, aprendeu a classificar os materiais em diferentes grupos: metais, cerâmicas, polímeros e compósitos, e também constatou que a evolução e descoberta de novos materiais está associada à necessidade da sociedade. Posteriormente, iniciamos o estudo do átomo e sua estrutura, o que nos possibilitou entender que o átomo é composto por um núcleo muito pequeno que contém partículas subatômicas denominadas prótons, nêutrons e elétrons. Vimos que núcleo possui elétrons em movimento que orbitam ao seu redor. Ainda neste estudo, compreendemos os conceitos de número atômico, massa atômica e peso atômico, assim como a relação que existe entre eles. Você também assimilou a importância de conhecer o Número de Avogadro para calcularmos a quantidade de átomos em uma amostra e descobrimos que além da equação que nos permite calcular a probabilidade de determinar a posição de um elétron, Schrödinger também propôs que cada elétron fosse especificado por seus números quânticos.

O conhecimento desses assuntos lhe permitirá selecionar materiais adequados para uma determinada aplicação. Então vamos ao nosso último desafio desta unidade: Você como nosso(a) *trainee* no laboratório de P&D da Nintai sabe a importância dos materiais que apresentam uma boa relação entre resistência mecânica x densidade para nossa empresa. Pensando nisso e na redução de custos, seria possível substituir os fios de cobre utilizados na fiação elétrica de automóveis por outro material? Qual tipo de material seria utilizado? Quais características químicas são relevantes na sua escolha? O estudo das diferentes ligações químicas e das forças intermoleculares fará você compreender o porquê uma classe de materiais pode apresentar uma determinada característica ou propriedade em comum. Não entendeu? Vou simplificar: o tijolo,

uma caneca ou xícara de porcelana são exemplos de materiais cerâmicos comuns, esses objetos quando caem no chão de uma certa altura quebram, por quê? Em contrapartida, esses mesmos materiais suportam temperaturas elevadas e novamente lhe pergunto: por quê? As respostas para essas questões e para o desafio desta unidade você encontrará na compreensão das ligações: iônica, covalente e metálica, assim como no entendimento das forças intermoleculares.

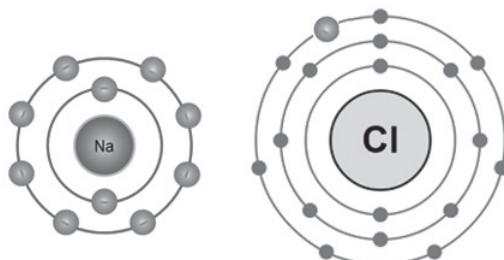
Bons estudos!

### Não pode faltar

Todos materiais existentes são compostos de átomos. Esses átomos, são mantidos e unidos por forças denominadas ligações interatômicas ou ligações químicas que funcionam como molas ligando cada átomo ao seu vizinho. O tipo dessas ligações interatômicas é o que dá origem às diferentes propriedades dos materiais, um exemplo clássico: a grafita e o carbono, ambos compostos por carbono, no entanto, devido à natureza da ligação química exibem diferentes características. Nos materiais, sabemos que os átomos estão dispostos de diferentes maneiras, o que faz outros aspectos serem importantes como o número, comprimento e ângulo dessas ligações.

As ligações químicas são classificadas em primárias e secundárias. As ligações primárias envolvem a doação ou o compartilhamento de elétrons para formar uma configuração eletrônica mais estável já que, exceto os gases nobres, todos os átomos dos elementos da tabela periódica possuem uma camada por completar. Por exemplo, a Figura 1.19 apresenta um átomo de sódio (Na) e um átomo de cloro (Cl). O átomo de sódio tem um núcleo contendo 11 prótons, e orbitando suas camadas de energia 11 elétrons. Observa-se que na camada mais externa o sódio tem apenas um elétron de valência. Já o átomo de cloro possui 17 prótons no núcleo e 17 elétrons em sua órbita, no entanto, na última camada de energia o átomo de cloro apresenta 7 elétrons.

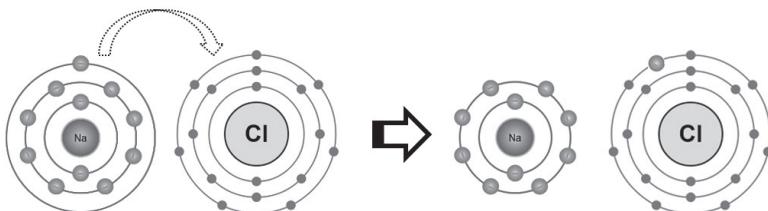
Figura 1.19 | Átomos de sódio (Na) e cloro (Cl)



Fonte: elaborada pelo autor.

A ligação primária irá ocorrer quando o átomo de sódio doar seu elétron de valência, e consequentemente ficar com sua camada mais externa preenchida (8 elétrons), ao mesmo tempo que o átomo de cloro, que tem apenas sete elétrons na última camada, recebe o elétron vindo do sódio completando sua camada mais externa com oito elétrons (Figura 1.20).

Figura 1.20 | Configuração estável dos átomos de sódio (Na) e cloro (Cl)



Fonte: elaborada pelo autor.

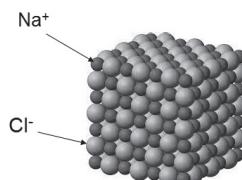


### Assimile

A regra do octeto se refere à tendência de o átomo “preferir” ter oito elétrons na última camada de valência, isto é, a tendência atômica de ganhar ou perder elétrons para atingir a configuração eletrônica do gás nobre mais próximo, formando compostos mais estáveis.

As ligações primárias são de três tipos: iônica, covalente e metálica. As ligações iônicas são ligações fortes e podem acontecer entre dois elementos quando um deles possui um número pequeno de elétrons na camada de valência (ex.: metal) e o outro apresenta uma camada de valência quase preenchida (ex.: não metal). O sódio doa seu elétron de valência para completar a última camada do átomo de cloro. Assim, o átomo de cloro que atrai esse elétron se torna um íon carregado negativamente ( $\text{Cl}^-$ ) enquanto o átomo de sódio, que doa o elétron, se torna um íon positivo ( $\text{Na}^+$ ). A atração entre esses íons de cargas opostas é que formam as ligações primárias iônicas. Esse tipo de ligação é não direcional, isto é, a magnitude da ligação é igual em todos os sentidos ao redor dos íons (CALLISTER; RETHWISH, 2012), o que permite a liberdade no empacotamento atômico. É importante ressaltar que os íons de sinais opostos devem se cercar mutuamente para manter as ligações entre os átomos (Figura 1.21).

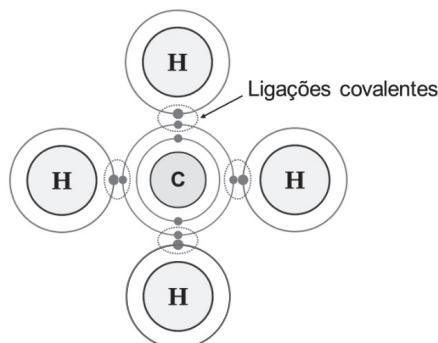
Figura 1.21 | Representação esquemática do cristal de cloreto de sódio ( $\text{NaCl}$ )



Fonte: <[https://en.wikipedia.org/wiki/Lattice\\_energy](https://en.wikipedia.org/wiki/Lattice_energy)>. Acesso em: 18 fev. 2016.

Como resultado de todas essas características, os materiais que possuem predominantemente ligações iônicas são materiais duros, frágeis, apresentam elevada temperatura de fusão e são bons isolantes térmicos e elétricos. As ligações iônicas são o principal tipo de ligação encontradas nos materiais cerâmicos. Outro tipo de ligação primária são as ligações covalentes. Nas ligações covalentes uma configuração estável é obtida pelo compartilhamento de elétrons entre átomos vizinhos. Dois átomos que estão ligados covalentemente irão compartilhar pelo menos um elétron a partir de cada átomo, o que faz esse tipo de ligação ser direcional. A Figura 1.22 apresenta uma molécula do gás metano ( $\text{CH}_4$ ) no qual os átomos de carbono fazem ligações covalentes com os átomos de hidrogênio completando oito elétrons em sua última camada de valência. O compartilhamento de elétrons é observado na Figura 1.22, destacados pelos círculos pontilhados.

Figura 1.22 | Representação esquemática da molécula de metano ( $\text{CH}_4$ )



Fonte: elaborada pelo autor.

Assim como as ligações iônicas, as ligações covalentes podem ser muito fortes, como as encontradas no diamante que resultam em materiais com elevado ponto de fusão, elevado módulo de elasticidade, elevada dureza e baixa condutividade térmica. Esse tipo de ligação é encontrado em materiais cerâmicos à base de silicatos, vidros e nos materiais poliméricos. É muito interessante notar que um material tão duro, tal como o diamante e um material relativamente macio como um polímero, ambos contêm ligações covalentes. Essas diferenças são o resultado não apenas das ligações dentro das moléculas, mas também das ligações que mantêm as moléculas unidas. Outro ponto relevante é que podemos ter ligações interatômicas que são parcialmente iônicas e parcialmente covalentes.



### Exemplificando

Para se calcular o percentual do caráter iônico de uma ligação podemos utilizar a equação abaixo:

$$\% = \{1 - \exp[-(0,25)(X_A - X_B)^2]\} \times 100 \quad (1.1)$$

Onde  $X_A$  e  $X_B$  correspondem aos valores de eletronegatividade de cada elemento. Dessa forma, vamos calcular o caráter iônico do cloreto de sódio ( $\text{NaCl}$ ) sabendo que os valores de eletronegatividade são respectivamente, 0,9 e 3,0 para os átomos de sódio e cloro.

$$\% = \{1 - \exp[-(0,25)(3,0 - 0,9)^2]\} \times 100$$

$$\% = \{1 - \exp[-(0,25)(4,41)]\} \times 100$$

$$\% = \{1 - \exp[-1,10]\} \times 100$$

$$\% = \{1 - 0,33\} \times 100$$

$$\% = \{0,67\} \times 100$$

$$\% = 67$$

Assim, o cloreto de sódio apresenta 67% de ligações iônicas.

Na verdade, muito poucos compostos apresentam puramente ligação iônica ou covalente, isto é, quanto maior a separação dos elementos na tabela periódica, maior caráter iônico terá a ligação. O aumento da tendência para se ter uma ligação iônica é resultado do aumento da eletronegatividade entre elementos. Quanto mais próximos esses valores, mais covalente é a natureza da ligação.



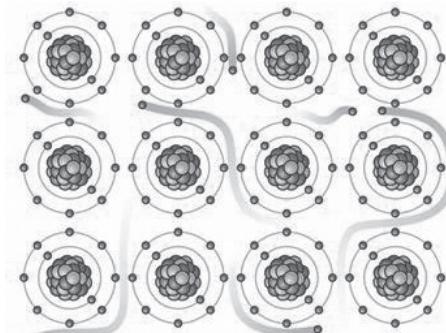
### Faça você mesmo

Calcule a % de caráter iônico para o cloreto de magnésio ( $\text{MgCl}_2$ ) e para o cloreto de prata ( $\text{AgCl}$ ), sabendo que os valores de eletronegatividade são:

$$\text{Mg} = 1,2; \text{Cl} = 3,0 \text{ e } \text{Ag} = 1,9$$

Por fim, o último tipo de ligação primária é a ligação metálica. Nessas ligações os elétrons de valência são doados e formam um mar comum de elétrons e assim, são compartilhados por todos os átomos do metal, isto é, os elétrons encontram-se praticamente livres para se movimentarem ao longo de todos os átomos do metal, formando um “mar de elétrons”. Quando os átomos doam seus elétrons de valência, formam íons que se mantêm unidos pela nuvem de elétrons em torno deles como podemos observar na Figura 1.23. Também é possível observar que esses elétrons de valência se deslocam ao redor de todos os átomos completando suas camadas mais externas com oito elétrons e adquirindo uma configuração eletrônica estável. É justamente esse movimento dos elétrons de valência que faz com que os materiais metálicos sejam bons condutores de eletricidade mesmo em temperaturas relativamente baixas. Nas ligações metálicas as ligações são não direcionais, da mesma forma que as ligações covalentes. Devido a essa característica os metais apresentam boa ductilidade, que é a habilidade do metal se deformar antes ou até a sua ruptura.

Figura 1.23 | Representação do movimento dos elétrons em um metal

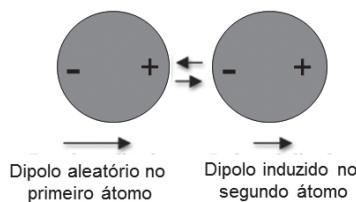


Fonte: <<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Miri6.jpg>>. Acesso em: 18 fev. 2016.

No geral, os materiais metálicos apresentam pontos de fusão e módulo de elasticidade relativamente elevados, boa condutividade elétrica e brilho metálico.

Além das ligações primárias existem outras ligações mais fracas denominadas ligações secundárias. Estes tipos de ligações são encontrados na maioria dos materiais, mas os seus efeitos são muitas vezes ofuscados pela força das ligações primárias. Nas ligações secundárias não ocorre a formação de ligações a partir da doação ou do compartilhamento dos elétrons de valência. Essas ligações são geralmente formadas quando ocorre uma distribuição de cargas desigual, criando o que é conhecido como um dipolo no qual a carga total é zero, mas uma das extremidades do átomo possui, ligeiramente, carga positiva ou negativa em relação a outra extremidade. Esses dipolos podem ser produzidos por uma flutuação aleatória dos elétrons em torno do que é normalmente um campo elétrico simétrico no átomo. Uma vez que um dipolo aleatório é formado em um átomo, um dipolo induzido é formado no átomo adjacente. Esse é o tipo de ligação presente nas moléculas do gás nitrogênio ( $N_2$ ) e é conhecida como ligação de van der Waals (Figura 1.24).

Figura 1.24 | Ilustração esquemática da ligação de van der Waals

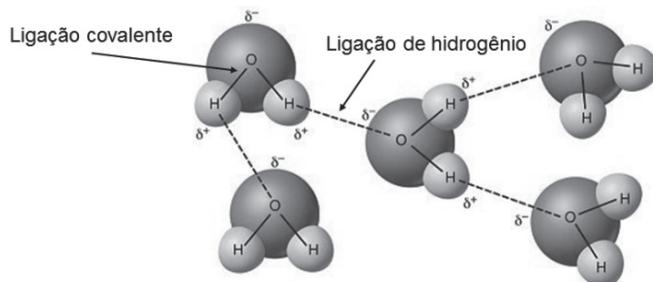


Fonte: elaborada pelo autor.

A ligação secundária também pode existir quando temos um dipolo permanente numa molécula, devido a uma disposição assimétrica das regiões positivas e negativas. As moléculas com um dipolo permanente podem induzir um dipolo eletricamente

simétrico nas moléculas adjacentes e assim, formar uma ligação fraca, ou então, podem formar ligações com outras moléculas de dipolo permanente. Os materiais que apresentam predominantemente esse tipo de ligação apresentam baixas temperaturas de fusão e ebulição. Existem três tipos de ligações de van der Waals, no entanto, a mais importante é a denominada forças de London. Nessas ligações ocorrem interações entre dipolos induzidos em átomos ou moléculas, um exemplo é o tetracloreto de carbono ( $\text{CCl}_4$ ). Outro tipo de ligação secundária é a ligação de hidrogênio também conhecida como ligações de dipolos permanentes. Esse tipo de ligação é a forma mais forte de ligação secundária e é formada a partir da natureza polar de moléculas que contenham átomos de hidrogênio. A Figura 1.25 apresenta a representação esquemática da ligação de hidrogênio entre as moléculas de água ( $\text{H}_2\text{O}$ ). O único elétron dos átomos de hidrogênio é compartilhado com o átomo de oxigênio, dessa forma, a extremidade da ligação que contém o hidrogênio se torna carregado positivamente e assim exerce uma intensa força de atração na molécula adjacente que possui a extremidade carregada positivamente.

Figura 1.25 | Representação esquemática da ligação de hidrogênio entre as moléculas de água



Fonte: <<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Miri9.jpg>>. Acesso em: 19 fev. 2016.

Os pontos de fusão e ebulição de materiais que contenham ligações de hidrogênio são anormalmente elevados para os seus pesos atómicos, em consequência desse tipo de ligação.



### Pesquise mais

O artigo intitulado: *Materiais cerâmicos catalíticos à base de hexaaluminato de metais alcalino terrosos (Ba e Ca): síntese e análise estrutural* traz o estudo dos materiais cerâmicos e mostra a importância do tipo de ligação presente nesses materiais. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0366-69132015000300350&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0366-69132015000300350&script=sci_arttext)>. Acesso em: 19 fev. 2016.

Adicionalmente aos tipos de ligações é importante compreender as forças e energias de ligação. Quando os átomos estão muito próximos cada átomo exerce no outro uma força repulsiva (FR) ou atrativa (FA) na qual a magnitude de cada uma dependerá da distância de separação atômica ( $r$ ). Essas forças estão relacionadas com a energia de cada átomo ( $E$ ) e pode ser obtida, matematicamente, através da relação (Equação 1.2):

$$F_A \text{ ou } F_R = \frac{dE}{dr} \quad (1.2)$$

Onde  $E$  = energia de ligação e  $r$  = distância de separação atômica.

Já a força resultante ( $F$ ) será a somatória das forças atrativas e repulsivas (Equação 1.3), enquanto o equilíbrio atômico será obtido quando a soma dessas forças for igual a zero (Equação 1.4):

$$F = F_A + F_R \quad (1.3)$$

$$F_A + F_R = 0 \quad (1.4)$$



### Refletá

Analise os gráficos de força e energia potencial x separação interatômica, no livro de Rethwisch (CALLISTER, William D.; RETHWISCH, David G. **Ciência e engenharia de materiais**: uma introdução. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012).

### Sem medo de errar

Chegamos ao final de mais uma etapa, como nosso *trainee* de P&D da Nintai você já começou a compreender o quanto é importante para nós materiais que apresentam uma boa relação entre resistência mecânica x densidade. Pensando nisto e na redução de custos, desafiamos você a encontrar um material potencial na substituição dos fios de cobre utilizados na fiação elétrica de automóveis. Qual material podemos utilizar? Quais características químicas são relevantes na sua escolha? Para encerrarmos esta unidade de ensino, você já é capaz de concluir que:

- O cobre é um metal de transição com número atômico igual a 29. É um elemento que possui apenas um elétron de valência na sua última camada ( $4s^1$ ) e faz somente ligações metálicas entre seus átomos. Essas características justificam a excelente condutividade térmica e elétrica, e a elevada empregabilidade na forma de fios em fiações elétricas de automóveis.

• A redução da massa de um automóvel é extremamente importante para a indústria automobilística, uma vez que a adição de novos componentes eletrônicos como painéis eletrônicos, múltiplos airbags, entre outros, aumentam consideravelmente sua massa final, o que faz o carro consumir mais combustível. Assim, como alternativa ao cobre, já existem estudos que se utilizam de fios de alumínio. O alumínio é um metal de número atômico igual a 13, que possui três elétrons de valência ( $3s^23p^1$ ) em sua última camada. Como estudamos nesta seção, sabemos que são esses elétrons que farão as ligações entre seus átomos, isto é, são esses elétrons de valência que farão parte da nuvem eletrônica encontrada nas ligações metálicas. O alumínio é um metal macio, dúctil e resistente à corrosão, no entanto, uma de suas principais propriedades é a baixa densidade atrelada à excelente condutividade térmica e elétrica, o que o torna uma opção viável na substituição dos fios de cobre por fios de alumínio. Como consequência, alguns estudos apontam uma redução na massa final da fiação elétrica dos automóveis de 48%. Esses resultados de massa adicionados às propriedades do alumínio (fios) o torna potencial substituto dos fios de cobre.



### Pesquise mais

O vídeo do link abaixo apresenta uma breve explicação do processo de fabricação de fios de alumínio. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=kFtrXwsmpHl>>. Acesso em: 19 fev. 2016.

É importante, novamente, compreendermos que para conseguirmos uma determinada propriedade e desempenho de um material, precisamos pensar nos pilares da *Ciência dos Materiais* e que você certamente já os conhece: estrutura/composição, processamento, propriedades e desempenho. Primeiro você conheceu a estrutura e composição dos átomos de cobre para posteriormente estudar e pesquisar essas mesmas características para os átomos de alumínio. Após detalhado esses componentes para o alumínio, você descobriu que esse elemento possui propriedades adequadas para o nosso projeto e finalizou com o processo de fabricação dos fios de alumínio atendendo nossas expectativas de desempenho. Parabéns!

Dedicação, honestidade e perseverança são as palavras-chave para uma carreira brilhante.

## Avançando na prática

### Pratique mais

#### Instrução

Desafiamos você a praticar o que aprendeu transferindo seus conhecimentos para novas situações que pode encontrar no ambiente de trabalho. Realize as atividades e depois compare-as com a de seus colegas.

Ligações químicas e forças intermoleculares	
<b>1. Competência geral</b>	Conhecer conceitos que permitam ao aluno selecionar materiais adequados para uma determinada aplicação que atendam características desejadas.
<b>2. Objetivos de aprendizagem</b>	Identificar os diferentes tipos de ligações interatômicas.
<b>3. Conteúdos relacionados</b>	Ligações primárias e ligações secundárias.
<b>4. Descrição da situação-problema</b>	Uma empresa de joias tem recebido diversas reclamações de seus clientes que compraram alianças de prata (Ag). Os clientes se queixam que quando novas eram brilhantes, mas com o uso do dia a dia as alianças ficaram todas riscadas e não tão brilhantes quanto antes. Por que a prata possui essas características? Os tipos de ligações interatômicas têm influência nessas propriedades? Poderíamos oferecer um produto melhor? Como?
<b>5. Resolução da situação-problema</b>	A prata pura é um metal muito macio, prova disso são as nossas alianças de compromisso de um namoro. Quando novas refletem intensamente a luz devido à superfície brilhante e refletora. No entanto, após dias ou semanas de uso é comum vermos riscos e o brilho não é mais tão intenso. A prata é um elemento metálico com número atómico igual a 47 e classificado como um metal de transição. É o elemento químico que possui a mais elevada condutividade elétrica e térmica, até mesmo quando comparada ao cobre. A prata faz ligações metálicas entre seus átomos, o que justifica a excelente condutividade elétrica. É um metal mole que possui apenas um elétron de valência na camada mais externa (5s1) e que faz parte da nuvem de elétrons. Por ser um material muito mole, é indicado na fabricação de joias a utilização de ligas de prata, isto é, são adicionados outros metais à prata que fazem com que ela se torne mais resistente. Alguns exemplos são as ligas de prata e ouro e prata e cobre. No caso das ligas de prata e cobre, quanto maior o percentual de cobre, mais dura é a liga metálica. Na confecção de alianças é comum a utilização de prata 980 ou 1000. A prata 980 contém 980 partes de Ag e 20 partes de cobre, enquanto a prata 1000 só possui átomos de prata em sua composição.



#### Atenção

Nas ligações metálicas os elétrons de valência dos átomos se encontram praticamente livres e se movimentam ao longo de todos os átomos do metal formando um “mar de elétrons”.

**Faça valer a pena**

**1.** As ligações químicas são classificadas em primárias e secundárias.

Podemos dizer que a ligação na qual ocorre a doação do elétron de valência de um metal que preenche a camada de valência de um não metal é chamada:

- a) Ligação metálica
- b) Ligação covalente
- c) Ligação iônica
- d) Forças de London
- e) Ligação de hidrogênio

**2.** Nas ligações \_\_\_\_\_ uma configuração estável é obtida pelo \_\_\_\_\_ de elétrons entre átomos vizinhos. Esse tipo de ligação é \_\_\_\_\_.

Assinale a alternativa que preenche corretamente as lacunas:

- a) covalentes, compartilhamento, direcional.
- b) metálicas, compartilhamento, não direcional.
- c) iônicas, compartilhamento, direcional.
- d) iônicas, recebimento, não direcional.
- e) covalentes, recebimento, direcional.

**3.** O óxido de magnésio ( $MgO$ ) é um pó branco e insolúvel em água, utilizado principalmente em fertilizantes e no tratamento de águas residuais.

Sabendo que a eletronegatividade do magnésio é igual a 1,2 e do oxigênio é igual a 3,5 podemos afirmar que esse óxido possui o percentual de caráter iônico igual a:

- a) 1,7%
- b) 73%
- c) 35%
- d) 17%
- e) 0,73%



# Referências

ASHBY, M.; JONES, D. **Engenharia de materiais**: uma introdução a propriedades, aplicações e projetos. 3. ed. São Paulo: Campus, 2007. 356 p. v. 1.

ASKELAND; D. R.; WRIGHT, W. J. **Ciência dos materiais**. São Paulo: Cengage Learning, 2014. 672 p.

ATKINS; P.; JONES, L. **Princípios de química**: questionando a vida moderna. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006. 968 p.

BORGES, J. J. V. B.; CANAS, A. J. D. C. Uma cronologia da história do ensino superior militar em Portugal. **Revista Militar**, n. 2.440, p. 445-450, 2005.

CALLISTER, W.; RETHWISH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais**: uma introdução. 8. ed. São Paulo: LTC, 2012. 840 p.

CANEVAROLO, S. **Ciência dos polímeros**. 2. ed. São Paulo: Artliber, 2006. 280 p.

CUSTODIO, R. et al. Quatro alternativas para resolver a equação de Schrödinger para o átomo de hidrogênio. **Química Nova**, São Paulo, v. 25, n. 1, jan./fev. 2002. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-40422002000100025](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422002000100025)>. Acesso em: 5 fev. 2016.

ECONÓMICO TV – INFORMAÇÃO COM VALOR. **Como se faz**: fio de alumínio. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=kFtrXwsmphl>>. Acesso em: 19 fev. 2016.

FLORIO, D. Z. de et al. **Materiais cerâmicos para células a combustível**. p. 275-290, 2004. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/ce/v50n316/a0250316.pdf>>.

Acesso em: 22 abr. 2016.

MARCONI, M. A.; LAKATOS E. M. **Fundamentos de metodologia científica**. São Paulo: Atlas, 2007. 315 p.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. A. **Fundamentos de metodologia científica**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2007. 315 p.

NAVARRO, R. F. A evolução dos materiais. Parte 1: da pré-história ao início da era moderna. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 1, n. 1, p. 1-11, 2006.

SHACKELFORD, J. F. **Ciência dos materiais**. 6. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2008. 576 p.



# Estruturas cristalinas

## Convite ao estudo

Seja bem-vindo à segunda unidade do livro didático da disciplina de *Ciência dos Materiais*. Na primeira unidade estudamos os aspectos históricos da *Ciência dos Materiais* e conhecemos as principais classificações dos materiais entre metais, cerâmicos, polímeros e compósitos. Adicionalmente vimos que existem outros materiais que são classificados como materiais inteligentes, semicondutores, biomateriais e nanomateriais. Nós também aprendemos que a *Ciência dos Materiais* estuda a inter-relação entre composição/estrutura, propriedades, processamento e desempenho e, coincidentemente, nosso livro também está estruturado em quatro unidades, o que nos possibilita em cada uma delas estudarmos cada componente dessa ciência. Na primeira unidade estudamos a composição dos materiais e a estrutura atômica, compreendemos que o comportamento das partículas subatômicas, as diferentes ligações interatômicas e que as forças e energias de ligação fazem os materiais apresentarem propriedades distintas. Nesta segunda unidade daremos ênfase ao estudo da estrutura cristalina, compreenderemos as diversas maneiras em que os átomos estão arranjados e o conceito de célula unitária, polimorfismo e allotropia, conheceremos os diferentes sistemas cristalinos e, por fim, veremos os tipos de imperfeições presentes nos sólidos e compreenderemos o fenômeno da difusão. Ao final dos estudos desta unidade você terá conhecido mais alguns conceitos que lhe permitirão selecionar materiais adequados para uma determinada aplicação, de modo a atender às características de desempenho esperadas, tanto no que se refere às características de serviço quanto às de processamento. Preparado? Então vamos ao nosso segundo grande desafio.

Uma grande empresa metalúrgica produz diversas ligas metálicas e recentemente investe na produção de ferro alfa (ferro  $\alpha$ ). Um comprador

interessado nessa produção pretende utilizar a propriedade ferromagnética do ferro  $\alpha$  em aplicações que utilizam diferentes temperaturas de trabalho. Você, como vendedor técnico da metalúrgica, irá conduzir essa negociação. Na primeira etapa você fará a caracterização da estrutura cristalina do ferro  $\alpha$ , em seguida explicará ao cliente o fenômeno do polimorfismo e dos sistemas cristalinos. Em uma terceira etapa você deverá explicar quais as possíveis imperfeições que os sólidos cristalinos podem apresentar e, por fim, será importante você fazer o cliente compreender como a difusão atômica é particularmente importante para os metais e suas ligas. Certamente, se você realizar um bom trabalho no cumprimento dessas quatro etapas o cliente ficará muito satisfeito e você fechará um grande negócio para a empresa e para sua carreira. Bons estudos e boa negociação.

# Seção 2.1

## Estruturas cristalinas

### Diálogo aberto

Algum tempo atrás você iniciava sua carreira em uma empresa automobilística como *trainee* e, hoje, você já está trabalhando como vendedor técnico numa metalúrgica! A vida é assim mesmo, cheia de desafios e grandes aprendizados, e você tem as características que as principais empresas procuram em um colaborador: determinação, vontade de aprender e crescer, perseverança e pluralidade em suas atividades. Você já passou por um laboratório de P&D e aprendeu a importância de uma boa pesquisa e em como realizá-la, assim como a química, física e matemática são fundamentais para os estudos da *Ciência dos Materiais* que está estruturado na inter-relação entre composição, processamento, propriedade e desempenho. Agora, trabalhando aqui nessa metalúrgica como nosso consultor técnico, atenderá um cliente que utilizará a propriedade ferromagnética do nosso ferro  $\alpha$  em algumas aplicações. Mas esse cliente previamente nos informou que o metal será utilizado em aplicações que ocorrem em diferentes temperaturas. Será possível utilizar as propriedades ferromagnéticas do ferro  $\alpha$  em quaisquer temperaturas de trabalho? Você acredita que essa propriedade específica está relacionada a alguma característica particular do metal? Em caso afirmativo, será possível que a variação da temperatura influenciará o comportamento metalúrgico do metal? Será possível fazer essa caracterização? Antes de quaisquer respostas será importante você compreender de que maneira os átomos estão organizados tridimensionalmente em um material, isto é, entender o conceito de célula unitária. Para que se compreenda a organização atômica os átomos serão considerados esferas rígidas para que seja possível calcular o volume de cada célula unitária e prever o número de átomos internos na célula, assim como determinar a quantidade de átomos vizinhos, o chamado número de coordenação. Finalmente, você compreenderá o fator de empacotamento atômico e a densidade específica dos elementos químicos a partir do seu arranjo atômico. A compreensão dos temas abordados nesta unidade será imprescindível para que a nova parceria entre a nossa metalúrgica e o novo cliente seja estabelecida. O contrato firmado e a venda fechada serão um grande passo na sua carreira profissional e os temas que serão abordados farão você conhecer outros conceitos e aspectos importantes que se devem considerar na seleção de um material adequado para uma determinada aplicação.

## Não pode faltar

As propriedades exibidas pelos materiais é resultado da combinação entre suas características atômicas como composição, ligação interatômica e estrutura cristalina. A estrutura cristalina refere-se aos arranjos que os átomos podem assumir quando os materiais estão no estado sólido e descreve uma estrutura altamente ordenada devido à natureza dos seus constituintes em formar padrões simétricos. Na grande maioria, as partículas que compõem um material sólido iônico, molecular, covalente ou metálico são mantidas unidas por forças atrativas intensas e, para efeito de estudo, consideraremos que as posições atômicas dos átomos, moléculas ou íons são fixas no espaço. Os constituintes de um sólido podem ser dispostos de duas maneiras: a) quando formam um padrão tridimensional repetitivo de longo alcance denominado rede cristalina, produzindo, assim, um sólido cristalino e b) quando não há um padrão tridimensional repetitivo de longo alcance formando assim um sólido amorfos, do grego *amorphos*, que significa "sem forma" (CALLISTER; RETHWISCH, 2013). A Figura 2.1 apresenta exemplos de sólido cristalino e amorfos, a Figura 2.1a mostra a pedra preciosa opala, exemplo de um sólido amorfos utilizado na fabricação de joias (Figura 2.1b), já na Figura 2.1c temos a stibnite que é um sólido cristalino constituído por antimônio e enxofre.

Figura 2.1 | Exemplos de sólidos amorfos e cristalinos



Fonte: elaborada pelo autor.



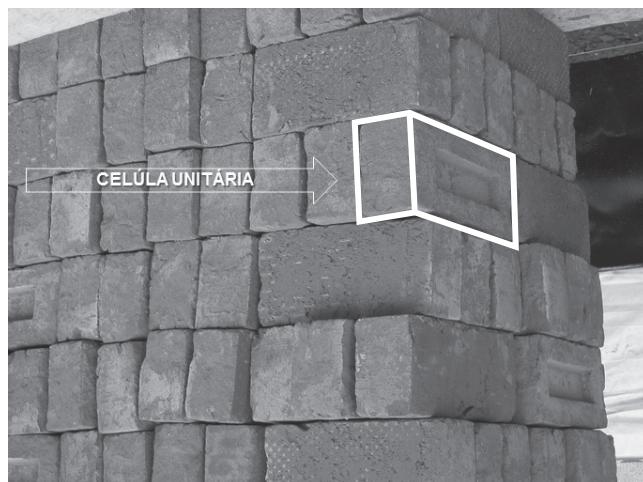
### Pesquise mais

O artigo *Química de (nano)materiais* traz uma visão geral dos diferentes aspectos relacionados à Química dos Materiais e Nanomateriais. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-40422007000600016](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422007000600016)>. Acesso em: 5 mar. 2016.

Os sólidos cristalinos, ou cristais, possuem estruturas internas distintas que por sua vez resultam em diferentes superfícies planas, ou faces. As faces se interceptam em ângulos que são característicos de cada substância e, quando expostos a raios X, cada estrutura também produz um padrão distinto que pode ser utilizado para identificar o material. Esses ângulos característicos refletem a regularidade espacial do arranjo

periódico dos átomos, das moléculas ou íons. Dessa forma, representa-se a totalidade de um cristal a partir da sua menor unidade de repetição denominada célula unitária. Por exemplo, se uma pilha de tijolos fosse um cristal, qual seria sua célula unitária (unidade de repetição)? É muito fácil, numa pilha de tijolos a célula unitária seria um único tijolo que se repete tridimensionalmente (Figura 2.2).

Figura 2.2 | Representação de uma célula unitária de uma pilha de tijolos

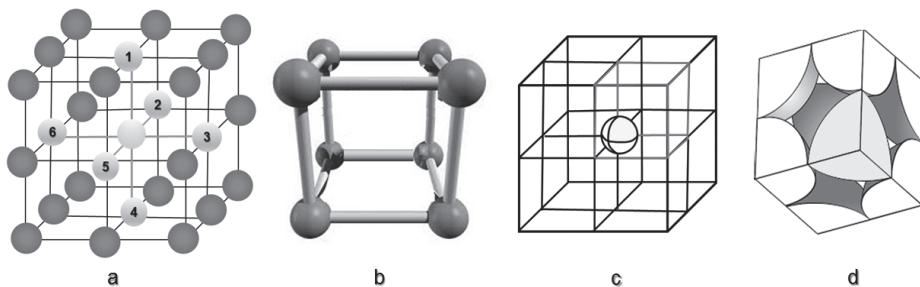


Fonte: adaptada de <[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/5d/Stapel\\_bakstenen\\_-\\_Pile\\_of\\_bricks\\_2005\\_Fruggo.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/5d/Stapel_bakstenen_-_Pile_of_bricks_2005_Fruggo.jpg)>. Acesso em: 5 mar. 2016.

A célula unitária é a menor unidade de repetição que descreve completamente o padrão de uma estrutura. Cada célula unitária tem seis lados, e cada lado é um paralelogramo. Por convenção, admite-se que os átomos ou íons são esferas sólidas e com diâmetros definidos, e que os vértices do paralelogramo devem coincidir com os centros de massa dos átomos (CALLISTER; RETHWISCH, 2013). Os materiais metálicos, por exemplo, podem se solidificar em estruturas cristalinas que possuem quatro tipos de células unitárias:

**Cúbica Simples (CS):** na CS cada átomo possui seis átomos vizinhos mais próximos (Figura 2.3a) e estão localizados nos oito vértices do cubo (Figura 2.3b) e apenas 1/8 de sua massa se encontra dentro da célula unitária em um arranjo octaédrico (Figuras 2.3c e 2.3d). Dessa maneira, tem-se somente um átomo no interior da célula unitária CS, razão pela qual os metais não se cristalizam nessa estrutura devido ao ineficiente empacotamento atômico, já que somente 52% do seu volume total é preenchido. A quantidade de átomos vizinhos também é denominada número de coordenação, assim célula cúbica simples possui número de coordenação igual a seis. O arranjo atômico de uma célula unitária cúbica simples é representado em diferentes perspectivas na Figura 2.3.

Figura 2.3 | Célula unitária cúbica simples (CS)



Fonte: elaborada pelo autor.



### Pesquise mais

Acesse o link e assista a uma animação sobre a célula unitária CS. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=0arPpHbKuys>>. Acesso em: 5 mar. 2016.

O único elemento que se cristaliza em uma célula unitária cúbica simples é o polônio (Po), elemento radioativo e extremamente tóxico.

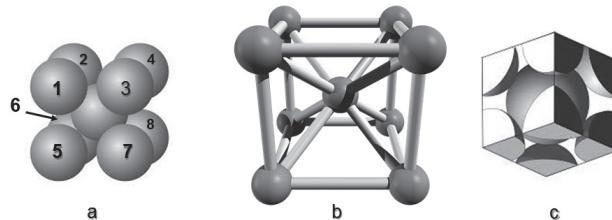


### Reflita

Recentemente o polônio foi assunto nas mídias mundiais. Você sabe o porquê? Acesse o link e descubra a razão! Disponível em: <<http://g1.globo.com/mundo/noticia/2016/01/concluida-investigacao-sobre-assassinato-de-ex-espiao-russo.html>>. Acesso em: 5 mar. 2016.

**Cúbica Corpo Centrado (CCC):** a célula unitária CCC é uma maneira mais eficiente de empacotamento atômico e muito mais comum entre os elementos puros. Nela, cada átomo tem oito átomos vizinhos mais próximos (Figura 2.4a), portanto, número de coordenação igual a oito e 68% do seu volume ocupado (Figuras 2.4b e 2.4c). A célula unitária cúbica de corpo centrado, além dos átomos nos vértices, possui um átomo central, dessa forma têm-se dois átomos na célula unitária CCC. A Figura 2.4 apresenta o arranjo atômico de uma célula unitária cúbica de corpo centrado.

Figura 2.4 | Célula unitária cúbica de corpo centrado (CCC)



Fonte: elaborada pelo autor.

Os metais alcalinos, o bálio e vários metais de transição são exemplos de sólidos cristalinos que se solidificam em estruturas com células unitárias CCC.

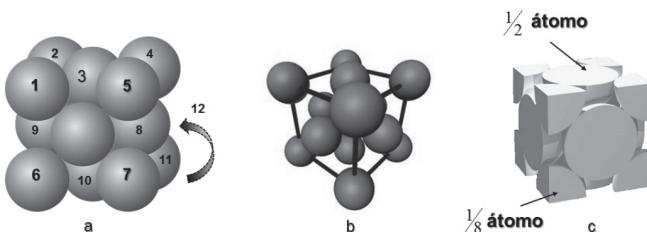


### Assimile

Assista a uma animação sobre a célula unitária CCC e observe a disposição atômica tridimensional. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=0z8COn9K66c>>. Acesso em: 5 mar. 2016.

**Cúbica de Face Centrada (CFC):** outra maneira bastante eficiente de empacotamento atômico e muito encontrada nos metais é a estrutura cristalina de célula unitária cúbica de face centrada. Na CFC os átomos estão localizados em cada um dos vértices e nos centros de todas as faces do cubo (CALLISTER; RETHWISCH, 2013). A Figura 2.5 traz representações do arranjo atômico de uma célula unitária cúbica de face centrada. Os átomos nos vértices são compartilhados por oito células unitárias, enquanto os átomos no centro das faces são compartilhados por duas células unitárias (Figura 2.5c), adicionalmente cada átomo possui número de coordenação igual a doze (Figuras 2.5a e 2.5b). A célula CFC possui quatro átomos e 74% do seu volume total ocupado. O alumínio, o cobre, a prata e o ouro são alguns dos metais que possuem estruturas cristalinas CFC.

Figura 2.5 | Célula unitária cúbica de face centrada (CFC)



Fonte: elaborada pelo autor.

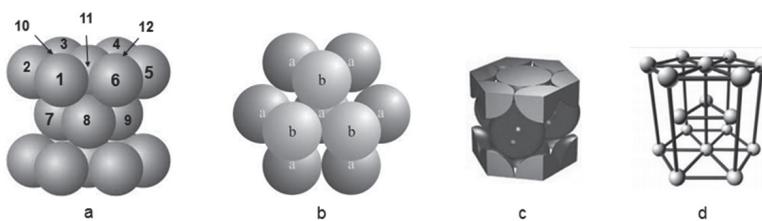


## Pesquise mais

Veja no link uma animação sobre a célula unitária CFC. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=RoyzZUJfo-Y>>. Acesso em: 5 mar. 2016.

**Hexagonal Compacta (HC):** a maneira mais eficiente de empacotamento atômico nas estruturas cristalinas é a célula hexagonal compacta (Figura 2.6). A célula HC é formada por camadas atômicas alternadas, na qual a primeira e a terceira camada ocupam os vazios tetraédricos em que cada átomo toca seis átomos no seu próprio plano e três átomos na camada acima e três abaixo do seu plano, dessa forma a HC possui número de coordenação igual a doze (Figura 2.6a). A célula HC contém um átomo em cada vértice e em cada centro da face hexagonal e pode ser descrita com ordenação atômica "a-b-a-b-a-b" (Figura 2.6b). Na célula hexagonal compacta os átomos ocupam 74% do volume total da célula unitária (Figuras 2.6c e 2.6d).

Figura 2.6 | Célula unitária hexagonal compacta (HC)



Fonte: elaborada pelo autor.



## Assimile

Assista a uma animação sobre a célula unitária CFC. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=xyjW59-CYqk>>. Acesso em: 5 mar. 2016.

Além do número de coordenação característico para cada célula unitária, outra característica muito importante das estruturas cristalinas é o fator de empacotamento atômico (FEA), que é a soma dos volumes das esferas de todos os átomos internos de uma célula unitária dividida pelo volume da célula unitária (CALLISTER; RETHWISCH, 2013), como apresentada na Equação 2.1:

$$\text{FEA} = \frac{\text{volume dos átomos em uma célula unitária}}{\text{volume total da célula unitária}} = \frac{V_E}{V_c} \quad (2.1)$$

No entanto, anteriormente ao cálculo do FEA das estruturas cristalinas é necessário calcular  $V_E$  e  $V_c$  para cada célula unitária. O volume dos átomos em uma célula unitária ( $V_E$ ) é dado pela Equação 2.2:

$$V_E = n \left( \frac{4}{3} \pi R^3 \right) \quad (2.2)$$

Em que: n é o número de átomos no interior da célula unitária e  $\frac{4}{3} \pi R^3$  é o volume de uma esfera.

Já para o cálculo de  $V_c$  utiliza-se a relação entre o comprimento da célula unitária (a) e o raio atômico (R) para determinar o volume do cubo, isto é, o volume total da célula unitária apresentada na Equação 2.3:

$$V_c = a^3 \quad (2.3)$$

Para cada tipo de célula unitária existe uma relação distinta de a e R dadas na Tabela 2.1 abaixo:

Tabela 2.1 | Tipos, comprimentos e volumes das células unitárias

Célula unitária	Comprimento de $a \times R$	Volume $V_c$
CS	$2R$	$8R^3$
ccc	$\frac{4R}{\sqrt{3}}$	$\frac{64R^3}{3\sqrt{3}}$
CFC	$2R\sqrt{2}$	$16R^3\sqrt{2}$
HC	$2R^*$ $c \approx 1,633a^*$	$24R^3\sqrt{2}$

Fonte: adaptado de Askeland e Wright (2016).

O conhecimento do tipo de célula unitária e da estrutura cristalina de um sólido possibilita o cálculo da sua massa específica teórica  $\rho$  através da Equação 2.4:

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

Em que n = número de átomos associado a cada célula unitária, A = peso atômico,  $V_c$  = volume da célula unitária e  $N_A = 6,023 \times 10^{23} \text{ átomos/mol}$  (Número de Avogadro).



### Exemplificando

O ródio possui raio atômico 0,134 nm, estrutura cristalina CFC e peso atômico de 102,91 g/mol. Calcule sua massa específica. Resposta:

São dados: estrutura CFC possui n = 4,  $V_c = 16R^3\sqrt{2}$ , e o Rh massa atômica A = 102,91 g/mol e o número de Avogadro. Sabendo que a massa específica é dada em g/cm<sup>3</sup>, primeiramente vamos transformar a unidade de raio atômico:

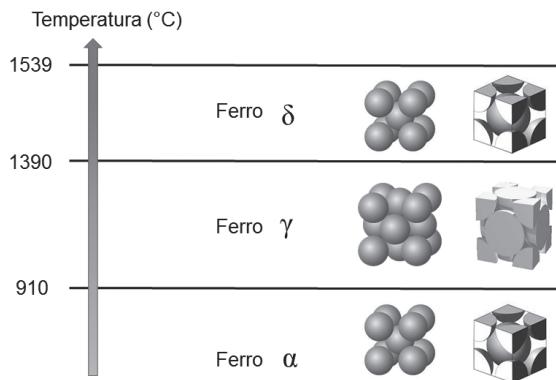
$R = 0,134\text{nm} = 1,34 \times 10^{-8}\text{cm}$ . Assim temos:

$$\begin{aligned}\rho &= \frac{nA}{V_c N_A} = \frac{nA}{(16R^3 \sqrt{2})N_A} \\ &= \frac{(4 \text{ átomos/célula unitária})(102,91 \text{ g/mol})}{[16 \cdot \frac{(1,34 \times 10^{-8} \text{ cm})^3 \sqrt{2}}{\text{célula unitária}} \cdot (6,023 \times 10^{23} \text{ átomos/mol})]} \\ &= \frac{411,64}{32,79} = 12,55 \text{ g/cm}^3\end{aligned}$$

### Sem medo de errar

A metalúrgica na qual trabalhamos fabrica diversas ligas de metais, no entanto, temos um cliente interessado em adquirir nosso ferro  $\alpha$  devido às propriedades ferromagnéticas. Você, como consultor técnico, atenderá o cliente que previamente nos informou que o metal será utilizado em aplicações que ocorrem em diferentes temperaturas. Será possível utilizar as propriedades ferromagnéticas do ferro  $\alpha$  em quaisquer temperaturas de trabalho? Você acredita que essa propriedade específica está relacionada a alguma característica particular do metal? Em caso afirmativo, será possível que a variação da temperatura influenciará o comportamento metalúrgico do metal? Será possível fazer essa caracterização? Os temas abordados nos permitiram identificar que existem os sólidos amorfos quando não há um padrão tridimensional repetitivo de longo alcance e, cristalinos, que formam um padrão tridimensional repetitivo de longo alcance denominado rede cristalina. A célula unitária é a menor unidade de repetição que descreve completamente o padrão de rede cristalina. A caracterização do ferro  $\alpha$  é possível a partir dos estudos da estrutura cristalina. O ferro  $\alpha$  é estável a temperaturas inferiores a 910 °C, possui estrutura cristalina de célula unitária CCC e nestas condições uma das principais características é ser ferromagnético. No entanto, em temperaturas acima de 910 °C até 1390 °C o ferro  $\alpha$  não é mais estável e forma o ferro  $\gamma$  de célula unitária CFC, em temperaturas acima de 1390 °C até atingir o ponto de fusão, a 1539 °C ocorre uma nova transformação para o ferro  $\delta$  que possui célula unitária CCC igual ao ferro  $\alpha$ , porém, em temperaturas acima de 771 °C, o ferro  $\alpha$  não apresenta mais a característica de ser ferromagnético e torna-se paramagnético. Assim, não será possível o cliente aplicar esse material em temperaturas de trabalho em que ocorre a transformação do ferro  $\alpha$  já que essa propriedade está diretamente ligada ao tipo de célula unitária e à temperatura. A Figura 2.7 apresenta um gráfico das células unitárias do Fe em função da temperatura.

Figura 2.7 | Transformações das células unitárias em função da temperatura



Fonte: elaborada pelo autor.

## Avançando na prática

### Estruturas cristalinas

#### Descrição da situação-problema

O cobalto metálico é elemento utilizado em galvanoplastia, devido à sua aparência atraente, dureza e resistência à oxidação. Ele está ligado com o ferro, níquel e outros metais, e é utilizado em turbinas a jato e geradores de turbina a gás, em que a força de alta temperatura é importante. Assim como o ferro, o cobalto é ferromagnético e essa característica, no primeiro caso, está relacionada à temperatura e ao tipo de célula unitária. Assim, é possível afirmarmos que o cobalto possui os mesmos tipos de células unitárias que o ferro nas mesmas temperaturas, no entanto, é possível que o cobalto apresente estruturas cristalinas iguais ao do ferro nas mesmas temperaturas?



#### Lembre-se

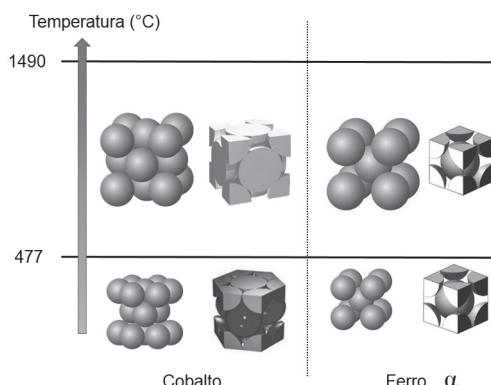
As propriedades exibidas pelos materiais é resultado da combinação entre suas características atômicas como composição, ligação interatômica e estrutura cristalina.

#### Resolução da situação-problema

O cobalto é um elemento químico de símbolo Co e número atômico 27. Tal como o níquel, o cobalto não é encontrado puro na natureza, sua forma pura é obtida por fusão, isto é, por metalurgia extractiva. O cobalto é um metal cinza-prateado, brilhante e duro. Assim como o ferro, o cobalto é ferromagnético e ocorre em duas estruturas

cristalográficas: hexagonal compacta e cúbica de face centrada. A temperatura ambiente até 477 °C apresenta estrutura HC, enquanto para temperaturas superiores na faixa de 477 °C a 1490 °C é CFC, no entanto, a diferença de energia é tão pequena que na prática é comum o intercrescimento aleatório das duas estruturas. Assim, podemos concluir que a característica ferromagnética dos metais não depende unicamente do tipo de estrutura. Ao compararmos o ferro com o cobalto observa-se que os metais apresentam estruturas cristalinas distintas, enquanto o ferro a 477 °C possui estrutura cúbica de corpo centrado e não se observam quaisquer tipos de transformação de célula unitária, o cobalto, nessa temperatura, possui célula unitária hexagonal compacta (Figura 2.8).

Figura 2.8 | Comparação entre as estruturas cristalinas do cobalto e do ferro



Fonte: elaborada pelo autor.

### Faça valer a pena

- 1.** Em relação à estrutura cristalina é correto o que se afirma em:
  - a) Refere-se aos arranjos que os átomos podem assumir quando os materiais estão no estado sólido.
  - b) Refere-se às ligações interátomicas dos materiais no estado gasoso.
  - c) Refere-se ao tipo de processamento a que o material é submetido no estado sólido.
  - d) Refere-se aos arranjos que os átomos podem assumir quando os materiais estão no estado líquido.
  - e) Refere-se às ligações interátomicas dos materiais no estado líquido.

**2.** Um sólido formado por um padrão tridimensional repetitivo de longo alcance pode apresentar diferentes tipos de células unitárias.

A afirmação refere-se ao:

- a) poliestireno
- b) sólido amorfo
- c) polímero
- d) elastômero
- e) sólido cristalino

**3.** A menor unidade de repetição que descreve completamente o padrão de uma estrutura é denominada:

- a) parâmetro de rede
- b) ligação iônica
- c) célula unitária
- d) átomo
- e) elétron



# Seção 2.2

## Sistemas cristalinos

### Diálogo aberto

Caro aluno, seja bem-vindo à Seção 2.2 de *Ciência dos Materiais*. Neste novo emprego, como vendedor técnico de uma metalúrgica, você certamente aprenderá muito, afinal é um trabalho diferente do que você fazia no seu antigo emprego. Para atender corretamente um importante cliente você precisou compreender que existem sólidos cristalinos e sólidos amorfos. Você entendeu que um sólido cristalino apresenta uma regularidade da disposição atômica, isto é, uma unidade de repetição de longo alcance denominada célula unitária; e que as propriedades dos materiais estão condicionadas ao tipo de célula unitária e consequentemente ao tipo de estrutura cristalina formada. Assim, você conheceu as diferentes células unitárias do sistema cúbico: cúbica simples, cúbica de corpo centrado, cúbica de face centrada e hexagonal compacta; e foi capaz de explicar para o cliente que a propriedade ferromagnética do ferro  $\alpha$  só é exibida a temperaturas inferiores a 771 °C e que possui estrutura cristalina CCC, adicionalmente você alertou o cliente que em temperaturas acima de 910 °C o ferro  $\alpha$  não é mais estável e forma o ferro  $\gamma$  de célula unitária CFC que possui propriedades diferentes do ferro  $\alpha$ .

Convencido de suas explanações o cliente teve novas dúvidas tais como: em temperaturas inferiores a 771 °C o ferro  $\alpha$  é um metal muito duro? Apresenta elevada rigidez? É um metal inflexível? Agora, para que essas questões sejam respondidas adequadamente e satisfaçam nosso cliente, é necessário você conhecer outras características importantes da estrutura cristalina. Nesta seção, inicialmente serão abordados dois conceitos muito parecidos e que estão relacionados ao estudo da estrutura cristalina, o polimorfismo e a alotropia. Em seguida você estudará os setes diferentes sistemas cristalinos e verá que na prática todos os cristais se formam em um desses sistemas. Posteriormente você será capaz de compreender que a partir dos setes sistemas cristalinos existem catorze possíveis redes cristalinas e que normalmente ao se trabalhar com materiais sólidos é necessário especificar uma posição atômica no interior da célula unitária, uma direção ou plano cristalográfico. O entendimento desses temas ajudará você conhecer outros conceitos e aspectos importantes que se deve considerar na seleção de um material adequado para uma determinada aplicação.

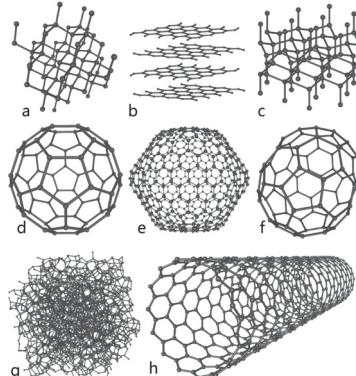
O setor de vendas é fundamental e essencial para uma empresa, a concretização e o fechamento dessa importante venda está diretamente condicionada ao seu preparo e conhecimento técnico dos produtos que são produzidos na metalúrgica e neste caso,

especificamente, estamos falando do ferro  $\alpha$ . Com a compreensão desses temas você conterá outros conceitos e aspectos importantes que devem ser considerados na seleção de um material adequado para uma determinada aplicação. Bom trabalho!

### Não pode faltar

O polimorfismo é um fenômeno conhecido quando um material sólido existe em mais de uma forma ou estrutura cristalina. O polimorfismo é muito semelhante à allotropia, no entanto, a allotropia é usada para descrever sólidos elementares, enquanto o polimorfismo é utilizado para compostos. Em geral, para qualquer material cristalino é utilizado o termo polimorfismo. Por exemplo, as formas allotrópicas do carbono incluem o diamante (em que os átomos de carbono estão ligados em um arranjo de estrutura tetraédrica); a grafita (em que os átomos de carbono estão ligados em conjunto de camadas em uma rede hexagonal); a lonsdaleíta (os átomos encontram-se em um arranjo hexagonal); o grafeno (camadas soltas de grafite); os fulerenos (em que os átomos de carbono estão ligados em um conjunto esférico, tubular ou em formações elipsoidais) e, mais recentemente, foram descobertos outros alótropos como o buckminsterfulereno, também conhecido como *buckyball*, e os nanotubos de carbono. O buckminsterfulereno em um padrão bidimensional apresenta um padrão de doze pentágonos regulares e vinte hexágonos regulares. Já os nanotubos de carbono são folhas de grafita, isto é, são grafenos enrolados em diferentes direções que produzem tubos com tampas hemisféricas de fulerenos em suas extremidades (ASKELAND; WRIGHT, 2014). Na transformação allotrópica todos os alótropos do carbono apresentam a mesma composição, ou seja, são de carbono puro, porém os materiais apresentam propriedades drasticamente distintas devido aos diferentes arranjos atómicos em cada alótropo, isto é, aos diferentes sistemas cristalinos (ASKELAND; WRIGHT, 2014). A Figura 2.9 apresenta oito alótropos do carbono puro, os quais são representados, respectivamente, por: a) diamante; b) grafita; c) lonsdaleíta; d) buckminsterfulereno; e) C540 fulereno; f) C70 fulereno; g) carbono amorfó; e h) nanotubos de carbono.

Figura 2.9 | Representação de oito alótropos do carbono puro



Fonte: <[https://en.wikipedia.org/wiki/File:Eight\\_Allotropes\\_of\\_Carbon.png](https://en.wikipedia.org/wiki/File:Eight_Allotropes_of_Carbon.png)>. Acesso em: 18 mar. 2016.

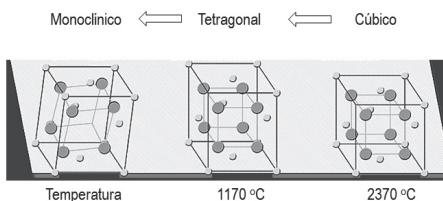


### Pesquise mais

O artigo *Nanoestruturas de carbono (nanotubos, grafeno): quo vadis?* apresenta os desafios da química na preparação de nanotubos de carbono. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/qn/v36n10/09.pdf>>. Acesso em: 15 mar. 2016.

Muitas cerâmicas como a sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e a zircônia ( $\text{ZrO}_2$ ) são exemplos de materiais polimórficos, neste caso, a mudança de volume acompanha a transformação da estrutura cristalina durante o resfriamento ou aquecimento e, se essas condições não forem controladas corretamente, a mudança de volume pode tornar o material cerâmico frágil e quebradiço. A Figura 2.10 mostra a zircônia em que a temperatura ambiente ( $25^\circ\text{C}$ ) apresenta estrutura cristalina monoclinica estável até  $1170^\circ\text{C}$ . Acima desta temperatura o dióxido de zircônio monoclinico transforma-se em uma estrutura tetragonal estável até  $2370^\circ\text{C}$ . Acima de  $2370^\circ\text{C}$  o zircônio tetragonal se transforma em uma forma cúbica estável até  $2370^\circ\text{C}$  para uma temperatura de fusão de  $2680^\circ\text{C}$ . A zircônia também pode ter a forma ortorrômbica quando submetida a elevadas pressões (ASKELAND; WRIGHT, 2014). A zircônia é muito utilizada em substituição aos materiais metálicos em próteses dentárias devido à elevada resistência e por ser inerte em meio fisiológico.

Figura 2.10 | Estruturas cristalinas da zircônia em diferentes temperaturas



Fonte: elaborada pelo autor.



### Pesquise mais

Assista à resolução de uma questão de vestibular sobre os alótropos do carbono. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=ch5cvoktveM>>. Acesso em: 15 mar. 2016.

As estruturas de todos os cristais que conhecemos podem ser classificadas de acordo com a simetria das células unitárias e existe um total de sete tipos fundamentalmente distintos dessas células que diferem nos comprimentos relativos das arestas e dos ângulos formados entre elas. Cada célula unitária possui seis lados, e cada lado é um paralelogramo. Os arranjos atômicos ou iônicos dos materiais cristalinos são descritos por sete sistemas cristalinos apresentados na Figura 2.11: cúbico, hexagonal, tetragonal,

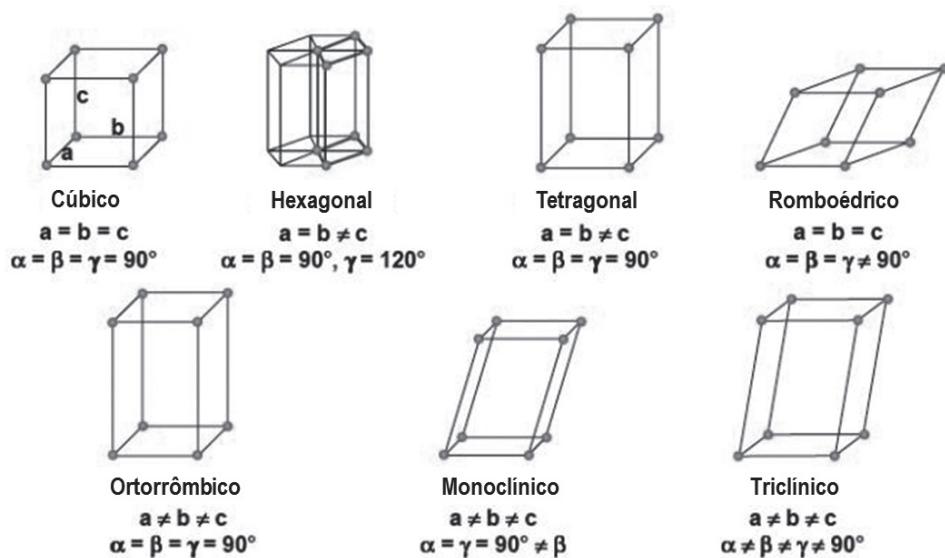
romboédrico (trigonal), ortorrômbico, monoclinico e triclinico. A estrutura cristalina é caracterizada pelos comprimentos  $a$ ,  $b$  e  $c$ , e pelos três ângulos  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  que são denominados parâmetros de rede cristalina.



### Assimile

Algumas propriedades como a deformação sob carga, a condutividade elétrica e térmica e o módulo de elasticidade podem variar de acordo com a orientação do cristal, assim como as propriedades do ferro.

Figura 2.11 | Sistemas cristalinos

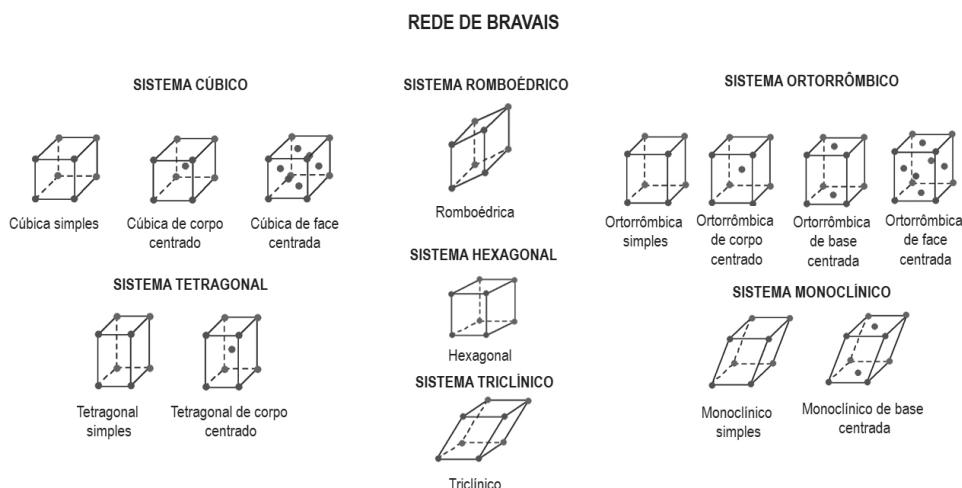


Fonte: adaptada de <[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/9c/Sistemas\\_cristalinos.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/9c/Sistemas_cristalinos.jpg)>. Acesso em: 21 mar. 2016.

Entre os sistemas cristalinos, o sistema cúbico é o que apresenta maior grau de simetria, enquanto o sistema triclinico apresenta a menor simetria. Embora existam apenas sete sistemas de cristais ou formas, existem catorze redes cristalinas distintas, chamadas rede de Bravais, em homenagem a Auguste Bravais (1811-1863), que foi um dos primeiros cristalógrafos franceses.

A rede de Bravais apresenta as seguintes redes cristalinas: 3 tipos cúbicos, 1 tipo romboédrico, 4 tipos ortorrômbicos, 2 tipos tetragonais, 1 tipo hexagonal, 1 tipo triclinico e 2 tipos monoclinicos (Figura 2.12).

Figura 2.12 | Rede de Bravais



Fonte: elaborada pelo autor.

Na prática todos os cristais possuem um desses tipos de sistemas cristalinos, no entanto, alguns compostos que possuem o mesmo sistema apresentam diferentes parâmetros de redes que são fatores que dependem da composição química e dos tamanhos dos átomos na célula unitária.

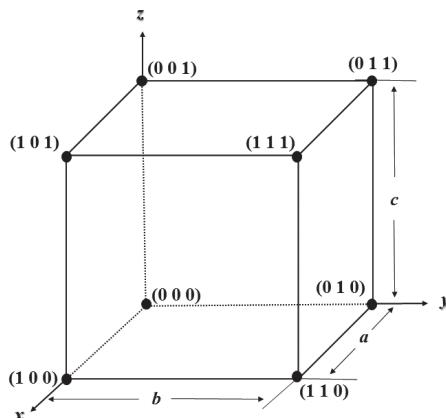


### Refletá

A mudança nas estruturas e redes cristalinas sempre envolve uma transformação nas propriedades dos materiais?

Normalmente é necessário especificar um ponto, uma direção ou um plano cristalográfico dos átomos (CALLISTER; RETHWISCH, 2013). Algumas propriedades como a deformação sob carga, a condutividade elétrica e térmica e o módulo de elasticidade podem variar de acordo com a orientação do cristal, assim como as propriedades do ferro. A posição de qualquer ponto dentro da célula unitária pode ser especificada em termos de suas coordenadas na forma de múltiplos fracionários dos comprimentos das arestas da célula unitária. A Figura 2.13 apresenta uma célula unitária com as respectivas coordenadas dos átomos localizados nos vértices do cubo e os parâmetros de rede, assumindo uma unidade de aresta igual a 1.

Figura 2.13 | Célula unitária com as coordenadas atômicas dos vértices e parâmetros de rede



Fonte: elaborada pelo autor.

Algumas “regras” gerais são utilizadas para determinação de um ponto, uma direção ou um plano cristalográfico:

- Os índices de Miller (notações para definir famílias de planos na rede de Bravais) são utilizados para expressar planos de rede e direções; x, y, z são os eixos;
- $a, b, c$  são os parâmetros de rede (comprimento da célula unitária ao longo de um lado);
- $h, k, l$  são os índices de Miller para planos e direções que são expressas como planos  $(hkl)$  e direções  $[hkl]$ ;
- Não existem vírgulas entre os índices;
- Números negativos são representados com uma barra acima do número. Exemplo: - 2 é representado 2.

Os índices de Miller são determinados a partir de alguns procedimentos:

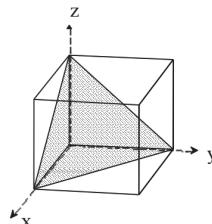
- Se o plano passar pela origem, selecione um plano equivalente ou move a origem;
- Determine a intersecção do plano com os eixos em função de  $a, b$  e  $c$ ;
- Um plano que é paralelo a um eixo pode ser considerado como tendo uma intersecção no infinito  $\frac{1}{\infty} = 0$ ;
- Converter os valores para o menor número inteiro e representar entre parênteses.



### Exemplificando

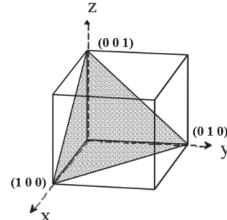
Dado o plano mostrado na Figura 2.14, determine os índices de Miller:

Figura 2.14 | Célula unitária



Fonte: elaborada pelo autor.

Resolução: Podemos observar que o plano intercepta os eixos x, y e z. Assim temos,

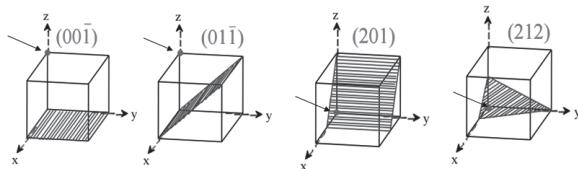


Os índices de Miller para o plano apresentado na célula unitária é igual a (111).

Fonte: elaborada pelo autor.

A Figura 2.15 apresenta os índices de Miller para os diferentes planos cristalográficos. As setas apontam as origens utilizadas para a determinação dos índices de Miller.

Figura 2.15 | Planos cristalográficos

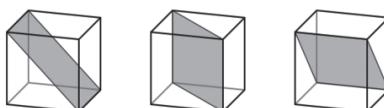


Fonte: elaborada pelo autor.



### Faça você mesmo

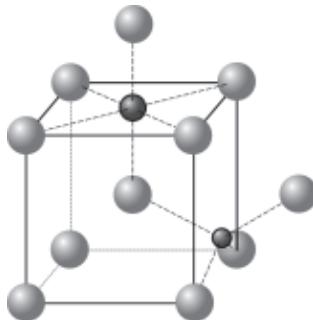
Dados os planos apresentados na figura abaixo determine os índices de Miller:



## Sem medo de errar

Recentemente, você conquistou uma vaga de vendedor técnico em uma metalúrgica que fabrica diversas ligas metálicas. Certamente esse novo emprego tem desafiado você e lhe ensinado novos aspectos na ciência dos materiais. Você está atendendo um importante cliente que possui interesse na compra do ferro  $\alpha$  para utilizar em diversas aplicações. No primeiro momento, o cliente questionou se era possível utilizar a propriedade ferromagnética do ferro  $\alpha$  em diferentes temperaturas e você, de forma competente, foi capaz de explicar que essa propriedade do ferro só é apresentada em temperaturas inferiores a 771 °C. Satisfeito, o cliente teve novas dúvidas tais como: em temperaturas inferiores a 771 °C o ferro  $\alpha$  é um metal muito duro? Apresenta elevada rigidez? É um metal inflexível? E você mais uma vez foi capaz de responder essas questões: o ferro  $\alpha$  em temperaturas inferiores a 771 °C apresenta estrutura cristalina CCC e sistema cristalino cúbico. O sistema cristalino cúbico apresenta os três eixos cristalográficos  $a$ ,  $b$  e  $c$  de mesmo tamanho e mutuamente perpendiculares, isto é,  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  apresentam ângulos iguais a 90°. A estrutura cristalina do ferro  $\alpha$  faz parte da chamada rede de Bravais. Algumas das propriedades do ferro  $\alpha$  são a maleabilidade, flexibilidade e baixa rigidez, propriedades que estão relacionadas com o sistema cristalino. A Figura 2.16 apresenta a estrutura cristalina ferro  $\alpha$ , também chamada de ferrita, em que os átomos de ferro estão dispostos em um arranjo CCC (átomos maiores) e os átomos de carbono (átomos menores) estão presentes como defeitos intersticiais.

Figura 2.16 | Estrutura cristalina do ferro  $\alpha$ .



Fonte: <[https://it.wikipedia.org/wiki/Ferrite\\_\(siderurgia\)](https://it.wikipedia.org/wiki/Ferrite_(siderurgia))>. Acesso em: 21 mar. 2016.

Quando se trata de um material metálico pode-se dizer que esse material se deforma por cisalhamento ou pelo deslizamento de um plano atômico do cristal, que envolve a presença de impurezas ou defeitos no arranjo cristalino. Os metais de sistema cristalino cúbico, como, por exemplo, o ferro  $\alpha$ , se deformam predominantemente por deslizamento no qual um plano de átomos desliza sobre um plano adjacente. O ferro  $\alpha$  apresenta o plano de clivagem, isto é, a forma em que o ferro  $\alpha$  irá se fragmentar ou fraturar ao longo de planos paralelos ou fratura igual a [100].

## Avançando na prática

### Sistemas cristalinos

#### Descrição da situação-problema

O topázio é uma pedra muito utilizada nas joalherias – de fórmula química  $\text{Al}_2(\text{F},\text{OH})_2\text{SiO}_4$  – e trata-se de um mineral classificado como pedra preciosa. A Figura 2.17 apresenta alguns exemplos desse mineral.

Figura 2.17 | Topázio



Fonte: <<https://pt.wikipedia.org/wiki/Top%C3%A1zio>>. Acesso em: 22 mar. 2016.

É possível determinar em qual sistema o topázio se cristaliza? Quais as direções cristalinas?

#### Resolução da situação-problema

O topázio se cristaliza em um sistema ortorrômbico em que todos os ângulos formados entre as arestas são iguais a  $90^\circ$  e os comprimentos das arestas são diferentes entre si, conforme Figura 2.18. Dessa forma os parâmetros de rede são iguais  $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$  (ângulos) e  $a \uparrow b \uparrow c$  (comprimento das arestas).

Figura 2.18 | Sistema ortorrômbico

Ortorrômico simples	Ortorrômico bases centradas	Ortorrômico corpo centrado	Ortorrômico faces centradas
$a \neq b \neq c$ 	$a \neq b \neq c$ 	$a \neq b \neq c$ 	$a \neq b \neq c$ 

Fonte: <[https://pt.wikipedia.org/wiki/Sistema\\_cristalino\\_ortorr%C3%B4mbico](https://pt.wikipedia.org/wiki/Sistema_cristalino_ortorr%C3%B4mbico)>. Acesso em: 21 mar. 2016.

O plano de clivagem do topázio é igual a [001].

## Faça valer a pena

**1.** “Esse fenômeno natural é conhecido quando um composto sólido existe em mais de uma forma ou estrutura cristalina”.

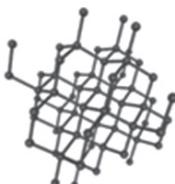
O texto acima refere-se a:

- a) célula unitária
- b) alotropia
- c) polimorfismo
- d) cristalização
- e) rede de Bravais

**2.** As formas alotrópicas apresentadas acima são alótropos de qual elemento químico?

- a) cobalto
- b) grafita
- c) ferro  $\alpha$
- d) flúor
- e) carbono

**3.** Analise a figura abaixo:



A partir da análise da figura pode-se afirmar que:

- a) Trata-se da estrutura cristalina do diamante, em que os átomos de carbono estão ligados em um arranjo de estrutura tetraédrica.
- b) Trata-se da estrutura cristalina do diamante, em que os átomos de carbono estão ligados em um arranjo de estrutura hexagonal.
- c) Trata-se da estrutura da grafita, em que os átomos de carbono estão ligados em conjunto de camadas em uma rede hexagonal.
- d) Trata-se da estrutura da grafita, em que os átomos de carbono estão ligados em conjunto de camadas em uma rede tetraédrica.
- e) Trata-se da estrutura cristalina do diamante, em que os átomos de carbono estão ligados em um arranjo de estrutura cúbica.

# Seção 2.3

## Imperfeições cristalinas

### Diálogo aberto

Caro aluno, você está preparado para o estudo de mais uma seção de *Ciência dos Materiais*? Trata-se de um estudo dinâmico e muito interessante, a cada dia surgem novas ideias, novas necessidades que resultam no desenvolvimento de novos materiais e que na sua grande maioria são materiais que nos trazem conforto. Vamos ver alguns exemplos: depois de um dia cansativo de trabalho ou de estudo, quem não gosta de dormir num travesseiro de espuma viscoelástica, popularmente conhecido como travesseiro da Nasa? É muito bom e confortável! Mas a *Ciência dos Materiais* só tem utilidade na fabricação de espuma? É claro que não! Ela está presente em nosso cotidiano e até nos momentos mais especiais de nossas vidas como a chegada de um filho. Será que nossos pais ou avós tinham tantas opções, cores e tantos tamanhos de fraldas descartáveis? Ou melhor, será que já existiam fraldas descartáveis? Certamente muitos de nossos pais não tiveram essa facilidade. Esse e tantos outros exemplos são frutos, de alguma maneira, do estudo da *Ciência dos Materiais*. A cada semana você aprende um novo tema dessa ciência que procura ajudá-lo nesse novo emprego. Você, como vendedor técnico de uma metalúrgica, está negociando a venda de um lote de ferro  $\alpha$  para um cliente bem exigente e a cada momento ele tem uma nova dúvida. Essa venda é muito importante para a metalúrgica, ainda mais no atual momento de crise. O cliente utilizará o ferro  $\alpha$  em diversas aplicações e em diferentes condições de temperatura e você já esclareceu que o ferro  $\alpha$  só apresenta a propriedade de ser ferromagnético em temperaturas inferiores a 771 °C e, posteriormente, explicou por que esse metal de estrutura cúbica de corpo centrado é maleável, flexível e apresenta baixa rigidez e propriedades que estão relacionadas com o sistema cristalino. No entanto, durante essa conversa você disse ao cliente que seria possível aumentar a rigidez do ferro  $\alpha$  e que o metal não estava livre de impurezas e defeitos. E o cliente mais uma vez o questionou: o que são essas impurezas? E quais tipos de defeitos o ferro  $\alpha$  pode apresentar? No estudo desta seção você compreenderá o que significa impurezas nos materiais sólidos, também compreenderá que a adição de impurezas pode ser intencional quando queremos alterar algumas propriedades iniciais dos materiais. Você entenderá que os sólidos apresentam diferentes tipos de defeitos e será capaz de identificá-los e distingui-los.

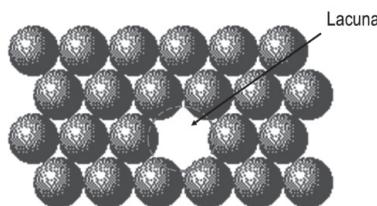
Mais uma vez você recorrerá aos estudos da *Ciência dos Materiais* para responder essas questões e, no final, conhecerá conceitos e aspectos importantes que devem ser considerados na seleção de um material adequado para uma determinada aplicação.

Então, vamos iniciar nossos estudos? Boa sorte!

## Não pode faltar

As estruturas cristalinas estudadas na seção anterior apresentam uma estrutura idealizada e simplificada de maneira que possa ser utilizada para compreendermos muitos princípios importantes que regem o comportamento de sólidos. Em contraste, os cristais reais contêm um grande número de defeitos que variam desde a quantidade de impurezas até a falta de átomos ou íons, e esses defeitos ou imperfeições contribuem para as propriedades dos materiais. É verdade que a palavra "defeito" nos remete a algo ruim ou indesejável, no entanto, nos estudos sobre materiais os defeitos são intencionalmente utilizados para manipular as propriedades de um material. Por exemplo, a adição de elementos de liga em um metal é um modo de introduzir um defeito no cristal. Há alguns tipos básicos de defeitos em um sólido cristalino: defeitos pontuais; defeitos lineares; defeitos interfaciais e defeitos volumétricos. Os defeitos pontuais são regiões em que existe a ausência de um átomo ou o átomo encontra-se em uma região irregular na estrutura cristalina. Entre os defeitos pontuais incluem-se: lacunas, autointersticial, impurezas substitucionais e intersticiais. A lacuna é o defeito mais simples e, como o próprio nome sugere, observa-se a ausência de um átomo na rede cristalina (Figura 2.19).

Figura 2.19 | Representação bidimensional de uma lacuna



Fonte: <<http://www.matter.org.uk/glossary/images/vacancy.gif>>. Acesso em: 17 mar. 2016.

## Pesquise mais

O link disponível em: <[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Vacancy\\_diffusion.gif](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Vacancy_diffusion.gif)> (acesso em: 17 mar. 2016.) apresenta um gif em que se pode observar o movimento de lacunas na rede cristalina.

As lacunas são defeitos comuns, especialmente em altas temperaturas, quando os átomos estão frequentemente em movimento e mudam de posições aleatoriamente, deixando para trás sítios da rede vazios. A maioria dos casos de difusão (transporte de massa por movimento atômico) só ocorre devido à presença de lacunas. É possível determinar o número de lacunas em uma rede cristalina utilizando-se a Equação 2.5:

$$N_l = N \exp\left(-\frac{Q_l}{kT}\right) \quad (2.5)$$

Em que  $N$  é o número total de sítios atômicos,  $Q_l$  é a energia necessária para a formação de uma lacuna,  $T$  é a temperatura absoluta em Kelvin e  $k$  é a constante de Boltzmann ( $8,62 \times 10^{-5}$  eV/átomo.K ou  $1,38 \times 10^{-23}$  J/átomo.K). O número total de sítios atômicos é calculado a partir da Equação 2.6:

$$N = \frac{N_A \rho}{A} \quad (2.6)$$

Nessa expressão  $N_A$  é o número de Avogadro,  $\rho$  é a massa específica e  $A$  é o peso atômico. Assim observa-se que a quantidade de lacunas aumenta exponencialmente em função da temperatura.



### Exemplificando

Vamos determinar o número de lacunas no ferro em 900 °C, sabendo que a massa específica do ferro é igual a  $7,65 \text{ g/cm}^3$ , peso atômico igual a  $55,85 \text{ g/mol}$ , o número de Avogadro igual a  $6,023 \times 10^{23}$  átomos/mol e energia de formação de uma lacuna é  $1,08 \text{ eV/átomo}$ .

$$\begin{aligned} N_l &= N \exp\left(-\frac{Q_l}{kT}\right) = \frac{N_A \rho}{A} \exp\left(-\frac{Q_l}{kT}\right) \\ &= \frac{(6,023 \times 10^{23} \text{ átomos/mol})(7,65 \text{ g/cm}^3)}{55,85 \text{ g/mol}} \exp\left(-\frac{1,08 \text{ eV/átomo}}{(8,62 \times 10^{-5} \text{ eV/átomo.K})1173\text{K}}\right) \\ &= \frac{4,61 \times 10^{24}}{55,85} \exp\left(-\frac{1,08 \text{ eV/átomo}}{(8,62 \times 10^{-5} \text{ eV/átomo.K})1173\text{K}}\right) \\ &= (8,25 \times 10^{22}) \exp(-10,68) = (8,25 \times 10^{22})(2,30 \times 10^{-5}) \\ &= 1,9 \times 10^{18} \text{ lacunas.cm}^{-3} \end{aligned}$$

O número de lacunas é comumente representado das seguintes maneiras:

Em função de **centímetros cúbicos**  $1,9 \times 10^{18}$  lacunas/cm<sup>3</sup> ou  $1,9 \times 10^{18}$  cm<sup>-3</sup>; ou **metros cúbicos**  $1,9 \times 10^{24}$  lacunas/m<sup>3</sup> ou  $1,9 \times 10^{24}$ m<sup>-3</sup>.

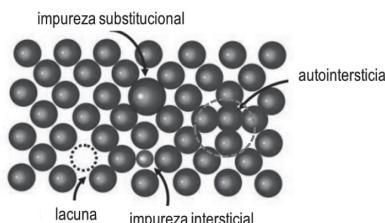


### Faça você mesmo

Análogo ao exercício no Exemplificando, determine o número de lacunas para o ferro a 1500 °C.

Outro tipo de defeito pontual é o defeito autointersticial, isto é, um átomo da rede cristalina se deslocada e fica comprimido em um sítio intersticial que é uma região que sob condições normais não estaria ocupada. As impurezas também são consideradas defeitos pontuais e são do tipo impureza substitucional em que um átomo diferente dos átomos que formam a rede cristalina substituiu um átomo da estrutura e geralmente apresentam diferenças de no máximo 15% do raio do átomo da estrutura original. Um exemplo de átomos de impureza substitucional são os átomos de zinco no latão. Os átomos de zinco têm raio igual a 0,133 nm e substituem alguns átomos do cobre que tem raio 0,128 nm. Já átomos de impurezas intersticiais são muito menores do que os átomos da rede cristalina. Esses tipos de átomos de impurezas intersticiais encaixam-se no espaço vazio entre os átomos da estrutura cristalina. É importante destacar que a adição de impurezas também pode resultar na formação de uma solução sólida que se forma quando a adição de soluto (elemento em menor quantidade) ao material hospedeiro (solvente – material em maior quantidade) não provoca nenhuma mudança na estrutura cristalina. A Figura 2.20 apresenta os diferentes tipos de defeitos pontuais.

Figura 2.20 | Defeitos pontuais

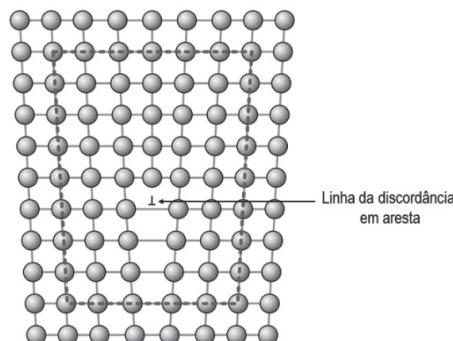


Fonte: adaptada de <[https://sites.google.com/site/danamaterials/imperfections/Fracture\\_Eng003.jpg](https://sites.google.com/site/danamaterials/imperfections/Fracture_Eng003.jpg)>. Acesso em: 17 mar. 2016.

Outro tipo comum de defeitos são os defeitos lineares, e as discordâncias são o tipo mais comum. As discordâncias são um defeito em que alguns átomos se encontram fora da sua posição na estrutura cristalina. A principal função das discordâncias na microestrutura é controlar a resistência ao escoamento e a subsequente deformação plástica dos sólidos cristalinos a temperaturas normais. As discordâncias também participam do crescimento dos cristais e das estruturas de interfaces entre os cristais e são geradas e movidas quando uma tensão é aplicada. Existem dois tipos básicos de discordâncias, a discordância aresta e a discordância espiral. Na verdade, a maioria das discordâncias são, provavelmente, um híbrido das formas de aresta e espiral. A discordância aresta pode ser facilmente visualizada como um semiplano extra de átomos em uma estrutura cristalina. Muitas vezes esses semiplanos são chamados de

linhas da discordância devido aos átomos estarem alinhados ao longo de uma linha (Figura 2.21). Na discordância em aresta as ligações interatômicas são significativamente distorcidas nas imediações da linha de discordância. Compreender o movimento de uma discordância é fundamental para entender a deformação plástica nos materiais. A deformação ocorre quando um deslocamento se move através de um cristal.

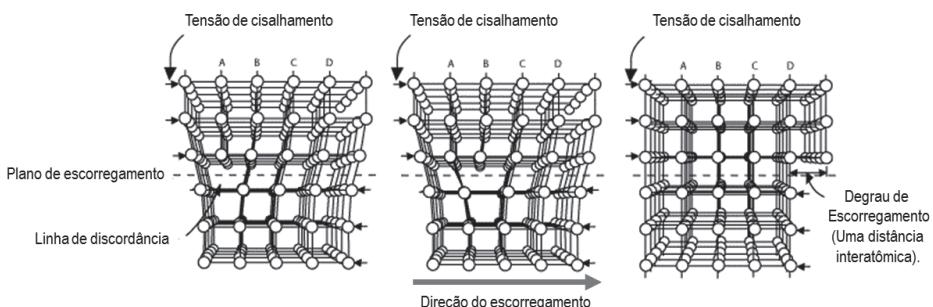
Figura 2.21 | Discordância aresta



Fonte: <[https://de.wikipedia.org/wiki/Versetzung\\_\(Materialwissenschaft\)#Versetzungsmultiplikation](https://de.wikipedia.org/wiki/Versetzung_(Materialwissenschaft)#Versetzungsmultiplikation)>. Acesso em: 17 mar. 2016.

A discordância se move de forma semelhante a uma lagarta, ou seja, uma pequena quantidade por vez. A discordância na metade superior do cristal está deslizando plano por plano, da esquerda para a direita, iniciando na posição A passando por B até formar uma unidade de distância interatômica à direita do cristal. Assim, uma pequena fração das ligações interatômicas são quebradas durante o movimento da discordância. Na Figura 2.22 se observa o movimento de uma discordância quando o cristal é sujeito a uma tensão de cisalhamento, formando uma unidade de distância interatômica.

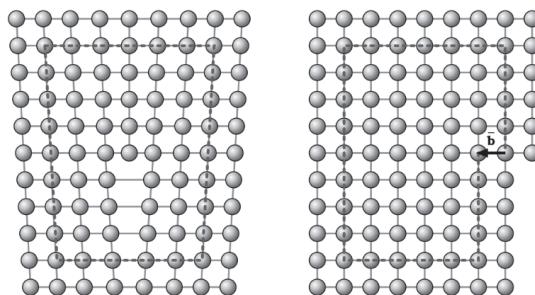
Figura 2.22 | Movimento de discordância



Fonte: adaptada de <[http://www.studfiles.ru/html/2706/277/html\\_H5Qyji8WRS.W1Wg/htmlconvd-rXFaYF41x1.jpg](http://www.studfiles.ru/html/2706/277/html_H5Qyji8WRS.W1Wg/htmlconvd-rXFaYF41x1.jpg)>. Acesso em: 18 mar. 2016.

A magnitude e a direção da distorção da rede associada a uma discordância são expressas em termos de um vetor de Burgers representado por  $\mathbf{b}$  como mostra a Figura 2.23 (CALLISTER; RETHWISCH, 2013).

Figura 2.23 | Vetor de Burgers



Fonte: <[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/dd/Burgers\\_vektor.svg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/dd/Burgers_vektor.svg)>. Acesso em: 18 mar. 2016.

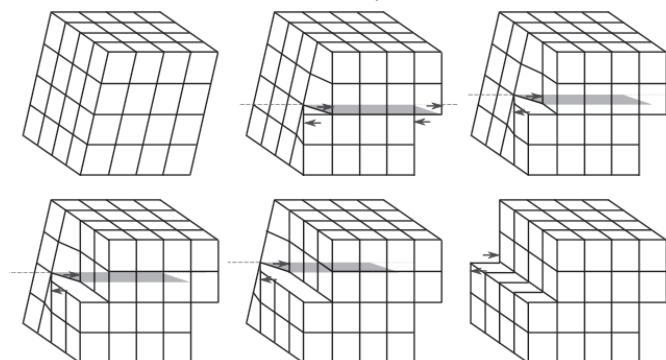


### Refletá

Você compreendeu como ocorre o movimento de uma discordância? E que é muito similar a uma “ola mexicana”? O vídeo “Dislocation movement”, disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=3VHKGGoyZQk>> (acesso em: 20 mar. 2016) apresenta o movimento de uma discordância em um material cristalino.

Já a discordância do tipo espiral é um pouco mais difícil de visualizar. A natureza de uma discordância é definida pelas orientações relativas da linha da discordância e do vetor de Burgers. Em uma discordância aresta elas são perpendiculares, enquanto em uma discordância espiral elas são paralelas (CALLISTER; RETHWISCH, 2013). A Figura 2.24 mostra a representação do movimento de uma discordância espiral.

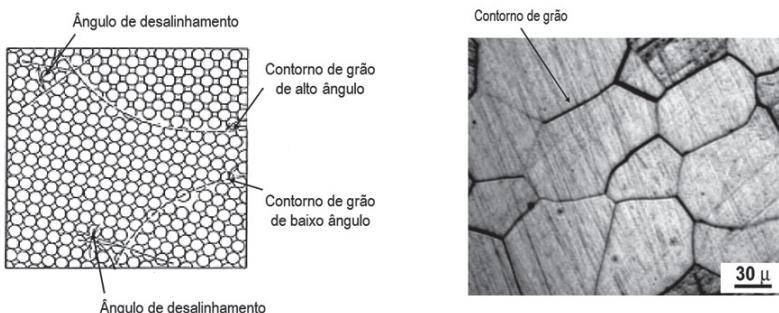
Figura 2.24 | Movimento de uma discordância espiral



Fonte: <[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Dislocation\\_vis\\_et\\_deformation\\_3d.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Dislocation_vis_et_deformation_3d.svg)>. Acesso em: 18 mar. 2016.

Os defeitos interfaciais são defeitos bidimensionais que aparecem em cristais em que normalmente o material apresenta estruturas cristalinas ou orientações cristalográficas diferentes. Esses defeitos podem ser divididos em: superfícies externas, contornos de grão, contornos de fase e contornos de macla. Nos defeitos de superfície externa, cada átomo na superfície já não apresenta o número de coordenação adequado e as ligações atômicas já se encontram rompidas e, assim, os átomos encontram-se em estado de maior energia. Outro tipo de defeito interfacial é o contorno de grão que é o limite onde termina e começa outro grão, os sólidos são geralmente constituídos por um número de grãos que podem variar em comprimento e na transição de suas orientações cristalinas em relação a um grão adjacente. Quando a diferença entre as orientações cristalinas dos grãos é pequena utiliza-se o termo contorno de grão baixo ângulo, enquanto utiliza-se o termo contorno de grão de alto ângulo quando esse desajuste de orientação é grande. A Figura 2.25 apresenta um esquema dos contornos de grão e uma micrografia de um metal policristalino com os limites de grão evidenciados por ataque ácido.

Figura 2.25 | Esquema mostrando os contornos de grão baixo e alto e micrografia eletrônica de transmissão de um metal policristalino



Fonte: elaborada pelo autor.

O tamanho dos grãos pode ser controlado pela taxa de resfriamento quando um material é fundido ou tratado termicamente. Geralmente, um resfriamento rápido produz grãos menores, enquanto um resfriamento lento produz grãos maiores. O tamanho do grão pode ser determinado utilizando o método desenvolvido pela Sociedade Americana para Testes e Materiais (ASTM – American Society of Testing and Materials), no qual se utilizam vários quadros comparativos com números atribuídos de 1 a 10 que é chamado número do tamanho do grão. Para usar esse método uma amostra deve ser preparada adequadamente e fotografada com uma ampliação de 100 ×, assim o tamanho do grão é determinado pelos grãos que mais se assemelham aos grãos da micrografia. A comparação dos quadros para determinação do tamanho de grão está relacionada ao número médio de grãos por polegada quadrada sob ampliação de 100 ×. Esses parâmetros estão relacionados pela Equação 2.7:

$$N = 2^{n-1} \quad (2.7)$$

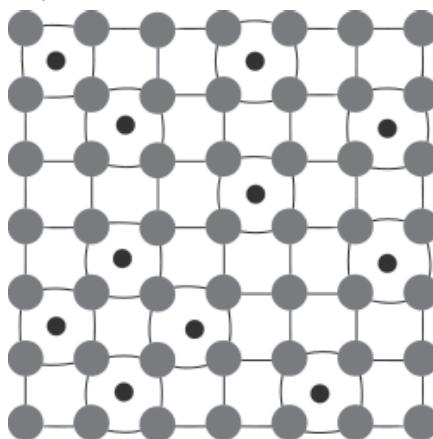
Em que  $n$  representa o número do tamanho de grão.

Outro tipo de defeito encontrado nos materiais sólidos são os defeitos volumétricos. É comum dividi-los em quatro classes que se baseiam na combinação do tamanho e efeito da partícula: **Precipitados** – são pequenas partículas introduzidas na matriz de uma reação no estado sólido e que aumentam a resistência das ligas estruturais; **Dispersantes** – são partículas maiores que se comportam como uma segunda fase e adicionalmente influenciam o comportamento da fase primária; **Inclusões** – são geralmente constituintes indesejáveis na microestrutura; **Vazios (ou poros)** – são causadas por gases que estão presos durante a solidificação ou por condensação vaga no estado sólido e são quase sempre defeitos indesejáveis.

### Sem medo de errar

Chegamos ao final do estudo desta seção e, neste momento, como vendedor técnico da metalúrgica, você deve ser capaz de responder às dúvidas do cliente: o que são essas impurezas? E quais tipos de defeitos o ferro  $\alpha$  pode apresentar? As impurezas também são consideradas defeitos pontuais e são do tipo impureza substitucional em que um átomo diferente dos átomos que formam a rede cristalina substituiu um átomo da estrutura e geralmente apresentam diferenças de no máximo 15% do raio do átomo da estrutura original. Um exemplo de átomos de impureza substitucional são os átomos de zinco no latão. Os átomos de zinco têm raio igual a 0,133 nm e substituem alguns átomos do cobre que tem raio 0,128 nm. Já átomos de impurezas intersticiais são muito menores do que os átomos da rede cristalina. Esses tipos de átomos de impurezas intersticiais encaixam-se no espaço vazio entre os átomos da estrutura cristalina. É importante destacar que a adição de impurezas também pode resultar na formação de uma solução sólida que se forma quando a adição de soluto (elemento em menor quantidade) ao material hospedeiro (solvente – material em maior quantidade) não provoca nenhuma mudança na estrutura cristalina. A Figura 2.26 apresenta um esquema do que poderia acontecer com o ferro  $\alpha$  e os átomos de carbono. A rede cristalina é “esticada” por meio da adição de soluto intersticial provocando uma tensão. No caso do ferro  $\alpha$  o soluto seria o carbono e, o ferro, o solvente. Os átomos de carbono nos locais intersticiais da rede criam um campo de tensão que impede o movimento de deslocação e consequentemente aumenta a resistência mecânica.

Figura 2.26 | Esquema de impurezas intersticiais



Fonte: <[https://en.wikipedia.org/wiki/Strengthening\\_mechanisms\\_of\\_materials](https://en.wikipedia.org/wiki/Strengthening_mechanisms_of_materials)>. Acesso em: 28 mar. 2016.

O ferro alfa, assim como os outros materiais sólidos, pode apresentar diversos tipos de defeitos, tais como: defeitos pontuais; defeitos lineares; defeitos interfaciais e os defeitos volumétricos. E como observamos, muitas vezes, a presença desses defeitos é imprescindível para termos materiais com determinadas propriedades.

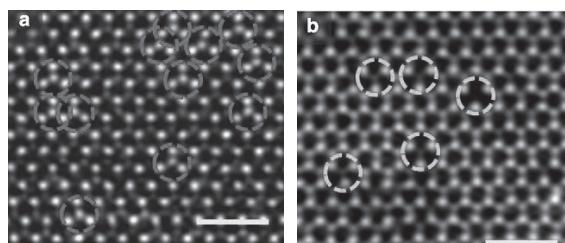
## Avançando na prática

### Imperfeições cristalinas

#### Descrição da situação-problema

Um engenheiro de materiais, ao realizar uma análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV), obteve a micrografia apresentada na Figura 2.27. Como responsável técnico pelo laboratório, nosso amigo precisa emitir um laudo sobre esse material que é o dissulfeto de molibdênio ( $\text{MoS}_2$ ) – um sólido branco utilizado como lubrificante devido às suas propriedades de baixo atrito. O engenheiro terá que recorrer aos conceitos aprendidos na faculdade durante a disciplina *Ciência dos Materiais*.

Figura 2.27 | Micrografia obtida por microscopia eletrônica de varredura (MEV)



Fonte: <[https://en.wikipedia.org/wiki/Crystallographic\\_defect](https://en.wikipedia.org/wiki/Crystallographic_defect)>. Acesso em: 28 mar. 2016.

Baseado na micrografia, é possível identificar os tipos de defeitos na estrutura cristalina do dissulfeto de molibdênio que deveriam constar no laudo?

### Resolução da situação-problema

A micrografia apresentada do dissulfeto de molibdênio traz dois tipos de defeitos: na Figura 2.27a os átomos de molibdênio (Mo) substituem os átomos de enxofre (S), ou seja, são considerados impurezas e defeitos pontuais. Os defeitos pontuais do tipo impureza substitucional é quando um átomo diferente dos átomos que formam a rede cristalina substitui um átomo da estrutura e geralmente apresentam diferenças de no máximo 15% do raio do átomo da estrutura original. Já na Figura 2.27b temos outro tipo de defeito pontual, as lacunas. Esse tipo de defeito é muito comum especialmente em altas temperaturas e ocorre quando os átomos estão frequentemente em movimento e mudam de posições aleatoriamente, deixando para trás sítios da rede vazios. Na micrografia apresentada na Figura 2.27b é possível observar a ausência de átomos de enxofre (S) originando a lacuna.

### Faça valer a pena

**1.** Os defeitos pontuais são regiões em que existe a ausência de um átomo ou o átomo encontra-se em uma região irregular na estrutura cristalina.

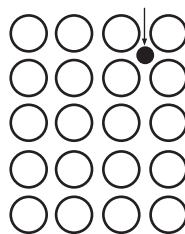
Assinale a alternativa que apresenta somente tipos de defeitos pontuais:

- a) Lacunas e trincas
- b) Autointersticial e impurezas substitucionais
- c) Lacunas e poros
- d) Autointersticial e contornos de grãos
- e) Impurezas intersticiais e trincas

**2.** Sabendo que a massa específica da prata é igual a  $9,5 \text{ g/cm}^3$ , peso atômico igual a  $107,9 \text{ g/mol}$ , o número de Avogadro igual a  $6,023 \times 10^{23} \text{ átomos/mol}$  e energia de formação de uma lacuna é  $1,10 \text{ eV/átomo}$ , o número de lacunas da prata a  $800^\circ\text{C}$  é igual a:

- a)  $3,63 \times 10^{17} \text{ lacunas.m}^{-3}$
- b)  $3,63 \times 10^{17} \text{ lacunas.cm}^{-3}$
- c)  $36,3 \times 10^{17} \text{ lacunas.cm}^{-3}$
- d)  $3,63 \times 10^{19} \text{ lacunas.cm}^{-3}$
- e)  $36,3 \times 10^{19} \text{ lacunas.m}^{-3}$

**3.** A figura abaixo apresenta um tipo comum de defeitos em sólidos cristalinos, conforme indicado:



Fonte: elaborada pelo autor.

Assinale a alternativa que apresenta corretamente esse tipo de defeito.

- a) Impureza substitucional
- b) Impureza intersticial
- c) Vacâncias
- d) Poros
- e) Discordâncias



# Seção 2.4

## Difusão

### Diálogo aberto

Prezado aluno, novamente seja bem-vindo! Nesta última seção da Unidade 2 vamos estudar sobre a difusão atômica, um fenômeno muito importante que nos ajuda a compreender por que os materiais submetidos a tratamentos térmicos, como os metais, apresentam melhorias em suas propriedades. O estudo da difusão nos ajuda analisar a inter-relação entre a estrutura, o processamento, as propriedades e o desempenho de um material. A partir dos mecanismos de difusão vamos entender como é possível introduzir átomos de impurezas em sólidos cristalinos e qual a relação com o tempo e a temperatura. Adicionalmente vamos compreender que para ocorrerem os fenômenos da difusão é necessária a presença de imperfeições na rede cristalina, como os defeitos de lacunas e os defeitos em que átomos estão localizados em uma posição intersticial. No nosso dia a dia é muito comum usufruirmos de equipamentos em que algumas peças ou materiais dependeram do processo de difusão antes de sua aplicação/utilização. E onde podemos encontrar essas peças ou materiais no nosso cotidiano? Quer um exemplo de um objeto em que ocorre o fenômeno da difusão? As garrafas plásticas! No processo de fabricação de garrafas plásticas ocorre a difusão do dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). Agora vamos iniciar seu último desafio desta unidade: você, como vendedor técnico de uma metalúrgica, está negociando a venda de um grande lote de ferro  $\alpha$  para um cliente bem exigente. O ferro alfa será utilizado em diversas aplicações e em diferentes condições de temperatura, mas, por sigilo empresarial, o cliente não lhe informou a aplicação exata. Justamente por esse motivo você tem sido questionado sobre algumas características do material como as propriedades exibidas em certas temperaturas. No último contato você esclareceu que o ferro alfa, assim como os outros materiais sólidos, pode apresentar diversos tipos de defeitos, tais como: defeitos pontuais; defeitos lineares; defeitos interfaciais e os defeitos volumétricos. E que muitas vezes a presença desses defeitos são imprescindíveis para termos materiais com determinadas propriedades. Mas, além de exigente, o cliente é muito curioso e lançou uma nova pergunta: como é possível aumentar a dureza do ferro alfa? Uma engrenagem de aço, por exemplo, é possível aumentar a dureza dessa peça? No estudo desta seção você será capaz de descrever os dois mecanismos da difusão e apontar as principais diferenças entre eles. Você também terá a habilidade em calcular

o coeficiente de difusão para um determinado material a uma temperatura conhecida. Ao final desta seção, você conhecerá conceitos e aspectos importantes que devem ser considerados na seleção de um material adequado para uma determinada aplicação. Lembre-se, esta é sua última oportunidade de convencer o cliente e fechar a venda.

Bons estudos e boa sorte!

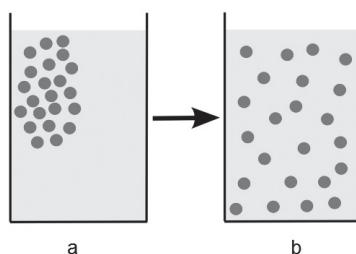
### Não pode faltar

A difusão é um fenômeno que ocorre no interior de materiais sólidos, líquidos e gasosos e, genericamente, pode ser definida como o fluxo de átomos ou espécies de uma região de elevada concentração a uma região de baixa concentração e que dependem essencialmente do gradiente de concentração e da temperatura (ASKELAND; WRIGHT, 2014).

Nos casos em que o conceito de difusão está associado a um determinado tipo de material é comum encontrarmos definições que utilizam termos mais específicos quanto à natureza do material como:

- Difusão é o fenômeno de transporte de matéria por movimento: atômico (nos metais), íons (nas cerâmicas) e macromoléculas (nos polímeros) que dependem do gradiente de concentração e temperatura. Atualmente vários processos tecnológicos importantes necessitam do controle do aumento ou da diminuição da difusão, como o endurecimento superficial de aços na condutividade elétrica de materiais cerâmicos condutores, em componentes microeletrônicos e fibras ópticas (ASKELAND; WRIGHT, 2014). E quando ocorre a difusão? Vejamos alguns exemplos: observe a Figura 2.28, nela temos algumas partículas dissolvidas em um copo com água. Inicialmente essas partículas encontram-se próximas ou agrupadas (Figura 2.28a), posteriormente, observa-se que se todas as partículas se movem aleatoriamente em torno da água, as partículas irão eventualmente se distribuir de forma aleatória e uniforme, e a difusão continuará ocorrendo mesmo sem o fluxo da água (Figura 2.28b).

Figura 2.28 | Representação esquemática da difusão de partículas em meio líquido



Fonte: <<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/1/12/Diffusion.svg/2000px-Diffusion.svg.png>>. Acesso em: 9 abr. 2016.

O mesmo fenômeno pode ser observado quando pingamos algumas gotas de tintura roxa em um bêquer com água, é muito mais fácil compreendermos a difusão da tintura em água através da observação dos diferentes bêqueres apresentados na Figura 2.29. Inicialmente as partículas da tintura estão agrupadas e, com movimentos aleatórios, essas partículas se espalham na água de maneira uniforme e homogênea, não havendo regiões com diferentes concentrações de tinta.

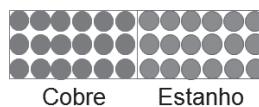
Figura 2.29 | Difusão da tintura roxa em água



Fonte: <[https://en.wikipedia.org/wiki/Diffusion#/media/File:Blausen\\_0315\\_Diffusion.png](https://en.wikipedia.org/wiki/Diffusion#/media/File:Blausen_0315_Diffusion.png)>. Acesso em: 9 abr. 2016.

Nos materiais sólidos o fenômeno é o mesmo, no entanto, não é tão simples de se observar, mas podemos fazer uma analogia com a difusão da tintura roxa. Vamos imaginar uma barra de cobre e uma barra de estanho que estão intimamente em contato entre as duas faces (Figura 2.30).

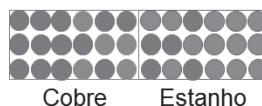
Figura 2.30 | Representação esquemática das barras de cobre (Cu) e estanho (Sn) e seus respectivos átomos



Fonte: elaborada pelo autor.

Se as barras fossem aquecidas a uma temperatura elevada (inferior à temperatura de fusão) durante um certo período de tempo e posteriormente fossem resfriadas, uma análise química indicaria o que está representado na Figura 2.31, ou seja, os átomos de cobre que se difundiram com os átomos de estanho e os átomos de estanho que se difundiram com os átomos de cobre. Esse processo em que átomos de um metal difundem (migram) para o interior de outro metal é denominado interdifusão ou difusão de impurezas.

Figura 2.31 | Representação esquemática da difusão de impurezas (Cu-Sn)



Fonte: elaborada pelo autor.

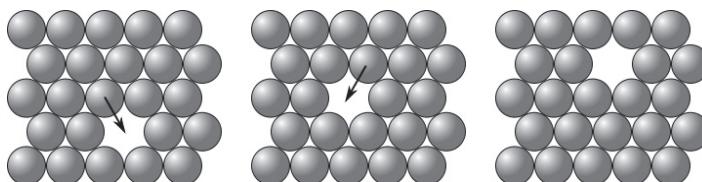


### Pesquise mais

O artigo intitulado *Difusão em materiais cerâmicos: um estudo preliminar* apresenta e discute o fenômeno da difusão nos materiais cerâmicos no qual foi possível constatar a ocorrência da interdifusão. Disponível em: <[http://www.ceramicaindustrial.org.br/pdf/v07n04/v7n4\\_3.pdf](http://www.ceramicaindustrial.org.br/pdf/v07n04/v7n4_3.pdf)>. Acesso em: 9 abr. 2016.

A difusão não ocorre somente entre diferentes metais ou diferentes sólidos, este fenômeno também ocorre em sólidos puros, nos quais os átomos mudam de posição e são do mesmo tipo não havendo mudanças na composição. Esse tipo de difusão é denominado autodifusão. Para que um átomo ou espécie mude de posição são necessárias duas condições: primeiro deve haver uma posição adjacente (vizinha) vazia e o átomo deve ter uma quantidade de energia capaz para romper as ligações químicas entre os seus átomos vizinhos causando uma distorção na rede cristalina durante seu movimento. Essa energia é de origem vibracional e possibilita que o átomo se desloque ao longo da rede cristalina, porém apenas uma pequena fração de átomos é capaz de se mover devido à magnitude das energias vibracionais. A fração de átomos aumenta com o aumento da temperatura (CALLISTER; RETHWISH, 2013). Especificamente nos materiais metálicos, os movimentos dos átomos acontecem prioritariamente por difusão em lacunas e difusão intersticial. Como o próprio nome sugere, na difusão em lacunas ocorre o movimento do átomo e da lacuna existente na rede cristalina do metal, em que o átomo ocupa a posição da lacuna e a lacuna passa a ocupar a posição do átomo (Figura 2.32).

Figura 2.32 | Difusão por lacunas



Fonte: <[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Diffusion\\_lacunaire.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Diffusion_lacunaire.svg)>. Acesso em: 10 abr. 2016.



### Refletá

A quantidade de lacunas aumenta em função da temperatura. De que forma esse fenômeno está relacionado com a difusão?

A difusão intersticial é outro tipo de movimento atômico no qual os átomos inicialmente localizados em uma posição intersticial migram para uma posição intersticial adjacente e vazia (Figura 2.33).

Figura 2.33 | Difusão intersticial



Fonte: elaborada pelo autor.

Esse mecanismo é observado na interdifusão de impurezas que possuem raios suficientemente pequenos para ocupar esses interstícios como os átomos de carbono, hidrogênio, oxigênio e nitrogênio. Nesse mecanismo não é preciso ter lacunas para que ocorra a movimentação das espécies. Na maioria dos metais esse tipo de difusão ocorre mais rapidamente do que a difusão por lacunas, justamente pelos menores tamanhos atômicos e consequentemente pela fácil movimentação. Nos materiais cerâmicos, os cátions, que são menores, difundem-se mais rapidamente que os ânions (ASKELAND; WRIGHT, 2014). A movimentação atômica ou de íons só é possível quando é fornecida uma energia suficiente e capaz de fazer com que essas espécies saltem para uma nova posição, no entanto, para que as espécies ocupem essa nova posição, antes, é necessário vencer uma barreira de energia denominada energia de ativação ( $Q$ ). A taxa com que os átomos, íons e outras partículas que se difundem em um material pode ser aferido através do fluxo  $J$ , no entanto, para melhor compreensão, vamos nos referir apenas a átomos. O fluxo  $J$  corresponde ao número de átomos que se movimentam por unidade de área, por unidade de tempo em regime estacionário ao longo de uma única direção ( $x$ ) e é determinado pela Equação 2.8, também conhecida como primeira lei de Fick:

$$J = -D \frac{dC}{dx} \quad (2.8)$$

em que  $D$  é a constante de proporcionalidade ( $\text{m}^2/\text{s}$ ), o sinal negativo indica a direção da difusão que se dá contra o gradiente de concentração  $\frac{dC}{dx}$ , isto é, da concentração mais alta para a mais baixa (CALLISTER; RETHWISH, 2013). No entanto, na maioria das situações ocorre a difusão em regime transitório ou não estacionário em que o fluxo de difusão e a concentração de gradiente em um determinado ponto no interior do sólido variam com o tempo. Assim, faz-se necessária a segunda lei de Fick, expressa pela Equação 2.9:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D \frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad (2.9)$$

Caso seja estabelecido que o coeficiente de difusão  $D$  não é uma função da posição  $x$  e da concentração  $C$  do átomo em difusão, a equação que corresponde à segunda lei de Fick pode ser reescrita de maneira simplificada conforme a Equação 2.10:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \left( \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \right) \quad (2.10)$$

A solução dessa expressão depende das condições iniciais e de contorno em cada situação específica e uma das soluções é expressa na Equação 2.11:

$$\frac{C_x - C_0}{C_s - C_0} = 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \quad (2.11)$$

Na qual  $C_x$  representa a concentração em uma profundidade  $x$  após um tempo  $t$ ,  $C_s$  é a concentração constante na superfície,  $C_0$  é a concentração uniforme inicial dos átomos em difusão no material e  $\operatorname{erf}(x/2\sqrt{Dt})$  é a função erro de Gauss.



### Assimile

A função erro de Gauss, também conhecida apenas como função erro, foi desenvolvida para elaborar o cálculo da integral da distribuição normal.

Alguns fatores, como a temperatura, influenciam a difusão. O aumento da temperatura fornece a energia térmica necessária aos átomos e íons para vencerem a energia de ativação. A dependência dos coeficientes de difusão se relacionam com a temperatura ou a energia térmica por meio da Equação 2.12:

$$D = D_0 \exp \left( \frac{-Q_d}{RT} \right) \quad (2.12)$$

em que  $D_0$  é uma constante pré-exponencial independente da temperatura ( $\text{m}^2/\text{s}$ ),  $R$  é a constante universal dos gases ideais ( $\frac{1,987\text{cal}}{\text{mol.K}}$  ou  $\frac{8,314\text{J}}{\text{mol.K}}$  ou  $\frac{8,62\text{eV}}{\text{átomo.K}}$ ),  $T$  é a temperatura absoluta (K) e  $Q_d$  é a energia de ativação para a difusão. Em via de regra, as energias de ativação são menores na difusão intersticial quando comparadas à difusão por lacunas. A Tabela 2.2 apresenta alguns valores das energias de ativação para a difusão de átomos em alguns materiais que são representados em pares denominados pares de difusão, que apresentam a combinação do átomo de um elemento químico em difusão em uma certa matriz (metal hospedeiro). Valores baixos de energia de ativação indicam uma difusão mais fácil, enquanto valores elevados indicam uma difusão mais difícil. No caso da autodifusão a energia de ativação é a energia necessária para se criar uma lacuna e assim ocorrer o movimento do átomo.

Tabela 2.2 | Dados de difusão

Especie em Difusão	Metal Hospedeiro	$D_0(m^2/s)$	$Q_d(kJ/mol)$
Fe	Fe- $\alpha$	$2,8 \times 10^{-4}$	251
Zn	Cu	$2,4 \times 10^{-5}$	189
Cu	Cu	$7,8 \times 10^{-5}$	211
Al	Al	$2,3 \times 10^{-5}$	144
C	Fe- $\alpha$	$2,8 \times 10^{-4}$	251

Fonte: adaptado de Callister e Rethwisch (2013).



### Exemplificando

É possível determinar o coeficiente de difusão do carbono a 600 °C?

Resposta: utilizando os dados da Tabela 2.2 temos:

$$D = D_0 \exp\left(\frac{-Qd}{RT}\right)$$

$$D = (2,8 \times 10^{-4} m^2 / s) \exp\left[-\frac{(251000 J / mol)}{(8,31 J / mol .K)(600 + 273 K)}\right]$$

$$D = (2,8 \times 10^{-4} m^2 / s) \exp[-34,6]$$

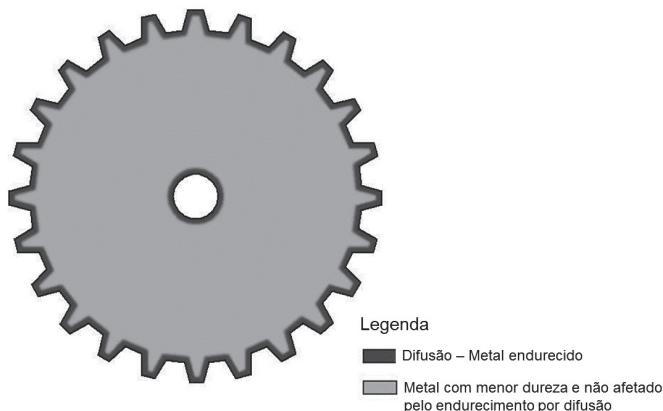
$$D = 2,63 \times 10^{-19} m^2 / s$$

Os cálculos dos coeficientes de difusão mostram como a temperatura altera a magnitude da difusão.

### Sem medo de errar

Hoje certamente foi seu grande dia na empresa. Você, como vendedor técnico de uma metalúrgica, estava atendendo um cliente muito exigente e muito curioso e foi questionado por que o ferro  $\alpha$  apresenta determinadas características. Você explicou o que são impurezas em sólidos cristalinos e o seu último desafio foi explicar se era possível aumentar as durezas do ferro alfa e de peças como as engrenagens de aço. Como um bom vendedor, você estudou, ao longo desta seção, a difusão e que é definida para os metais como o transporte de matéria por movimento atômico. Atualmente vários processos tecnológicos necessitam do controle do aumento ou da diminuição da difusão como o endurecimento superficial de aços e, neste caso, objetivamente você pode dizer ao cliente que é possível aumentar a dureza do ferro  $\alpha$  e a superfície de uma engrenagem de aço, graças à difusão, e utilizou a Figura 2.34 para explicar melhor esse fenômeno para o cliente.

Figura 2.34 | Corte esquemático de uma engrenagem metálica com superfície endurecida



Fonte: adaptada de <[https://en.wikipedia.org/wiki/Diffusion\\_hardening#/media/File:GearDiagram.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/Diffusion_hardening#/media/File:GearDiagram.jpg)>. Acesso em: 10 abr. 2016.

Na Figura 2.34 é possível observar que a superfície da engrenagem foi endurecida, isto é, houve o aumento da dureza superficial. A camada mais externa da superfície foi endurecida por um tratamento térmico adequado e em elevada temperatura, e permitiu que átomos de carbono da atmosfera se difundissem, ou seja, se movimentassem para o interior da superfície da engrenagem. A superfície que apresenta maior dureza é destacada na figura como uma borda escura. O aumento do teor de carbono é o responsável pelo aumento da dureza. Dessa forma, temos uma engrenagem de aço que apresenta uma elevada resistência ao desgaste. Adicionalmente você foi capaz de explicar que a difusão apresenta dois mecanismos: difusão por lacunas e difusão intersticial. E explanou que quando o fluxo não varia com o tempo ocorre a difusão em regime estacionário e quando existe a variação do fluxo a difusão ocorre em regime não estacionário. Você, um excelente e dedicado vendedor, conquistou a confiança do cliente e finalmente fechou a venda do lote de ferro  $\alpha$ . Parabéns!

## Avançando na prática

### Difusão

#### Descrição da situação-problema

Hoje pela manhã você acordou perdendo a hora do trabalho, se trocou rapidamente e colocou na sua mochila o computador e o antigo aparelho de celular. Chegando ao trabalho, você imaginou que seria um dia normal como os outros, mas próximo ao horário do almoço o diretor da empresa pediu para que você o encontrasse em sua sala. Ao adentrar na sala do diretor, ele abriu um largo sorriso e lhe agradeceu pela dedicação e pelo excelente atendimento prestado a um cliente e, também, por

você ter conseguido fechar a venda do lote de ferro α. O diretor estava tão feliz que lhe deu uma boa quantia em dinheiro como reconhecimento do seu trabalho. Você educadamente agradeceu ao diretor e foi para o shopping trocar seu celular por aquele smartphone que acabou de chegar às lojas. Todo feliz, você comprou o smartphone e voltou para a empresa, quando percebeu que o chip do seu antigo celular era grande para o seu aparelho novo, mas hoje é muito fácil encontrarmos soluções para alguns problemas fazendo pesquisas na internet, e você, sabiamente, imprimiu um gabarito com as dimensões do chip adequado e com um estilete cortou o antigo chip, o inseriu no smartphone, e, para o seu azar o chip não foi reconhecido pelo aparelho (Figura 2.35). Quais materiais são utilizados na fabricação dos chips? Como eles funcionam? E, o mais importante, onde entra a difusão em tudo isso?

Figura 2.35 | Você e o seu chip



Fonte: <<https://i.ytimg.com/vi/DeSDt3clJ8M/maxresdefault.jpg>>. Acesso em: 10 abr. 2016.

### Resolução da situação-problema

Os chips são encontrados em celulares, computadores, televisões e smartphones; são fabricados por materiais semicondutores como os monocristais de silício. Para que os chips funcionem adequadamente eles são submetidos a dois tratamentos térmicos: no primeiro, átomos de impurezas são difundidos no silício a partir de uma fase gasosa cuja pressão é mantida constante; já o segundo tratamento é utilizado para migrar os átomos das impurezas que estão inicialmente na superfície para o interior do silício, com o objetivo de obter uma distribuição de concentração de impurezas mais uniforme sem o aumento do teor global das impurezas. Esse tratamento é conduzido a uma temperatura mais elevada que a primeira etapa e exposto a uma atmosfera oxidante formando uma camada de óxido na superfície. A difusão acontece onde menos esperamos e agora é melhor você se difundir até uma loja e comprar um novo chip para o seu smartphone.

## Faça valer a pena

**1.** Assinale a alternativa que preenche as lacunas adequadamente:

"A difusão é o fenômeno de transporte de matéria por \_\_\_\_\_ nos materiais metálicos e que depende do \_\_\_\_\_ e da \_\_\_\_\_. Atualmente vários processos tecnológicos importantes necessitam do controle difusão como, por exemplo, o \_\_\_\_\_ de aços".

- a) Deslocamento iônico, arranjo cristalino, célula unitária, endurecimento superficial.
- b) Movimento atômico, gradiente de concentração, temperatura, endurecimento superficial.
- c) Deslocamento de macromoléculas, arranjo cristalino, temperatura, eletromagnetismo.
- d) Movimento atômico, arranjo cristalino, temperatura, endurecimento superficial.
- e) Movimento iônico, gradiente de concentração, temperatura, eletromagnetismo.

**2.** A difusão não ocorre somente entre diferentes metais ou diferentes sólidos, este fenômeno também ocorre em sólidos puros, em que os átomos mudam de posição e são do mesmo tipo não havendo mudanças na composição.

Assinale a alternativa correta que apresenta a qual fenômeno o texto-base refere-se:

- a) Interdifusão
- b) Difusão de impurezas
- c) Difusão por lacunas
- d) Difusão intersticial
- e) Autodifusão

**3.** Julgue as afirmações verdadeiras (V) ou falsas (F) e assinale a alternativa correspondente com a sequência correta:

I. Para que um átomo ou espécie mude de posição é necessário, apenas, haver uma posição adjacente vazia e o átomo ter uma energia suficiente capaz de quebrar as ligações químicas entre os átomos adjacentes.

II. A energia vibracional possibilita que o átomo se desloque ao longo da rede cristalina, movendo uma fração significativa de átomos devido à magnitude das energias térmicas.

III. O fluxo atômico, no regime estacionário, corresponde a uma constante pré-exponencial que independe da temperatura e da concentração do gradiente.

- a) Apenas I é verdadeira.
- b) Apenas I e II são verdadeiras.
- c) I, II e III são verdadeiras.
- d) Apenas I e III são verdadeiras.
- e) Apenas II e III são verdadeiras.



# Referências

ASKELAND, D. R.; WRIGHT, W. J. **Ciência dos materiais**. São Paulo: Cengage Learning, 2014. 672 p.

BERNARDIN, A. M.; RIELLA, H. G. Difusão em materiais cerâmicos: um estudo preliminar. **Cerâmica Industrial**, Florianópolis, v. 7, n. 4, jun./ago., 2002. Disponível em: <[http://www.ceramicaindustrial.org.br/pdf/v07n04/v7n4\\_3.pdf](http://www.ceramicaindustrial.org.br/pdf/v07n04/v7n4_3.pdf)>. Acesso em: 9 abr. 2016.

BHADESHIA123. **Dislocation movement**. Disponível: <<https://www.youtube.com/watch?v=3VHKGGoyZQk>> Acesso em: 20 mar. 2016.

CALLISTER, W.; RETHWISH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais**: uma introdução. 8. ed. São Paulo: LTC, 2013. 840 p.

HIMOTO, K. **SC lattice**. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=0arPpHbKuys>>. Acesso em: 5 mar. 2016.

ManufacturingET. **Face-Centered Cubic Lattice Structure (fcc)**. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=RoyzZUJfo-Y>>. Acesso em: 5 mar. 2016.

SHACKELFORD, J. F. **Ciência dos materiais**. 6. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2008. 576 p.

SHARPEDGELEARNING'S CHANNEL. **Hexagonal Closed Packed Mechanical**. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=xyjW59-CYqk>>. Acesso em: 5 mar. 2016.

ZARBIN, A. J. G. Química de (nano)materiais. **Química Nova**, São Paulo, v. 30, n. 6, nov./dez. 2007. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-40422007000600016](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422007000600016)>. Acesso em: 5 mar. 2016.

ZARBIN, A. J. G.; OLIVEIRA, M. M. Nanoestruturas de carbono (nanotubos, grafeno): quo vadis? **Química Nova**, São Paulo, v. 36, n. 10, p. 1533-1539, 2013. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/qn/v36n10/09.pdf>>. Acesso em: 15 mar. 2016.



# Propriedades dos materiais

## Convite ao estudo

Seja novamente bem-vindo ao livro didático da disciplina de *Ciência dos Materiais*. Na primeira unidade, fomos apresentados à ciência dos materiais que está fundamentada na inter-relação entre composição/estrutura, propriedades, processamento e desempenho. Os materiais são comumente classificados em quatro grandes grupos: metais, cerâmicos, polímeros e compósitos. No entanto, vimos que existem outros materiais, que são classificados como inteligentes, semicondutores, biomateriais e nanomateriais. Compreendemos a importância do átomo e entendemos que o comportamento das partículas subatômicas, as diferentes ligações interatômicas e as forças e energias de ligação fazem os materiais apresentarem propriedades distintas. Já na segunda unidade tivemos a oportunidade de conhecer o conceito de célula unitária e nos aprofundamos no estudo da estrutura cristalina, compreendemos as diversas possibilidades de arranjos dos átomos e a diferença entre polimorfismo e alotropia. Posteriormente, estudamos os principais sistemas cristalinos e vimos a importância das imperfeições cristalinas e do fenômeno da difusão.

Nesta terceira unidade vamos conhecer um pouco sobre as diferentes propriedades exibidas pelos materiais, como as propriedades mecânicas, elétricas, térmicas, magnéticas e ópticas; assim, estudaremos mais um pilar da ciência dos materiais: as propriedades. Ao final desta unidade, você terá conhecido mais alguns conceitos que lhe permitirão selecionar materiais adequados para uma determinada aplicação, de modo a atender às características de desempenho esperadas, tanto no que se refere às características de serviço quanto às de processamento. É hora de enfrentarmos nosso próximo desafio: você foi contratado para prestar

algumas consultorias em uma multinacional que possui várias áreas de atuação. Em um primeiro momento, você será desafiado a estudar as propriedades dos materiais metálicos, sobretudo de metais resistentes à corrosão e que possam ser utilizados em aplicações em áreas tão diversas como energia, petróleo e biomedicina. Em um segundo momento, será a vez de auxiliar no projeto de órgãos artificiais e na utilização de materiais cerâmicos empregados como implantes. Posteriormente, você auxiliará a área de materiais poliméricos utilizados que estão sendo desenvolvidos como revestimento de materiais e componentes metálicos. Por fim, você ajudará um dos setores da empresa a produzir coletes à prova de balas que sejam resistentes, leves e que utilizem algum tipo de material compósito. Aluno, esteja engajado, estude, dedique-se. Já dizia um ilustre presidente norte-americano:

*"Você não consegue escapar da responsabilidade de amanhã esquivando-se dela hoje".*

(Abraham Lincoln)

# Seção 3.1

## Propriedades dos materiais metálicos

### Diálogo aberto

Caro aluno, seja bem-vindo à Seção 3.1 de *Ciência dos Materiais*. Ao longo desta disciplina, você tem sido desafiado a utilizar seus novos conhecimentos para solucionar diversos problemas. Hoje você está mais consciente em relação aos fundamentos da ciência dos materiais. Nós já compreendemos a estrutura do átomo e as ligações interatômicas que influenciam diretamente nas características e propriedades dos materiais. Posteriormente, foi necessário compreender a organização atômica que também influencia as propriedades dos materiais. A partir desta seção, você será apresentado às principais propriedades dos metais que futuramente, nas disciplinas específicas de cada área, serão estudadas em detalhes.

É hora de pensarmos no presente, neste novo desafio: você foi contratado para prestar consultoria em uma grande multinacional que atua em diversas áreas de materiais. Sua carreira como *trainee*, em um laboratório de materiais, foi iniciada muito cedo. Depois, você conseguiu uma vaga como vendedor técnico de uma metalúrgica. Essas experiências anteriores lhe deram know-how suficiente para que hoje você possa prestar consultorias a empresas que consomem e desenvolvem diferentes tipos de materiais.

Ao iniciar seu trabalho, você participou de uma reunião com o grupo responsável por desenvolver tubos para extração de gás e óleo, já que os tubos atuais apresentam baixa resistência à corrosão e se degradam ao longo do tempo. Será preciso responder às seguintes questões: quais são as principais propriedades dos metais? Qual seria uma alternativa para desenvolvermos uma liga resistente à corrosão e mais durável? Nesta seção, você será capaz de identificar as propriedades dos metais que serão melhoradas a partir dos conhecimentos adquiridos sobre as impurezas dos sólidos cristalinos. Assim, você definirá quais métodos deverão ser empregados para que, no final, tenhamos uma liga metálica que atenda às especificidades de utilização. É importante recordarmos que além dos quatro grandes grupos existem outros materiais. Você se lembra dos semicondutores, biomateriais, materiais inteligentes e nanomateriais? As nanopartículas, por exemplo, são de grande interesse científico. Na escala macro e microscópica um material deve ter propriedades físicas constantes, independentemente do seu tamanho, mas na escala nano as propriedades dependentes

de tamanho são frequentemente observadas. Assim, as características dos materiais podem mudar à medida que se aproxima da nanoscalas, apresentando propriedades interessantes e inesperadas. Ao final desta seção você será capaz de auxiliar o grupo de materiais metálicos, basta pensar em: composição, propriedades, impurezas e no melhor resultado dessa combinação para desenvolvêrmos uma liga metálica que tenha o desempenho esperado, isto é, que apresente resistência à corrosão e maior durabilidade. Bons estudos!

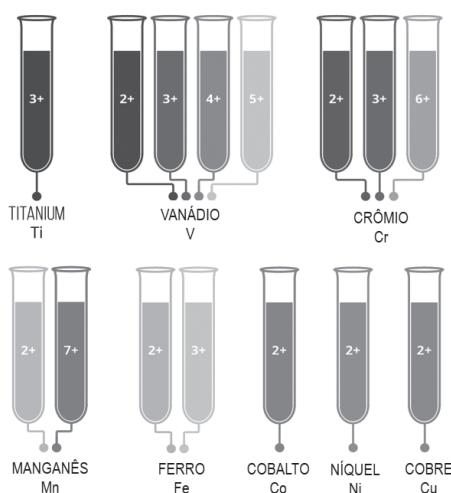
### Não pode faltar

A versatilidade da utilização dos materiais metálicos comprova a grande variedade das propriedades dos mais de 70 metais encontrados na tabela periódica. As principais propriedades exibidas por esses materiais são químicas, mecânicas, elétricas, térmicas, magnéticas e ópticas.

A propriedade química fundamental dos metais é a habilidade desses elementos se combinarem com outros metais ou elementos não metálicos e formarem um grande número de ligas que melhoram suas propriedades iniciais para utilizá-las em aplicações específicas, por exemplo, com a combinação de ferro, níquel e crômio temos uma série de ligas de aço inoxidável que são comumente encontradas. Os aços austeníticos são utilizados na construção civil para fins estruturais, os aços ferríticos são empregados em sistemas de exaustão de gases em motores de combustão e os aços martensíticos são utilizados em áreas de mineração e instrumentos odontológicos.

Metais como o níquel, vanádio, molibdênio, cobalto, terras-raras e do grupo da platina ativam reações catalíticas para a síntese de muitos produtos químicos orgânicos obtidos a partir do petróleo e uma grande variedade de sais e compostos metálicos melhoram as propriedades de produtos plásticos em termos de cor, brilho, resistência à chama e resistência à degradação. A Figura 3.1 apresenta as cores de íons metálicos de transição quando estão em solução aquosa e evidencia a razão pela qual vemos compostos e complexos de metais de transição coloridos.

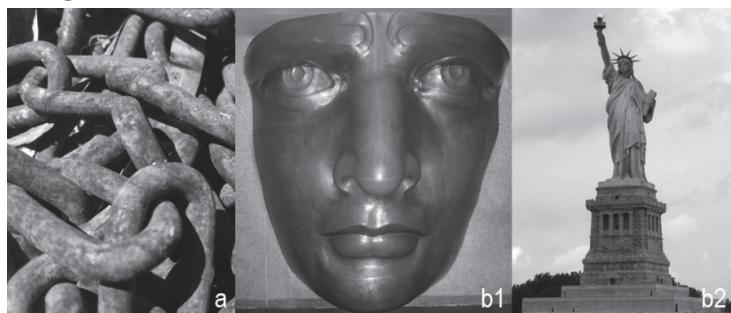
Figura 3.1 | Coloração de íons metálicos em solução aquosa



Fonte: elaborada pelo autor.

Isso ajuda a explicar, por exemplo, por que a ferrugem (óxido de ferro) apresenta cor laranja (Figura 3.2a) e a Estátua da Liberdade, feita de cobre (Figura 3.2b1), não apresenta mais a cor laranja brilhante e metálica do cobre, mas uma cor verde pálida dada pela formação de carbonato de cobre, produto constituído a partir de oxidações parciais que revestem as superfícies de metais como o cobre, bronze ou latão (Figura 3.2b2).

Figura 3.2 | Ferrugem e Estátua da Liberdade



Fonte: elaborada pelo autor.



### Pesquise mais

No canal Manual Mundo, assista a um teste de chamas com sais metálicos. Disponível em: <[https://www.youtube.com/watch?v=OMe\\_X-oh2mc](https://www.youtube.com/watch?v=OMe_X-oh2mc)>. Acesso em: 22 abr. 2016.

A grande utilização dos metais também é justificada pelas diversas propriedades mecânicas, possibilitando sua aplicação nos mais diferentes contextos. Entre as propriedades mecânicas exibidas por esses materiais, podemos citar a resistência e a ductilidade, que permitem o uso desses materiais em máquinas e estruturas. Os metais e suas ligas exibem ductilidade, maleabilidade e a capacidade de serem deformados plasticamente (isto é, sem quebrar), tornando-os fáceis de moldar em vigas (vigas de aço para a construção), extrusões (esquadrias de alumínio para portas e janelas), moedas, latas de metal e uma variedade de elementos de fixação (pregos e clipe de papel). As propriedades mecânicas de um material são aquelas que envolvem uma reação a uma carga aplicada.

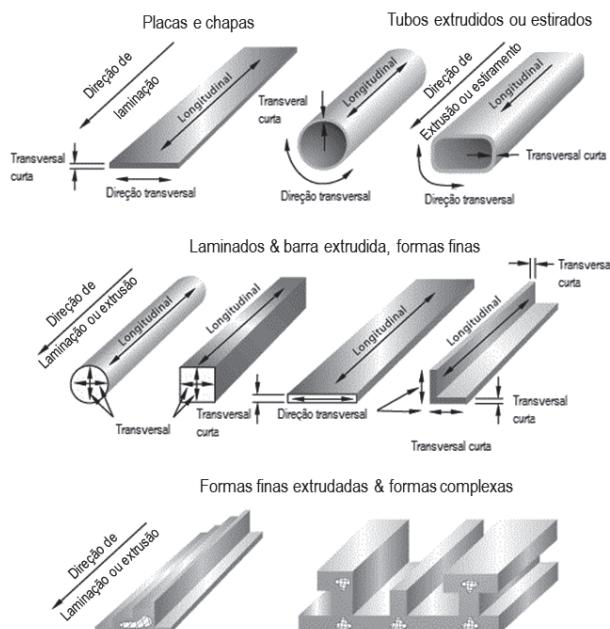


### Assimile

As propriedades mecânicas de um material são aquelas que envolvem uma reação a uma carga aplicada.

As propriedades mecânicas dos metais, por exemplo, determinam a gama de utilidades e estabelecem a vida útil esperada de um material. Essas propriedades também são utilizadas para ajudar a identificar e classificar o material e as mais comuns, além da resistência e ductilidade, são dureza, resistência ao impacto e resistência à fratura. A maioria dos materiais metálicos é anisotrópica, o que significa que as suas propriedades variam com a orientação. A variação nas propriedades ocorre, por exemplo, devido à direcionalidade da microestrutura (textura) formada durante a conformação mecânica ou em operações de trabalho a frio, entre outras causas. As propriedades mecânicas são geralmente específicas para a forma do produto, tais como placas, chapas, extrusão, moldagem, forjamento etc. Além disso, é comum ver propriedades mecânicas devido à direção da estrutura dos grãos. Em produtos como chapas e placas, a direção de rolamento é chamada de direção longitudinal, enquanto a largura do produto é chamada de direção transversal e a espessura, de direção transversal curta. As orientações dos grãos em produtos metálicos de acordo com diferentes processamentos são apresentadas na Figura 3.3:

Figura 3.3 | Orientações dos grãos em componentes metálicos



Áreas hachuradas são transversais e as demais áreas de acordo com a indicação acima

Fonte: <<http://www.pdhcenter.com/courses/m415/m415content.pdf>>. Acesso em: 22 abr. 2016.



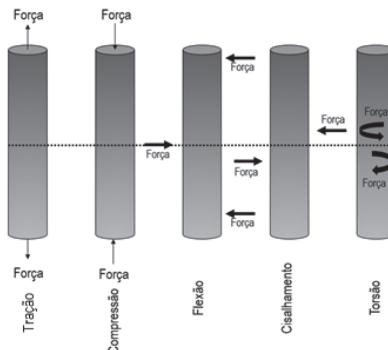
### Refletá

Barras de um determinado material que são obtidas por diferentes processos vão apresentar as mesmas propriedades?

As propriedades mecânicas de um material não são constantes e muitas vezes mudam em função de temperatura, taxa de carregamento e outras condições. Por exemplo, temperaturas inferiores à temperatura ambiente geralmente causam um aumento das propriedades de resistência das ligas metálicas; enquanto ductilidade, resistência à ruptura e alongamento, normalmente, diminuem. Temperaturas acima da temperatura ambiente costumam causar uma diminuição nas propriedades de resistência das ligas metálicas. Deve também notar-se que há, muitas vezes, uma variação significativa nos valores obtidos na medição das propriedades mecânicas. A resistência de metais sob pressão (compressão), alongamento (tração) e forças de corte os torna ideais para fins estruturais em edifícios, automóveis, quadros de aeronaves, gasodutos, pontes, cabos e alguns equipamentos desportivos.

A tensão é um tipo de carregamento no qual as duas seções de material em cada lado de um plano tendem a ser separadas ou alongadas. A compressão é o inverso da carga de tração e envolve a prensagem do material. O carregamento por flexão envolve a aplicação de uma carga de modo que cause uma curva no material, resultando na compressão de um de seus lados e no estiramento do outro. O cisalhamento envolve a aplicação de uma carga paralela a um plano, que faz com que uma das partes adjacentes de um mesmo corpo do material se deslize sobre a outra. A torção é a aplicação de uma força que causa uma “torção” no material. A Figura 3.4 apresenta as forças das cinco condições de cargas fundamentais, e a linha pontilhada indica a metade do comprimento do corpo de prova.

Figura 3.4 | Forças de carregamento fundamentais



Fonte: elaborada pelo autor.

A resistência ao desgaste é crítica em rolamentos para todos os meios de transporte e de máquinas/ferramentas, e a resistência à fadiga é a capacidade de o metal resistir à fratura após repetidas deformações, tais como flexão, permitindo o uso de metais em molas, alavancas e engrenagens.

Outras propriedades importantes dos metais são as elétricas, com destaque para a condutividade. Os metais são excelentes condutores de calor e eletricidade. Em geral, a condutividade desses materiais aumenta com a diminuição da temperatura,

de modo que no zero absoluto (-273 °C) a condutividade é infinita; isto é, os metais se tornam supercondutores. A condutividade térmica é aproveitada em radiadores de automóveis e utensílios de cozinha enquanto a condutividade elétrica possibilita que a sociedade consiga transmitir eletricidade por longas distâncias para fornecer luzes e energia elétrica às cidades mais remotas a partir de estações de geração de eletricidade. Os circuitos em aparelhos domésticos, aparelhos de televisão e computadores dependem, por exemplo, da condutividade elétrica.

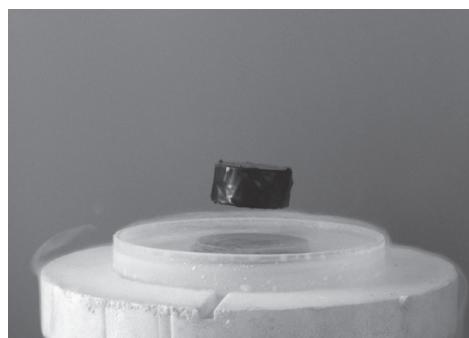


### Pesquise mais

A matéria intitulada **Supercondutor de baixa temperatura em alta** apresenta o diboreto de magnésio, que adquire uma resistência elétrica zero a uma temperatura igual a 40 kelvin. Disponível em: <[http://www2.uol.com.br/sciam/reportagens/supercondutor\\_de\\_baixa\\_temperatura\\_em\\_alta.html](http://www2.uol.com.br/sciam/reportagens/supercondutor_de_baixa_temperatura_em_alta.html)>. Acesso em: 22 abr. 2016.

Entre os metais, os condutores de eletricidade mais eficazes são aqueles que têm um único elétron de valência, que é livre para se movimentar e, assim, promove fortes reações de repulsão entre os outros elétrons. Temos também os metais semicondutores (ou metaloides) que possuem um número maior de elétrons de valência (normalmente quatro ou mais) e são ineficientes na condução de eletricidade. No entanto, quando são aquecidos ou dopados com outros elementos semicondutores, como silício e germânio, tornam-se condutores elétricos extremamente eficientes. A Figura 3.5 apresenta um ímã flutuando sobre um supercondutor de alta temperatura, resfriado com nitrogênio líquido.

Figura 3.5 | Ímã flutuando sobre um supercondutor



Fonte: <[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/55/Meissner\\_effect\\_p1390048.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/55/Meissner_effect_p1390048.jpg)>. Acesso em: 22 abr. 2016.

O fenômeno observado na Figura 3.5 ocorre devido à corrente elétrica constante que flui sobre a superfície do supercondutor, agindo na exclusão do campo magnético do ímã. A resistividade é outra propriedade elétrica muito importante dos materiais metálicos e é o oposto da condutividade; essa propriedade avalia o quanto fortemente

um metal se opõe ao fluxo de corrente elétrica. Esta corrente efetivamente constitui o eletroímã e repele o ímã que está sobre a superfície do supercondutor.

Os metais também apresentam outras propriedades, como as magnéticas. O ferromagnetismo, por exemplo, é uma propriedade encontrada no ferro e em vários outros metais. Além disso, metais e ligas podem ser magnetizados em um campo elétrico e exibem uma propriedade denominada paramagnetismo. As propriedades magnéticas são empregadas em motores, geradores e sistemas de alto-falantes elétricos para equipamentos de áudio. Os metais emitem elétrons quando expostos à radiação (por exemplo, luz) de um curto comprimento de onda ou quando aquecidos a temperaturas suficientemente elevadas.



### Exemplificando

Esses fenômenos são explorados em telas de televisão, usando óxidos de terras raras, e em uma variedade de dispositivos e instrumentos eletrônicos. Essa propriedade é conhecida como emissão.

No entanto, a capacidade de metais, como o chumbo, em absorver a radiação é denominada blindagem. Considere, por exemplo, o avental fornecido pelos dentistas durante um exame de raios X.

Os metais também apresentam propriedades ópticas: são uniformemente brilhantes e, com exceção de cobre e ouro, são prateados ou acinzentados. Isso ocorre porque todos esses elementos absorvem a luz em todas as frequências e a irradiam imediatamente. Os metais formam espelhos com sua superfície reflexiva e o seu brilho lhes dá a aparência atraente, que é tão importante em joias e moedas.

As propriedades dos materiais metálicos podem ser melhoradas ou modificadas a partir de várias maneiras, seja pelos diferentes tipos de processamento ou pela adição de impurezas de tamanhos de macro a nanoescala. Dessa forma é possível melhorar as propriedades de um metal e obter as características adequadas e necessárias para uma determinada aplicação.

### Sem medo de errar

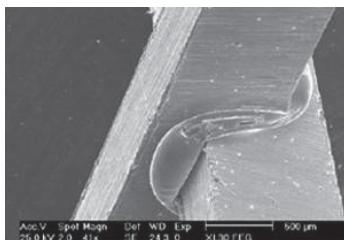
Você foi contratado para prestar algumas consultorias a uma multinacional que possui várias áreas de atuação. Ao iniciar seu trabalho, participou de uma reunião com o grupo responsável por desenvolver tubos para a extração de gás e óleo, já que os tubos atuais apresentam baixa resistência à corrosão e se degradam ao longo do tempo. Você foi questionado sobre: quais são as principais propriedades dos metais?

Qual seria uma alternativa para desenvolvermos uma liga resistente à corrosão e mais durável?

Ao longo desta seção, vimos as principais propriedades dos materiais metálicos, como as propriedades químicas, mecânicas, elétricas, térmicas, magnéticas e ópticas. Entre as propriedades químicas, destacam-se a habilidade dos metais de se combinarem com outros metais e com elementos não metálicos e de formarem ligas mais resistentes, como a combinação de diferentes concentrações de ferro, níquel e crômio que resulta em uma série de ligas de aço inoxidável. Entre as propriedades mecânicas desses materiais, podemos citar: resistência, ductilidade, dureza, resistência ao impacto e resistência à fratura. Outras propriedades importantes são as elétricas, com destaque para a condutividade. Esses elementos também apresentam propriedades magnéticas. O ferromagnetismo, por exemplo, é uma propriedade encontrada no ferro e em vários outros metais. Esses também apresentam propriedades ópticas: são uniformemente brilhantes e, com exceção de cobre e ouro, são prateados ou acinzentados. Isso ocorre porque todos os metais absorvem a luz em todas as frequências e a irradiam imediatamente.

Os estudos de ligas metálicas amorfas estão sendo desenvolvidos e caracterizados. Quando essas ligas amorfas são resfriadas rapidamente (1 milhão de graus por segundo), seus átomos não têm tempo de se rearranjarem de forma ordenada, como ocorre nos metais convencionais. Dessa forma, essas ligas, em estado sólido, ficam com estrutura amorfa e quando voltam ao estado de equilíbrio, podem formar novas estruturas com grãos de escala nanométrica. A Figura 3.6 apresenta uma microscopia eletrônica de varredura de uma classe de materiais nanoestruturados.

Figura 3.6 | Materiais nanoestruturados



Fonte: <[http://agencia.fapesp.br/pesquisadores\\_desenvolvem\\_novas\\_ligas\\_metalicas/\\_15559/](http://agencia.fapesp.br/pesquisadores_desenvolvem_novas_ligas_metalicas/_15559/)>. Acesso em: 22 abr. 2016.



### Faça você mesmo

Faça uma pesquisa sobre os diferentes tipos de materiais nanoestruturados e compare com as propriedades dos materiais clássicos.

As ligas amorfas estão sendo testadas como recobrimento de tubos para a extração de gás e óleo por apresentarem excelentes propriedades, como resistência à corrosão e ao desgaste.

## Avançando na prática

### Propriedades dos materiais metálicos

#### Descrição da situação-problema

Os veículos elétricos (EVs) são uma realidade. Utilizando somente eletricidade, são movidos por um ou mais motores elétricos alimentados por baterias recarregáveis (Figura 3.7).

Figura 3.7 | Carro elétrico



Fonte: <[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/9f/Geneva\\_MotorShow\\_2013\\_-\\_Renault\\_Zoe\\_charging.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/9f/Geneva_MotorShow_2013_-_Renault_Zoe_charging.jpg)>. Acesso em: 23 abr. 2016.

Os EVs têm várias vantagens sobre os veículos com motores de combustão interna, tais como a eficiência energética: os veículos elétricos convertem cerca de 59% a 62% da energia elétrica da rede de potência enquanto veículos a gasolina só convertem cerca de 17% a 21%. Os EVs são ambientalmente corretos, pois não emitem poluentes pelo escapamento. Os motores elétricos proporcionam uma operação silenciosa, suave e aceleração mais forte, exigindo menos manutenção do que os veículos convencionais. Outro ponto importante é a redução da dependência energética de fontes não renováveis, como o petróleo. No entanto, existem outros projetos de carros promissores e totalmente limpos, os carros movidos a hidrogênio. Nesses carros a eletricidade é fornecida para os motores por células a combustível, alimentadas por hidrogênio.

Um desafio: uma montadora está trabalhando em um projeto de um carro movido a hidrogênio e você fará parte da equipe responsável. Como o hidrogênio seria armazenado? Como os materiais metálicos poderiam auxiliar essa produção?

### Resolução da situação-problema

As ligas metálicas nanoestruturadas são utilizadas no armazenamento sólido de hidrogênio. Existem alguns estudos de protótipos de tanques de armazenamento de hidrogênio fabricados a partir de ligas de magnésio nanoestruturadas, capazes de aprisionar o gás de maneira segura para que posteriormente seja utilizado na geração de energia. Nesse caso, o hidrogênio irá reagir com a própria estrutura do material do tanque: em contato com o magnésio presente na liga metálica, o hidrogênio formará um hidreto metálico que irá se decompor quando aquecido a uma certa temperatura, liberando o gás que será queimado em uma célula a combustível para geração de energia.



#### Pesquise mais

Acesse este link e descubra outras aplicações de ligas metálicas nanoestruturadas: <[http://agencia.fapesp.br/pesquisadores\\_desenvolvem\\_novas\\_ligas\\_metalicas\\_/\\_15559/](http://agencia.fapesp.br/pesquisadores_desenvolvem_novas_ligas_metalicas_/_15559/)>. Acesso em: 23 abr. 2016.

### Faça valer a pena

- 1.** As ligas metálicas são a combinação de dois ou mais elementos químicos que exibem diferentes propriedades.

O trecho acima refere-se a qual classe de propriedade dos metais?

- a) Química
- b) Mecânica
- c) Elétrica
- d) Magnética
- e) Óptica

**2.** O aço inoxidável é um tipo de metal consumido principalmente em automóveis, na construção civil, nas indústrias de alimentos e produtos químicos.

Assinale a alternativa que apresenta os principais elementos químicos que formam o aço inoxidável:

- a) Ferro, cromo, bário.
- b) Ferro, crômio, níquel.
- c) Aço, cromo, cobalto.
- d) Alumínio, crômio, prata.
- e) Níquel, molibdênio, cobalto.

**3.** Julgue as afirmações entre verdadeiras (V) ou falsas (F):

( ) O níquel e os metais do grupo da platina ativam reações catalíticas para a síntese de muitos produtos químicos inorgânicos obtidos a partir do petróleo.

( ) A cor verde pálida observada na Estátua da Liberdade é dada pela formação de carbonato de sódio.

( ) As propriedades magnéticas de um material são aquelas que envolvem uma reação a uma carga aplicada.

Assinale a alternativa que apresenta a sequência correta:

- a) V, V, F.
- b) V, F, F.
- c) F, F, F.
- d) F, V, V.
- e) F, F, V.



## Seção 3.2

### Propriedades dos materiais cerâmicos

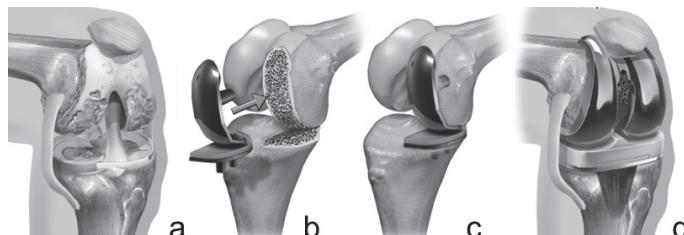
#### Diálogo aberto

Preparado para mais um dia de estudos da *Ciência dos Materiais*? Seja bem-vindo!

Como um jovem consultor, você foi contratado por uma multinacional que atua em diversos ramos de materiais. Em um primeiro momento, participou de um projeto com o grupo responsável por desenvolver tubos para a extração de gás e óleo. Os metais e ligas que eram utilizados para esse fim apresentavam baixa resistência à corrosão. Você foi capaz de indicar algumas alternativas para esse problema, como a utilização de ligas metálicas amorfas nanoestruturadas, que estão sendo testadas como recobrimento de tubos para a extração de gás e óleo justamente por apresentarem excelentes propriedades, como resistência à corrosão e ao desgaste. Porém, seu trabalho só estava começando: agora é a vez de auxiliar no projeto da empresa que estuda a utilização de materiais cerâmicos como implantes.

O departamento de materiais cerâmicos fez parceria com um hospital universitário e juntos estudam os materiais utilizados na fabricação de próteses usadas na artroplastia do quadril ou do joelho. A artroplastia é uma cirurgia indicada a pacientes com quadro crônico de artrite. Nos joelhos, por exemplo, a lesão ou o desgaste da cartilagem entre os ossos resulta no atrito ósseo, o que ocasiona dores e dificuldade de locomoção. Assim, a superfície da cabeça dos ossos é substituída por superfícies metal-polietileno (Figura 3.8). Nessas aplicações, quais outros tipos de materiais poderiam ser utilizados? As cerâmicas seriam uma opção? Quais as propriedades gerais desses materiais? E quais seriam as características específicas e desejáveis dessas cerâmicas para as aplicações?

Figura 3.8 | Artroplastia do joelho (sequência do implante metal-polietileno)



Fonte: <a) e d)><http://physioworks.com.au/images/Injuries-Conditions/knee-replacement.png>. b) e c) <<http://srmc.adam.com/graphics/images/en/21765.jpg>>>. Acesso em: 16 maio 2016.

Nesta seção, você identificará as principais propriedades dos materiais cerâmicos e compreenderá a versatilidade dessa classe de materiais, que vai desde a utilização como isolantes elétricos e térmicos em ônibus espaciais até a aplicação em implantes dentários ou próteses. Ao final desta seção, você será capaz de ajudar os pesquisadores desse departamento a compreender e identificar o material mais adequado e que atenda às especificações de utilização para próteses.

Bons estudos!

### Não pode faltar

As cerâmicas são materiais inorgânicos formados entre elementos metálicos e não metálicos, por exemplo, o óxido de alumínio, que é composto por átomos de alumínio (metal) e oxigênio (não metal), e são constituídos basicamente por óxidos, carbetos e nitretos. Normalmente, os materiais cerâmicos são quebradiços (frágeis) e utilizados como isoladores térmicos e elétricos. Nas cerâmicas, as ligações atômicas podem ser de natureza iônica, covalente ou uma mistura entre esses dois tipos. Sabendo os valores de eletronegatividade, pode-se dizer que: quanto maior for a diferença de eletronegatividade dos elementos, mais iônicas serão as ligações; em contrapartida, quanto menor for essa diferença, mais covalente serão. Por meio da Equação 3.1 é possível calcular o percentual de caráter iônico (%CI) de cada cerâmica, que dependerá da diferença de eletronegatividade ( $X_n$ ) entre os átomos (A e B), segundo a Equação de Pauling 3.1.

$$\%CI = \{1 - \exp[-0,25(X_A - X_B)^2]\} \times 100 \quad \text{Eq. 3.1.}$$



### Exemplificando

Vamos pensar no óxido de alumínio: qual deve ser o caráter iônico desse composto? Sabendo que os valores de eletronegatividade do alumínio e do oxigênio são, respectivamente, 1,61 e 3,44, podemos calcular o caráter iônico:

$$\%CI = \{1 - \exp[-0,25(X_A - X_B)^2]\} \times 100$$

$$\%CI = \{1 - \exp[-0,25(3,44 - 1,61)^2]\} \times 100$$

$$\%CI = \{1 - \exp[-0,25(1,83)^2]\} \times 100$$

$$\%CI = \{1 - \exp[-0,25(3,35)]\} \times 100$$

$$\%CI = \{1 - (\exp - 0,84)\} \times 100$$

$$\%CI = \{1 - 0,43\} \times 100$$

$$\%CI = 57$$

O óxido de alumínio é um exemplo de material cerâmico que apresenta um bom percentual das duas ligações (iônicas e covalentes), 57% iônica e 43% covalente.

Os compostos cerâmicos que possuem um elevado percentual de caráter iônico apresentam uma estrutura que depende do tamanho relativo dos íons e, consequentemente, do balanço eletrostático, enquanto os compostos cerâmicos que têm um elevado percentual de caráter covalente possuem estruturas dependentes da direcionalidade das ligações. As ligações iônicas e covalentes presentes nessa classe de materiais são mais fortes que as ligações metálicas, e devido a essa característica as cerâmicas são frágeis enquanto os metais são dúcteis (Figura 3.9).

Figura 3.9 | Cerâmicas frágeis



Fonte: <[http://s3.amazonaws.com/myareanetwork-photos/editorphotos/f/190956\\_1448851470.jpg](http://s3.amazonaws.com/myareanetwork-photos/editorphotos/f/190956_1448851470.jpg)>, <[http://www.vectorportal.com/img\\_novi/fragile12\\_7325.jpg](http://www.vectorportal.com/img_novi/fragile12_7325.jpg)> e <[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/2c/Safety\\_glass\\_vandalised\\_20050526\\_062\\_part.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/2c/Safety_glass_vandalised_20050526_062_part.jpg)>. Acesso em: 28 set. 2016.

As propriedades físicas de qualquer cerâmica são consequência direta da sua estrutura cristalina e composição química. A alumina, por exemplo, apresenta estrutura cristalina hexagonal compacta e elevada dureza, resistência à abrasão e compressão; e quando polida, possui excelente acabamento superficial. As fortes ligações iônicas tornam a alumina um material quimicamente inerte, apresentando grande estabilidade em meios fisiológicos. Quando peças de alumina para próteses são polidas e utilizadas como par, o coeficiente de atrito entre essas diminui com o tempo, aproximando-se ao de uma articulação normal. Assim, a ciência dos materiais revela uma ligação fundamental entre a microestrutura e as propriedades, tais como variações localizadas de densidade, granulometria, tipo de porosidade e a composição de segunda fase, que podem ser correlacionadas com as propriedades das cerâmicas, como a resistência mecânica, dureza, tenacidade, constante dielétrica, densidade e elevados pontos de fusão e ebulição.

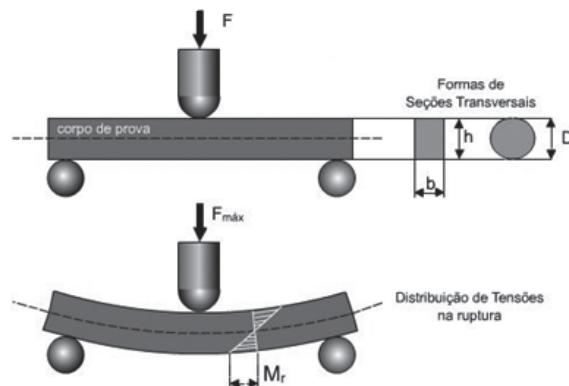


### Pesquise mais

O artigo *Biomateriais: tipos, aplicações e mercado* traz alguns exemplos de diversos materiais denominados biomateriais, que são utilizados em várias áreas da saúde. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/qn/v38n7/0100-4042-qn-38-07-0957.pdf>>. Acesso em: 16 maio 2016.

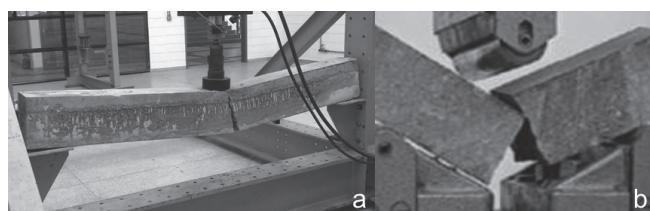
As propriedades mecânicas das cerâmicas são importantes em materiais estruturais e de construção e incluem elasticidade, resistência à tração, resistência à compressão, resistência ao corte, resistência à fratura, ductilidade (baixa em materiais quebradiços) e dureza. No entanto, diferentemente dos metais, as propriedades mecânicas das cerâmicas não são avaliadas por meio de um ensaio de tração devido à dificuldade em produzir corpos de prova que possuam a geometria exigida. A fixação adequada desses materiais pode ocasionar fraturas e, por fim, as cerâmicas falham após uma deformação de aproximadamente 0,1% (CALLISTER; RETHWISH, 2013). Assim, é mais conveniente utilizar um ensaio de flexão transversal no qual um corpo de prova de seção retangular ou circular é flexionado até sua fratura. A Figura 3.10 apresenta um esquema do ensaio de tração, enquanto a Figura 3.11 mostra uma viga de concreto (3.11a) e um corpo de prova de uma rocha ornamental (Figura 3.11b), ambos submetidos a um ensaio de flexão.

Figura 3.10 | Esquema de um ensaio de flexão



Fonte: <<http://goo.gl/MYtJ0h>>. Acesso em: 16 maio 2016.

Figura 3.11 | Materiais cerâmicos submetidos a ensaios de flexão



Fonte: a) <[https://i.ytimg.com/vi/t\\_qXl59Ber4/maxresdefault.jpg](https://i.ytimg.com/vi/t_qXl59Ber4/maxresdefault.jpg)> e b) <[http://www.fiec.org.br/sindicatos/simagran/artigos\\_palestras/Curso\\_Caracterizacao\\_TecndRochas\\_arquivos/image006.jpg](http://www.fiec.org.br/sindicatos/simagran/artigos_palestras/Curso_Caracterizacao_TecndRochas_arquivos/image006.jpg)>. Acesso em: 28 set. 2016. >. Acesso em: 16 maio 2016.

A fim de melhorar o comportamento frágil dos materiais cerâmicos, desenvolveram-se compósitos com matriz cerâmica. Esse mecanismo aumenta substancialmente a resistência à fratura desses materiais. Os freios a disco são um exemplo desses compósitos que utilizam matrizes cerâmicas e são fabricados a partir de processos específicos.

Como vimos, as cerâmicas, em sua maioria, apresentam comportamento frágil, no entanto, definitivamente não cabe a elas o sinônimo de delicadas. Esses materiais são mais resistentes a altas temperaturas e a ambientes severos. Você se recorda do ônibus espacial Discovery e seu sofisticado sistema térmico de proteção nos cones de exaustão do foguete, telhas de isolamento, componentes de motor e revestimentos cerâmicos embutidos no vidro do para-brisa? Esses são alguns exemplos da utilização de materiais cerâmicos.



### Pesquise mais

Assista ao último lançamento da Discovery. É emocionante ver em funcionamento um agregado de desenvolvimento e conhecimento de diversas áreas, unido para a construção dessa maravilha da engenharia. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=sjMraczJKJY>>. Acesso em: 17 maio 2016.

Com o aumento da temperatura, as cerâmicas iônicas (que são isolantes à temperatura ambiente) experimentam um aumento da condutividade elétrica que pode ser maior que a condutividade apresentada por semicondutores. A Tabela 3.1 traz alguns materiais cerâmicos e seus respectivos valores de condutividade à temperatura ambiente.

Tabela 3.1 | Condutividade térmica de alguns materiais cerâmicos

Materiais cerâmicos	Condutividade elétrica $[(\Omega \cdot m)^{-1}]$
Concreto (seco)	$10^{-9}$
Vidro de cal de soda	$10^{-10}$ - $10^{-11}$
Porcelana	$10^{-10}$ - $10^{-12}$
Vidro borossilicato	$\approx 10^{-13}$
Óxido de alumínio	$< 10^{-13}$
Sílica fundida	$< 10^{-18}$

Fonte: adaptada de Callister e Rethwisch (2013, p. 626).

É interessante compararmos a magnitude dos valores da condutividade elétrica dados na Tabela 3.1 com o valor da condutividade da grafita, que é igual a  $3 \times 10^4$ - $2 \times 10^5$  e é considerada um bom condutor elétrico; observe que os expoentes dos materiais dados na tabela são negativos. Algumas cerâmicas são semicondutores e a maior parte é formada por óxidos de metais de transição que são semicondutores, como o óxido de zinco. As cerâmicas semicondutoras são aplicadas em subestações de distribuição de energia elétrica e protegem a infraestrutura de relâmpagos, pois apresentam resposta rápida ao dissipar uma grande quantidade de energia, são de baixa manutenção e não se degradam. A

Figura 3.12 mostra algumas cerâmicas utilizadas na proteção de subestações de energia elétrica e em linhas de transmissão.

Figura 3.12 | Cerâmicas utilizadas na proteção de subestações de energia elétrica e linhas de transmissão



Fonte: elaborada pelo autor.

As cerâmicas semicondutoras também são empregadas como sensores de gás, em que a passagem de gases altera a resistência elétrica da cerâmica policristalina.

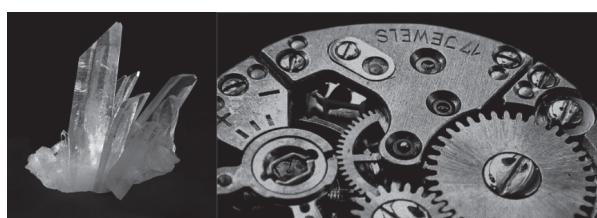


### Assimile

A resistividade elétrica é definida como a medida da oposição que um material apresenta em relação ao fluxo de corrente elétrica. Essa propriedade pode ser compreendida como o oposto da condutividade elétrica.

A piezoelectricidade, que pode ser definida como a habilidade de alguns cristais produzirem tensão elétrica a partir de uma pressão mecânica, é outra propriedade exibida por um grande número de materiais cerâmicos, incluindo o quartzo utilizado em relógios para medir o tempo e em outros equipamentos. Esses dispositivos empregam as propriedades da piezoelectricidade utilizando a energia elétrica para criar um movimento mecânico (alimentando o dispositivo) e depois, a partir desse movimento, produzem eletricidade (gerando um sinal). A Figura 3.13 apresenta um cristal de quartzo. Este cristal, cortado em um formato de garfo, é alimentado por uma carga elétrica e, assim, emite uma certa quantidade de pulsos elétricos por segundo, que são transmitidos a um circuito eletrônico. Em um relógio analógico, esse circuito divide a vibração a somente um impulso por segundo, regulando um pequeno motor que movimenta as engrenagens dos ponteiros do relógio.

Figura 3.13 | Cristal de quartzo e engrenagens de um relógio analógico



Fonte: elaborada pelo autor.

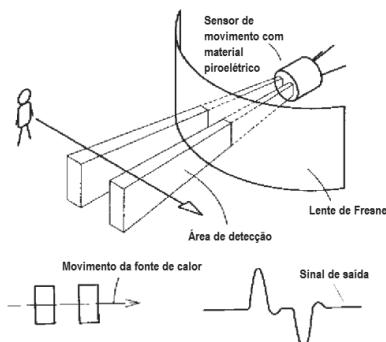


### Reflita

Em um relógio analógico, sabemos que em função da piezoelectricidade do cristal de quartzo temos o movimento das engrenagens dos ponteiros, mas e nos relógios digitais, também são utilizados cristais de quartzo? Qual a diferença?

A piezoelectricidade é geralmente mais forte em materiais cerâmicos que também exibem piroelectricidade, e todos os materiais piroelétricos são, do mesmo modo, piezoelétricos. A piroelectricidade é a habilidade de alguns materiais produzirem temporariamente um potencial elétrico quando aquecidos ou resfriados. Esses materiais podem ser utilizados para converter energia térmica em mecânica ou elétrica. Um cristal piroelétrico, após síntese em um forno, deixado para resfriar sem nenhuma tensão aplicada, geralmente acumula uma carga estática de milhares de volts. Esses materiais são utilizados em sensores de movimento, em que um pequeno aumento da temperatura, a partir de um corpo quente ao entrar em uma sala, é suficiente para produzir uma tensão mensurável no cristal (Figura 3.14).

Figura 3.14 | Sensor de movimento com cerâmica piroelétrica



Fonte: <<http://goo.gl/UY97ph>>. Acesso em: 16 maio 2016.

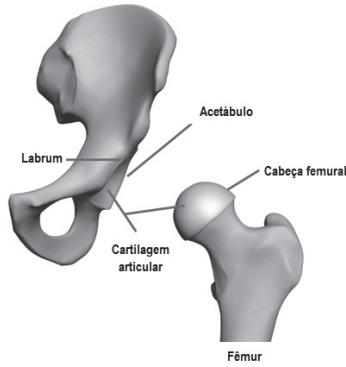
Por sua vez, a piroelectricidade é vista mais fortemente em materiais que também apresentam o efeito da ferroelectricidade, em que um dipolo elétrico estável pode ser orientado ou revertido através da aplicação de um campo eletrostático. A piroelectricidade é uma consequência necessária da ferroelectricidade, que é utilizada para armazenar informações em capacitores ferroelétricos e elementos ferroelétricos de memória RAM (*random-access memory*). Outra característica importante é que as cerâmicas não possuem elétrons livres, que são responsáveis por absorver fôtons de luz, assim, esses materiais podem ser transparentes à luz visível e apresentam os fenômenos de reflexão, refração, transmissão e absorção. Na formação de cerâmicas policristalinas, o tamanho dos grãos é determinado pelo tamanho das partículas cristalinas presentes na matéria-prima, durante a formação (ou compressão) do objeto. Dessa forma, uma redução do tamanho da partícula original pode eliminar qualquer dispersão de luz, resultando em um material transparente.

## Sem medo de errar

O departamento de materiais cerâmicos da empresa pela qual você foi contratado como consultor fez parceria com um hospital universitário e, juntos, estudam materiais usados na fabricação de próteses utilizadas na artroplastia do quadril ou do joelho. Nessas aplicações, quais outros tipos de materiais poderiam ser utilizados? As cerâmicas seriam uma opção? Quais as propriedades gerais desses materiais? E quais seriam as características específicas e desejáveis das cerâmicas para essas aplicações?

Ao longo desta seção vimos que os materiais cerâmicos apresentam diferentes propriedades, como resistência mecânica, dureza, tenacidade e elevados pontos de fusão e ebulição. Especificamente em nosso desafio, o material cerâmico alumina é utilizado na fabricação de acetábulos e cabeças femoriais usados na artroplastia do quadril e do joelho. A alumina apresenta estrutura cristalina hexagonal compacta, o que lhe confere elevada dureza, resistência à abrasão e compressão. As peças polidas têm excelente acabamento superficial e as fortes ligações iônicas tornam a alumina um material quimicamente inerte, apresentando grande estabilidade em meios fisiológicos. Quando as peças de alumina para próteses são polidas e utilizadas como par, o coeficiente de atrito entre elas diminui com o tempo, aproximando-se ao de uma articulação normal. A Figura 3.15 apresenta um esquema da artroplastia do quadril evidenciando as partes em que é utilizada a alumina.

Figura 3.15 | Esquema da artroplastia do quadril evidenciando as partes de alumina



Fonte: <<http://goo.gl/FOTdYN>>. Acesso em: 16 maio 2016.

O desgaste das superfícies alumina-alumina é aproximadamente 10 vezes menor que o das superfícies metal-polietileno. Outras aplicações clínicas da alumina incluem próteses de joelho, parafusos para ossos e implantes dentários (PIRES; BIERHALZ; MORAES, 2015).



### Faça você mesmo

A alumina é utilizada somente em próteses? Procure outras aplicações desse material cerâmico.

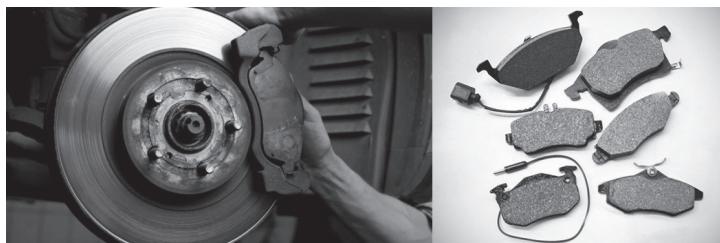
## Avançando na prática

### Propriedades do materiais cerâmicos

#### Descrição da situação-problema

A empresa automobilística Nintai trabalha atualmente em um projeto com diversos materiais aplicados ao sistema de frenagem. Os primeiros carros utilizavam pastilhas de freios formadas por placas metálicas de fricção à base de resina e partículas metálicas que envolvem o disco de freio (Figura 3.16). Ao acionar o pedal de freio, um circuito hidráulico aciona as pastilhas, que comprimem o disco resultando na frenagem do automóvel. As pastilhas de freios são fabricadas a partir do processo de sinterização de uma mistura de pós-metálicos, tipicamente bronze, alumínio, ferro e cobre. No entanto, constatou-se que elas não apresentavam frenagem eficiente quando frias e eram agressivas ao disco de freios.

Figura 3.16 | Pastilhas de freios com material metálico



Fonte: elaborada pelo autor.

Nesta aplicação poderia ser empregado algum tipo de cerâmica?

#### Resolução da situação-problema

Os materiais cerâmicos já são utilizados em pastilhas e discos de freios em aviões-caça de combate e em porta-aviões. Esses materiais possibilitam frear as aeronaves

em um trecho de 100 metros à uma velocidade de 240 km/h. Não muito distante, a indústria automobilística de automóveis de luxo, como a Porsche e a Mercedes, já equipa alguns modelos com materiais cerâmicos no sistema de freios. Nos carros populares são utilizados discos de ferro fundido que, quando muito exigidos, atingem uma temperatura de até 500 °C. Os materiais cerâmicos aumentam em até 25% a eficiência em relação ao sistema de ferro fundido e, por terem um coeficiente de atrito maior que esse material, requerem uma distância muito menor para o automóvel parar. Os discos de cerâmica são capazes de atingir até 1400 °C e mantêm sua eficiência mesmo com chuva, já que esses materiais não absorvem água. O sistema com material cerâmico é aproximadamente 20 quilos mais leve do que o sistema de ferro fundido e apresenta uma durabilidade aproximada de 300.000 quilômetros para os discos e 60.000 quilômetros para as pastilhas.



### Pesquise mais

Veja o catálogo 2015-2016, intitulado Pastilhas de freio cerâmicas Bosch – Maior comodidade com a tecnologia antirruído, que apresenta as diversas características e vantagens de um sistema com material cerâmico. Disponível em: <<http://goo.gl/UDwfS7>>. Acesso em: 16 maio 2016.

### Faça valer a pena

- 1.** “As cerâmicas são materiais \_\_\_\_\_ formados entre elementos \_\_\_\_\_ e \_\_\_\_\_, por exemplo, o \_\_\_\_\_ de alumínio, que é composto por átomos de alumínio (metal) e \_\_\_\_\_.”

Assinale a alternativa que preenche as lacunas corretamente:

- a) inorgânicos; metálicos; não metálicos; óxido; oxigênio.
- b) inorgânicos; de transição; halogênios; cloreto; cloro.
- c) inorgânicos; iônicos; não metálicos; dióxido; oxigênio.
- d) orgânicos; metálicos; calcogênios; cloreto; oxigênio.
- e) orgânicos; metálicos; não metálicos; óxido; oxigênio.

- 2.** Os materiais cerâmicos são normalmente frágeis e amplamente utilizados como isoladores térmicos e elétricos.

- I. A dureza e fragilidade desses materiais está diretamente relacionada às ligações iônicas e covalentes.

## PORQUE

II. As ligações nesses materiais são mais fortes do que as ligações metálicas, o que explica a propriedade frágil das cerâmicas e o comportamento dúctil dos metais.

A respeito das asserções, assinale a alternativa que apresenta a resposta correta:

- a) As asserções I e II são proposições falsas.
- b) As asserções I e II são proposições verdadeiras, e a II é uma justificativa da I.
- c) As asserções I e II são proposições verdadeiras, mas a II não é uma justificativa da I.
- d) A asserção I é uma proposição verdadeira, e a II é uma proposição falsa.
- e) A asserção I é uma proposição falsa, e a II é uma proposição verdadeira.

### 3. Julgue as afirmações entre verdadeiras (V) ou falsas (F):

( ) Os compostos cerâmicos que apresentam um elevado percentual de caráter iônico possuem uma estrutura que depende da direcionalidade das ligações.

( ) Os compostos cerâmicos que apresentam um elevado percentual de caráter covalente possuem estruturas que dependem do tamanho relativo dos íons.

( ) A alumina é um material cerâmico que apresenta estrutura cristalina hexagonal compacta e elevada dureza, boa resistência à abrasão e compressão.

Assinale a alternativa que apresenta a sequência correta:

- a) V, V, F.
- b) V, F, F.
- c) F, F, F.
- d) F, V, V.
- e) F, F, V.



# Seção 3.3

## Propriedades dos materiais poliméricos

### Diálogo aberto

Seja bem-vindo a mais uma seção de ciência dos materiais. Na seção passada, você aprendeu um pouco mais sobre as propriedades dos materiais cerâmicos. Compreendeu que as fortes ligações iônicas e covalentes desses materiais fazem com que sejam frágeis, isto é, praticamente não apresentem deformação plástica, pois logo fraturam. Você percebeu que a estrutura cristalina e as ligações iônicas da alumina são responsáveis por esse material possuir elevada dureza, resistência à abrasão, resistência à compressão e grande estabilidade em meios fisiológicos. Os materiais cerâmicos apresentam diversas propriedades e são empregados desde a confecção de utensílios domésticos até a utilização em ônibus espaciais. Assim, você foi capaz de identificar as propriedades das cerâmicas que são utilizadas em próteses de joelhos e quadris e ajudar os pesquisadores dessa área.

Hoje chegamos ao departamento de materiais poliméricos, ou melhor, ao departamento que desenvolve plásticos ou borrachas (elastômeros). Atualmente, estão sendo estudados diversos materiais poliméricos que são utilizados em vedação de diferentes dispositivos, como válvulas de vasos sanitários, torneiras, bombas de reservatórios, entre outros.

Figura 3.17 | Dispositivos poliméricos de vedação



Fonte: <<http://goo.gl/SqIO42>>. Acesso em: 17 maio 2016.

Quem nunca precisou recorrer a um encanador para trocar a borrachinha de vedação de uma torneira ou de uma válvula de vaso sanitário? Pois bem, você, como

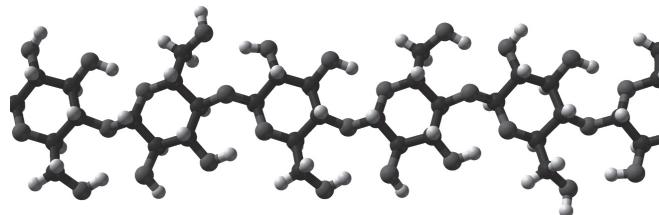
consultor da empresa, deverá auxiliar o pessoal desse departamento a desenvolver componentes de vedação que apresentem uma vida útil maior que os atuais. Quais são as principais propriedades dos materiais poliméricos? Seria possível utilizar um polímero que seria definitivo para essa aplicação? Ao longo desta seção você conhecerá as principais propriedades dos polímeros e, ao final, será capaz de identificar um material adequado e que atenda às especificidades de um componente de vedação.

Bons estudos!

### Não pode faltar

Os materiais poliméricos podem ser definidos como materiais que possuem várias partes quimicamente ligadas. A própria palavra polímero significa "muitas partes". No entanto, cientificamente polímeros são compostos orgânicos de elevada massa molecular formados por unidades que se repetem, denominadas meros, formando cadeias de longa extensão (CANEVAROLO, 2006). Os materiais poliméricos são de ocorrência natural, como as proteínas, celulose (Figura 3.18), a borracha, ou sintéticas, como o polietileno.

Figura 3.18 | Cadeia polimérica (celulose)



Fonte: <<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/f9/Cellulose-1beta-from-xtal-2002-3D-balls.png>>. Acesso em: 17 maio 2016.

Os polímeros são classificados, de acordo com suas propriedades mecânicas, estruturas e ligações interatômicas, em: termorrígidos (Figura 3.19a), termoplásticos (Figura 3.19b) e elastômeros (Figura 3.19c).

Figura 3.19 | Materiais poliméricos



Fonte: elaborada pelo autor.



### Pesquise mais

Assista à definição do que são polímeros de uma forma mais descontraída. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=ENKnCkSc6TM>>. Acesso em: 22 abr. 2016.

A maioria dos polímeros produzidos é de materiais termoplásticos, o que significa dizer que uma vez que o polímero é formado, ele pode ser fundido e reutilizado; isto é, pode ser reciclado e novamente processado com facilidade. Polietileno tereftalato (PET), polipropileno (PP), poliestireno (PS) e policloreto de vinila (PVC) são alguns exemplos de materiais termoplásticos. Já os termorrígidos não podem ser novamente fundidos.



### Reflita

Os cabos de panela, garfos e facas são normalmente fabricados com um polímero termorrígido, a baquelite. Quem nunca esqueceu um cabo de panela próximo a chama do fogão ou o cabo de uma colher encostado no aço da panela? Quando isso ocorre, o que observamos?

Cada polímero apresenta propriedades bem distintas, mas a maioria deles pode ser muito resistente aos produtos químicos. Grande parte dos produtos de limpeza em sua casa são embalados em embalagens plásticas. Lendo os rótulos de advertência que descrevem o que acontece quando um desses produtos entra em contato com a pele ou olhos, ou é ingerido, é possível compreender a resistência química desses plásticos. Enquanto alguns solventes dissolvem facilmente certos tipos de plásticos, outros são seguros e resistentes a solventes agressivos.

Figura 3.20 | Embalagens plásticas de produtos de limpeza



Fonte: <<http://www.limpezaconsciente.org.br/uploads/tratada1.jpg>>. Acesso em: 17 maio 2016.

Os polímeros também podem ser isolantes térmicos e elétricos. Um passeio por sua própria casa irá reforçar essas propriedades dos materiais: os aparelhos elétricos, cabos, tomadas elétricas e fiação são feitos ou revestidos com materiais poliméricos. Ainda dentro do ambiente doméstico, você pode observar a resistência térmica dos polímeros na cozinha, nos cabos de panela, alças de cafeteiras elétricas, copos com isolamento térmico e o núcleo de espuma utilizado em refrigeradores e congelandores (Figura 3.21).

Figura 3.21 | Materiais poliméricos utilizados como isolantes térmicos e com boa resistência térmica



\*Da esquerda para a direita: cabo de panela, núcleo de espumas em refrigerador, cafeteira elétrica, cabos e tomadas.  
Fonte: elaborada pelo autor.

Os materiais poliméricos normalmente apresentam baixa densidade e boa resistência mecânica, sendo utilizados tanto para a fabricação de brinquedos quanto em estações espaciais, das fibras de nylon em meias-calças ao Kevlar que é utilizado em coletes à prova de balas. Os materiais poliméricos também apresentam um comportamento tensão-deformação semelhante ao dos metais, no entanto, nos polímeros as propriedades mecânicas dependem da taxa de deformação, temperatura e das condições ambientais. Os polímeros podem ser frágeis, altamente elásticos e plásticos. As magnitudes da tensão de ruptura dos polímeros são menores que as observadas nos metais, mas o alongamento desses materiais pode ser na ordem de 1000% maior que os materiais metálicos. A fratura se inicia com rachaduras por falha, riscos e envolve a quebra de ligações nas cadeias. As propriedades mecânicas dos polímeros são alteradas drasticamente com a temperatura, indo de um comportamento frágil, igual a um vidro à baixa temperatura, a um comportamento semelhante ao da borracha em elevadas temperaturas. Dessa forma, conclui-se que o aumento da temperatura torna o polímero mais macio e dúctil.



### Assimile

As propriedades dos materiais poliméricos são resultantes das estruturas finais dos polímeros: quando a macromolécula possui um encadeamento linear de átomos, dá-se origem a materiais termoplásticos; quando a macromolécula é tridimensional, os polímeros são termorrígidos.

A Tabela 3.2 apresenta os valores de tensão de ruptura, módulo de elasticidade e a estrutura para alguns termoplásticos.

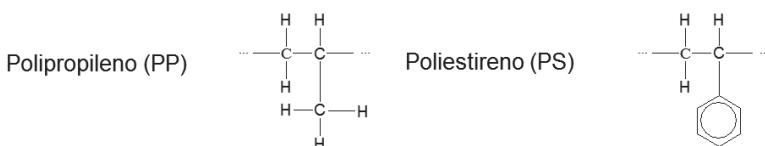
Tabela 3.2 | Valores de propriedades de alguns polímeros termoplásticos

Polímero	Tensão de ruptura (Mpa)	Módulo de elasticidade (Mpa)	Estrutura
Polietileno de baixa densidade	21	276	Estrutura amorfa, altamente ramificada com monômeros simétricos
Polietileno de alta densidade	38	1241	Estrutura amorfa, com monômeros simétricos e pouca ramificação
Polipropileno	41	1517	Estrutura amorfa com pequenos grupos laterais de metila
Poliestireno	55	3103	Estrutura amorfa com pequenos grupos laterais de benzeno
Poli(cloreto) de vinila	62	4137	Estrutura amorfa com grandes átomos de cloro como grupos laterais

Fonte: adaptada de Askeland e Wright (2014, p. 518).

Analisando os dados da tabela é possível observar que a ramificação nas cadeias poliméricas reduz a densidade e a compactação dessas cadeias, consequentemente a resistência mecânica diminui, como verificamos no polietileno. Assim como a adição de impurezas nos metais aumenta sua resistência mecânica, a adição de grupos de átomos diferentes de hidrogênio aumenta a resistência mecânica dos polímeros. A adição do grupo metila e o anel benzénico proporcionam maior resistência e dureza ao polipropileno e poliestireno, respectivamente. A Figura 3.22 apresenta respectivamente as unidades de repetição do polipropileno e do poliestireno obtidos por adição.

Figura 3.22 | Unidades de repetição do PP e PS



Fonte: elaborada pelo autor.

As propriedades mecânicas dos polímeros termoplásticos como fluência, tração, tenacidade são afetadas pelo grau de polimerização. O grau de polimerização pode ser obtido a partir da Equação 3.2:

$$\text{Grau de polimerização} = \frac{\text{massa molecular média do polímero}}{\text{massa molecular da unidade repetitiva}} \quad \text{Eq. 3.2}$$

À medida que ocorre o aumento da massa molecular média do polímero, a temperatura de fusão desse polímero aumenta. Segundo Askeland e Wright (2014, p. 508), "a polimerização ou síntese é o conjunto de reações químicas que provoca a união dos monômeros ou oligômeros para criar as macromoléculas, que se inicia

com a produção de grandes cadeias nas quais os átomos estão fortemente unidos por ligações covalentes". A polimerização pode ocorrer por adição, em que as unidades monoméricas são ligadas uma de cada vez, ou por condensação, através de reações químicas que ocorrem por etapas e produzem estruturas com propriedades semelhantes às dos polímeros de adição.

Outra característica importante dos termoplásticos é a cristalinidade que afeta diretamente as propriedades mecânicas e ópticas desses materiais. Um aumento na cristalinidade aumenta a resistência mecânica e química de um polímero, mesmo quando submetido a elevadas temperaturas. O módulo de elasticidade é outra propriedade afetada pela cristalinidade, pois os cristais resistem à deformação, resultando em elevados módulos de elasticidade. A fluênci, que é definida como uma deformação permanente que depende do tempo, com uma tensão aplicada, e o tempo de relaxação, que é uma redução, também são propriedades que dependem da cristalinidade do material polimérico. Tanto a fluênci como o tempo de relaxação são consequências do comportamento **viscoelástico** do polímero.

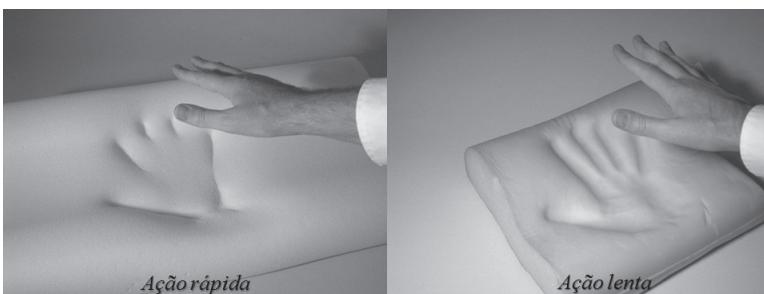


### Exemplificando

Um material viscoelástico é aquele que, ao deformar-se, apresenta simultaneamente deformações viscousas e elásticas.

As propriedades viscoelásticas dos polímeros podem ser modificadas utilizando catalisadores ou polióis e podem formar a chamada *memory foam*, também conhecida como espuma de memória. As espumas de memória apresentam células abertas e podem ser de ação rápida ou lenta. Esse tipo de espuma é muito mais macio à temperatura da pele humana quando comparado a temperatura ambiente. Um exemplo de polímeros viscoelásticos são as popularmente conhecidas espumas da NASA (National Aeronautics and Space Administration), um tecido desenvolvido pela NASA em 1966. Na Figura 3.23 é possível observarmos, respectivamente, espumas de poliuretano com efeitos de ação rápida e lenta, conhecidos como *memory foam*.

Figura adaptada 3.23 | Espumas de poliuretano com *memory foam*



Fonte: <<https://pt.wikipedia.org/wiki/Poliuretano>>. Acesso em: 17 maio 2016.

Os polímeros, aparentemente, também são ilimitados quanto às cores e propriedades, que podem ser reforçadas por muitos aditivos, ampliando suas aplicações. Os polímeros podem ser feitos para imitar algodão, seda, lã e fibras; porcelana e mármore; alumínio e zinco. A Figura 3.24 apresenta fibras de PET que são utilizadas na fabricação de roupas.

Figura 3.24 | Fibras de polietileno tereftalato (PET)



Fonte: <[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/57/Dacron\\_Reels.jpeg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/57/Dacron_Reels.jpeg)>. Acesso em: 17 maio 2016.

Atualmente fala-se muito em polímeros autorregeneradores, no entanto, desde a década de 1990 esses materiais são estudados. Esses polímeros são compostos por agentes regeneradores encapsulados e catalisadores que são distribuídos ao longo da matriz polimérica. Quando sujeitos a cortes ou aplicações que danificam sua estrutura inicial, após um determinado tempo se autorregeneram. Existem diversos estudos utilizando polímeros que se autorregeneram como revestimentos de peças metálicas, componentes automotivos, adesivos, equipamentos náuticos e aeroespaciais e componentes estruturais. O emprego desses materiais pode minimizar ou até mesmo eliminar processos de reparação ou de manutenção em sistemas hidráulicos e de vedação.



### Pesquise mais

É difícil acreditarmos que um material se autorregenera. No vídeo a seguir uma amostra cilíndrica do elastômero de poliuretano é cortada em duas partes. Posteriormente, as faces cortadas são colocadas em contato e após duas horas... ficou curioso? Assista ao vídeo e veja o que acontece. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=aQmat9a6jXI>>. Acesso em: 17 maio 2016.

## Sem medo de errar

Hoje chegamos ao departamento de materiais poliméricos e você, como um jovem consultor na área de materiais, ajudará os pesquisadores a desenvolverem um polímero para ser usado na vedação de diferentes dispositivos, como válvulas de vasos sanitários, torneiras e bombas de reservatórios, e que apresente uma vida útil maior que os atualmente aplicados. Quais são as principais propriedades dos materiais poliméricos? Seria possível utilizar um polímero definitivo para essa aplicação? Ao longo desta seção, você aprendeu que os materiais poliméricos podem apresentar as mais diferentes propriedades. Compreendeu que os polímeros podem ser classificados em termoplásticos, termorrígidos e elastômeros. Os termoplásticos são polímeros que podem ser fundidos por diversas vezes, já os termorrígidos não apresentam essa mesma habilidade, pois uma vez fundidos, ao serem aquecidos, sofrem degradação; e por fim, os elastômeros (borrachas). Os polímeros podem apresentar elevada resistência química e mecânica, ser bons isolantes térmicos e elétricos, apresentar baixa densidade quando comparados aos materiais metálicos. No entanto, os materiais poliméricos utilizados como anéis de vedação sofrem com o desgaste durante a utilização, ocasionando vazamentos. Assim, após conhecer os polímeros que se autorregeneram, você foi capaz de propor sua utilização para esses fins. O anel de vedação fabricado com polímeros autorregeneradores pode ser uma alternativa viável, pois, ao sofrer desgastes, esses polímeros liberam agentes regeneradores que, com o auxílio de substâncias catalisadoras, regeneram ou "colam" a superfície afetada. O componente regenerado apresenta as mesmas propriedades e resistência verificada que o componente antes da ruptura. A Figura 3.25 apresenta a sequência do material polimérico sendo cortado, com separação parcial, e regenerado.

Figura 3.25 | Componente fabricado com polímero autorregenerador



Fonte: elaborada pelo autor.

Os polímeros são utilizados nas mais diversas aplicações, basta olharmos ao nosso redor para encontrarmos copos, pratos, vasilhas e as famosas tupperwares, todos produzidos com termoplásticos; os antigos discos de vinil, cabos de panela, talheres e interruptores são fabricados com os polímeros termorrígidos, e moldes para concreto, peças de bomba de concreto, pneus, revestimento de lata, rodas de patins, de skate, solados dos calçados, os nossos confortáveis chinelos feitos com elastômeros. Os materiais poliméricos estão por todas as partes e não é à toa que se costuma dizer que desde o início do século XX estamos vivendo a Era dos Plásticos.



## Faça você mesmo

Pesquise sobre outras aplicações dos polímeros regeneradores e sobre as reações de polimerização.

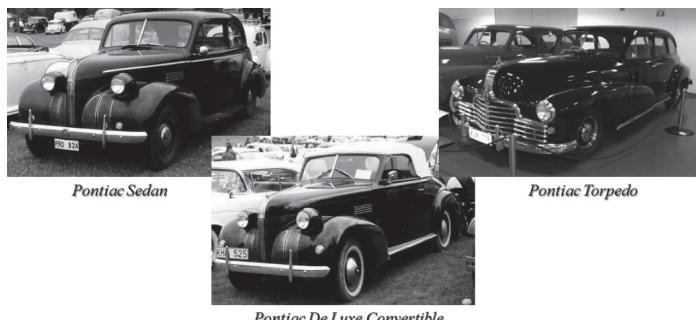
## Avançando na prática

### Propriedades dos materiais poliméricos

#### Descrição da situação-problema

Na Feira Mundial em Nova Iorque (1939 a 1949), a Pontiac apresentava seus luxuosos automóveis, como o Pontiac Sedan (1939), o Pontiac Deluxe Convertible (1939) e o Pontiac Torpedo (1946) ilustrados na Figura 3.26.

Figura 3.26 | Pontiacs (1939-46)



Fonte: elaborada pelo autor.

No entanto, a maior surpresa apresentada pela empresa naquele período foi o Pontiac Plexiglas Deluxe Six, que logo ficou conhecido como Ghost Car. Em parceria com a companhia química Rohm & Haas, a empresa apresentou uma versão do Pontiac com a carroceria toda produzida com um polímero desenvolvido pela companhia química, denominado Plexiglas (Figura 3.27).

Figura 3.27 | Pontiac Plexiglas Deluxe Six "Ghost Car"



Fonte: elaborada pelo autor.

Quais as propriedades mais importantes do polímero Plexiglas, que permitiram que o Ghost Car fosse um sucesso na época?

### Resolução da situação-problema

O Plexiglas, também conhecido como vidro plástico, difere principalmente dos vidros em relação à densidade, sendo quase três vezes mais leve, é resistente à umidade e apresenta resistência ao impacto cinco vezes maior que o vidro fabricado com sílica comum. É um exemplo de polímero vítreo que apresenta uma estrutura homogênea amorfa, o que lhe confere a transparência, assim como os vidros. Esse polímero reflete apenas 8% da luz incidente e se fosse parcialmente cristalizado, não seria transparente.

### Faça valer a pena

**1.** Uma vez que os polímeros são formados, se forem submetidos ao reaquecimento, esses materiais não serão fundidos e irão se degradar.

O trecho acima refere-se a qual tipo de polímero?

- a) Termoplástico
- b) Elastômero
- c) Termorrígido
- d) Plásticos
- e) Borracha

**2.** “Os materiais poliméricos podem ser definidos \_\_\_\_\_ como compostos orgânicos de \_\_\_\_\_ massa molecular formados por unidades que se repetem, denominadas \_\_\_\_\_, formando cadeias de \_\_\_\_\_ extensão.”

Assinale a alternativa que preenche corretamente as lacunas:

- a) popularmente; elevada; monômeros; longa.
- b) cientificamente; elevada; meros; longa.
- c) cientificamente; baixa; meros; pequena.
- d) popularmente; elevada; isômeros; pequena.
- e) cientificamente; baixa; isômeros; longa.

**3.** A maioria dos polímeros produzidos é de materiais termoplásticos, o que significa dizer que uma vez que o polímero é formado, ele pode ser fundido e reutilizado, isto é, o polímero pode ser reciclado e novamente processado.

Assinale a alternativa que apresenta somente polímeros termoplásticos:

- a) Baquelite, PVC, PET.
- b) PET, poliéster, poliuretano.
- c) PP, PVC, PET.
- d) PP, resinas epóxi, PVC.
- e) PS, PP, baquelite.



# Seção 3.4

## Propriedades dos materiais compósitos

### Diálogo aberto

Seja bem-vindo à última seção desta unidade, que aborda uma introdução às principais propriedades de metais, cerâmicas, polímeros e compósitos. Na primeira unidade, você conheceu as propriedades químicas, mecânicas, elétricas, térmicas, magnéticas e ópticas dos materiais metálicos e compreendeu a relação entre as estruturas e ligações interatômicas com as propriedades apresentadas. Na segunda seção, vimos que os materiais cerâmicos possuem boa resistência mecânica, elevada dureza e altos pontos de fusão e ebulição, e devido a essas propriedades são utilizados, por exemplo, em ambientes corrosivos. Posteriormente você compreendeu que os polímeros são classificados, de acordo com suas propriedades, em termoplásticos, termorrígidos e elastômeros. Os termoplásticos podem ser fundidos várias vezes, isto é, reciclados. Já os termorrígidos, uma vez fundidos, se forem submetidos à temperatura de fusão novamente, se degradam. E os elastômeros, como o próprio nome já diz, apresentam propriedades elásticas. Agora é hora do seu último desafio nesta unidade, vamos lá?

No seu último dia dentro de uma multinacional que trabalha com diversos ramos de materiais, você, como consultor, recebeu dois tipos de materiais compósitos, um termorrígido e um termoplástico. Ambos os materiais serão avaliados para utilização em componentes primários e secundários de aeronaves comerciais, como no Airbus A318 (Figura 3.28) como ailerons, compensadores, painéis de平衡amento etc. Mas o que são compósitos? Esses materiais sempre apresentam as mesmas propriedades? Qual a diferença entre compósito termorrígido e termoplástico?

Figura 3.28 | Representação de um Airbus A318

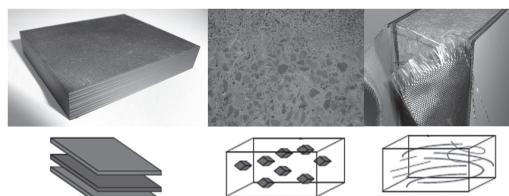


Fonte: elaborada pelo autor.

## Não pode faltar

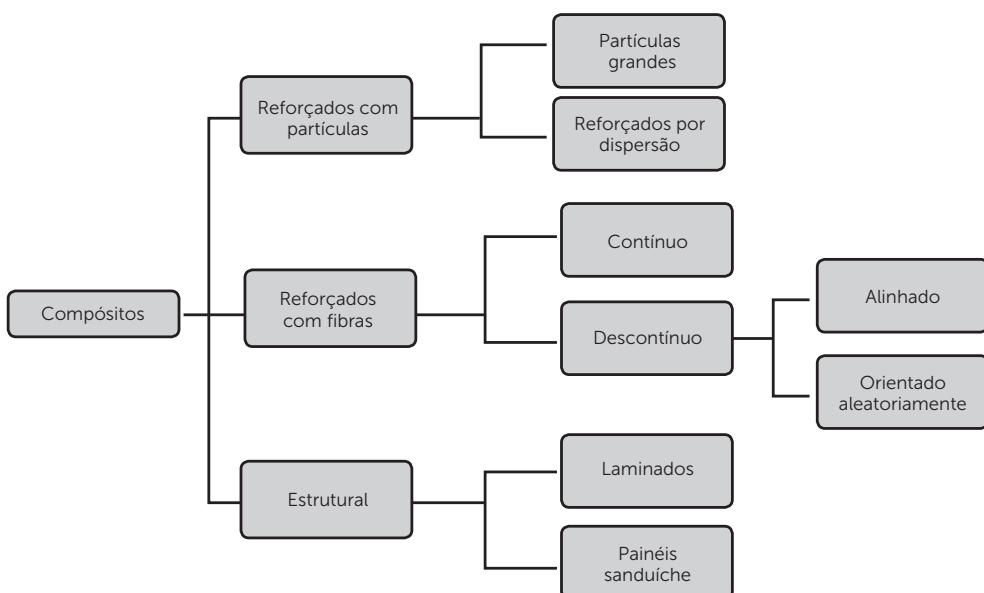
Um compósito geralmente é definido como a combinação de dois ou mais materiais distintos, cada um com suas propriedades específicas que, juntas, criam um novo material com combinações de propriedades não observadas em um elemento isolado. O objetivo de desenvolvemos um material compósito é obter um novo material, combinando as melhores características dos elementos que os compõem. Esses materiais são possíveis por meio da combinação entre metais, cerâmicas e polímeros. Em sua grande maioria, consistem de uma fase de reforço composta por partículas, fibras ou folhas dispersas em uma matriz (fase contínua). A Figura 3.29 apresenta, respectivamente, compósitos com fase de reforço de folhas, partículas e fibras, enquanto a Figura 3.30 apresenta um fluxograma da classificação dos materiais compósitos.

Figura 3.29 | Compósitos e fases de reforço



Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 3.30 | Classificação dos materiais compósitos



Fonte: elaborada pelo autor.

Os compósitos reforçados com partículas são divididos em dois tipos, de acordo com o tamanho das partículas:

As **partículas grandes** atuam na restrição do movimento da matriz, no entanto, não impedem de modo eficaz o deslizamento de discordâncias (ASKELAND; WRIGHT, 2014). Já os compósitos **reforçados por dispersão** contêm partículas na escala de 10 a 250 nanômetros (nm) de diâmetro. Nesse compósito, a matriz suporta a maior parte da carga aplicada enquanto as partículas impedem o movimento das discordâncias, limitando a deformação plástica. O concreto é um exemplo de compósito reforçado por partículas grandes, feito de uma matriz de cimento que une partículas de diferentes tamanhos, como areia e brita (Figura 3.31).

Figura 3.31 | Cimento, areia e brita



Fonte: elaborada pelo autor.

As propriedades do cimento dissolvido em água, com os materiais particulados, dependem do quanto bem os materiais foram misturados, do tamanho dos materiais particulados e da quantidade de água. Água demais resulta em uma porosidade excessiva do concreto solidificado, em contrapartida, com água insuficiente o concreto tende a ficar com a superfície porosa e a compactação comprometida. O uso de diferentes tamanhos de pedra e areia permite um melhor fator de empacotamento do que quando são usadas partículas de tamanho semelhante, agora ficou fácil compreender por que temos as popularmente chamadas areia fina, média e grossa: são areias com diferentes granulometrias. Para os compósitos reforçados por dispersão, o exemplo clássico seria o compósito à base de pó de alumínio sinterizado, no qual a matriz de alumínio é endurecida com até 14% de óxido de alumínio. Esse compósito é utilizado em reatores nucleares.



### Refletá

Quais devem ser as propriedades dos materiais compósitos para serem utilizados em reatores nucleares? Mas, afinal, o que é uma reação nuclear?

As propriedades físicas dos materiais compósitos em geral não são isotrópicas (independentes da direção da força aplicada) na natureza, mas são tipicamente anisotrópicas (diferentes, dependendo do sentido da força aplicada ou carga), isto é, o compósito é mais resistente ao longo da direção de orientação das fibras e mais

fraco na direção perpendicular à fibra. Por exemplo, a rigidez de um painel composto depende da orientação das forças e/ou momentos aplicados e do desenho do painel, como o reforço de fibra e matriz utilizados, o método de construção do painel, termofixo contra termoplástico, tipo de tecido e a orientação do eixo da fibra à força primária.

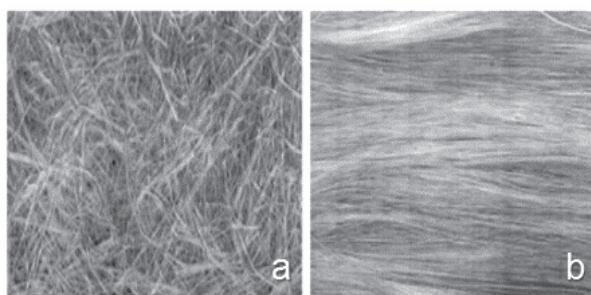


### Assimile

Anisotropia pode ser definida como a variação de propriedades físicas do material que dependem da direção cristalográfica. Segundo Callister e Rethwisch (2013), o módulo de elasticidade, a condutividade elétrica e o índice de refração podem ter valores diferentes nas direções [100] e [111].

Em contraste, os materiais isotrópicos, como o alumínio e o aço já forjados, tipicamente apresentam a mesma rigidez independentemente da orientação e direção das forças ou dos momentos aplicados. As propriedades dos compósitos dependem da natureza dos materiais que são utilizados, isto é, das propriedades da fase matriz e da fase dispersa, da geometria da fase dispersa assim como do grau de ligação entre as interfaces. As matrizes dos compósitos podem ser de natureza polimérica (termoplástica, termoendurecível ou elastomérica). Nesses compósitos a função da matriz é absorver as deformações, dar suporte às fibras, partículas ou folhas e conferir resistência mecânica quando submetidas à compressão. As fibras, por exemplo, aumentam a tenacidade do material (resistência ao impacto) e, assim como as partículas para os elastômeros, podem ser utilizadas como reforço de termoplásticos e termorrígidos. Adicionalmente, as fibras podem estar dispostas aleatoriamente ou propositalmente direcionadas. A Figura 3.32 apresenta uma microscopia eletrônica de varredura de um compósito de matriz poliéster reforçado por fibras curtas de sisal, evidenciando a disposição destas.

Figura 3.32 | Aspecto dos compósitos com fibras orientadas aleatoriamente (a) ou unidirecionalmente (b)



Fonte: <<http://www.scielo.br/pdf/po/v9n4/6195.pdf>>. Acesso em: 10 jun. 2016.

Nos materiais compósitos termoendurecíveis são utilizadas resinas em forma de reagentes, que são inseridas no molde e posteriormente curadas. Além dos compósitos de matriz polimérica, temos os compósitos de matriz cerâmica: estes materiais são leves, apresentam boa resistência e dureza. Nos compósitos cerâmicos são utilizadas como matrizes de reforço fibras de carbono, fibras de vidro, fibras de carbeto de silício, entre outros. Por fim, temos os compósitos de matriz metálica, nos quais são utilizadas como matrizes ligas metálicas de baixa densidade à base de alumínio, titânio e magnésio. Nesse tipo de compósito, a maior parte dos materiais de reforço empregados é cerâmica, como partículas de alumina, fibras de grafita, filamentos de boro etc. A fibra de vidro é outro exemplo muito comum de materiais compósitos. Essa fibra é feita com pequenas fibras de vidro que são envolvidas por uma resina polimérica. É um material de baixa densidade, reciclável, apresenta pouca condutividade térmica, boa resistência à corrosão e é um isolante elétrico. No entanto, esse material não é utilizado em ambientes com altas temperaturas.



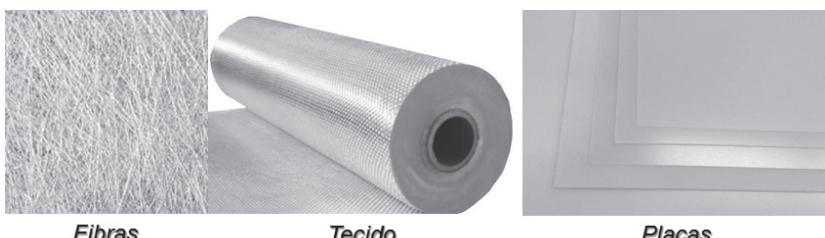
### Pesquise mais

O artigo intitulado *Reaproveitamento de resíduos laminados de fibra de vidro na confecção de placas reforçadas de resina poliéster* apresenta uma alternativa para a reciclagem desse material compósito.

Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/po/v8n3/8307.pdf>>. Acesso em: 10 jun. 2016.

Apesar de não serem tão resistentes e duras como os compósitos de fibra de carbono, as matérias-primas da fibra de vidro são baratas e, quando comparado com alguns metais, esse compósito apresenta melhores propriedades em termos de peso em massa e resistência mecânica, além da facilidade de ser moldado em formas complexas. A fibra pode estar disposta de forma aleatória, achatada para formar uma folha ou em tecido (Figura 3.33) e a matriz polimérica pode ser um polímero termoendurecível, na maioria das vezes é utilizada resina epóxi ou de poliéster; ou então um termoplástico.

Figura 3.33 | Fibra de vidro



Fonte: elaborada pelo autor.

O compósito carbono/epóxi é denominado um compósito estrutural. Nesse tipo de compósito, além das propriedades dos materiais, o projeto geométrico dos elementos estruturais é extremamente importante. Os compósitos reforçados com fibras de carbono são resistentes, podem ser utilizados em ambientes com altas temperaturas. A Figura 3.34 apresenta um laminado carbono/epóxi utilizado na indústria aeronáutica e produzido a partir de camadas sobrepostas de mantas de fibra de carbono envolvidas em resina epóxi.

Figura 3.34 | Laminado carbono/epóxi



Fonte: elaborada pelo autor.

Nessa indústria, os laminados compósitos são importantes na substituição de ligas metálicas e exibem excelentes características, como rigidez e resistência mecânica, resistência a elevadas temperaturas em condições de trabalho, além de exibir um bom desempenho sob fadiga (CALLISTER; RETHWISH, 2013).

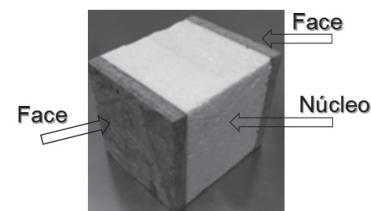


### Exemplificando

Cada vez mais os materiais compósitos são utilizados na fabricação de aeronaves. Quer um exemplo? 50% do peso em massa do Boeing 787 é de compósitos, destacando-se a utilização de laminados estruturais.

Outro tipo de compósito estrutural muito importante são os painéis, que consistem basicamente em duas placas finas de um material resistente intercaladas por um outro material (núcleo), que geralmente apresenta uma baixa densidade e baixo módulo de elasticidade (Figura 3.35). Normalmente são utilizadas espumas poliméricas rígidas, madeira balsa e colmeias.

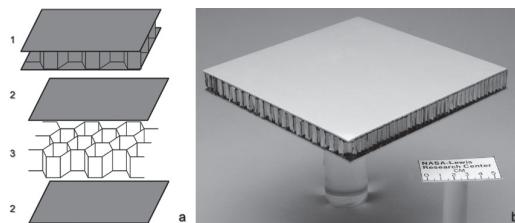
Figura 3.35 | Painel compósito com faces de painel de tiras de madeira orientadas e núcleo de espuma de poliestireno



Fonte: elaborada pelo autor.

A Figura 3.36a apresenta um esquema de painel sanduíche do tipo honeycomb (colmeia) e a Figura 3.36b mostra um painel sanduíche do tipo honeycomb desenvolvido pela NASA.

Figura 3.36 | Painéis sanduíche (honeycomb)



Fonte: elaborada pelo autor.

Na Figura 3.36a a estrutura que está numerada com 1 representa um esquema do painel sanduíche. Nessa figura, a estrutura número 2 corresponde às placas de um determinado material, isto é, a face da lâmina, enquanto a estrutura número 3 refere-se ao núcleo (colmeia) que adere às placas por meio de adesivos. Ao final, o painel sanduíche apresenta, em determinadas condições, resistência à flexão bem maior que placas maciças dos mesmos materiais e da mesma densidade. Nesse compósito as faces suportam as tensões normais de compressão, tração ou cisalhamento que estão associadas à flexão e são fabricadas de materiais relativamente resistentes, como ligas de alumínio, aços, madeiras compensadas ou plásticos reforçados com fibras. O núcleo deve manter as faces afastadas em uma determinada espessura, ser suficientemente rígido na direção perpendicular a elas, a fim de evitar o esmagamento, e sua rigidez ao cisalhamento transversal deve ser grande o suficiente para garantir que o conjunto funcione.

### Sem medo de errar

Passou rápido? Chegamos ao seu último dia como consultor de uma multinacional que trabalha com diversos ramos de materiais. Você recebeu dois tipos de materiais: um compósito termorrígido e um termoplástico. Ambos foram avaliados e agora é o momento de responder: o que são compósitos? Esses materiais sempre apresentam as mesmas propriedades? Qual a diferença entre compósito termorrígido e termoplástico?

Um material compósito pode ser definido como a combinação entre diferentes materiais que, quando juntos, apresentam propriedades características e distintas daquelas dos materiais isolados. Assim, o material apresentará a combinação das melhores propriedades daqueles que o compõem. Existem diversos tipos de compósitos, como o concreto, a fibra de vidro e as fibras de carbono; e cada um

desses materiais apresentará uma determinada propriedade que atenderá a uma necessidade específica.

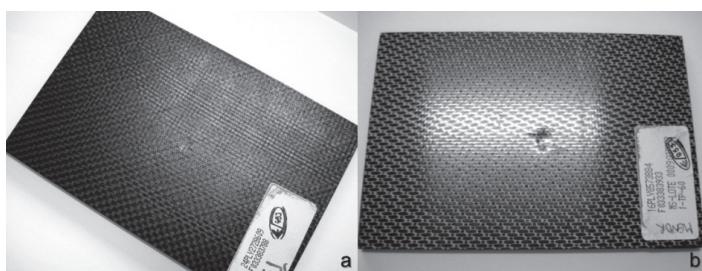


### Faça você mesmo

Acesse o artigo *Inspeção termográfica de danos por impacto em laminados de matriz polimérica reforçados por fibras de carbono* e enumere as principais características dos materiais compósitos utilizados nesse trabalho. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/po/v19n4/12.pdf>>. Acesso em: 10 jun. 2016.

Os compósitos podem ser do tipo reforçado por partículas, por fibras e estruturais (painéis e laminados). Um compósito termoplástico pode ser entendido como um material que utiliza uma resina termoplástica, isto é, uma resina que quando atinge determinada temperatura apresenta alta viscosidade e facilidade para ser moldada e conformada, como a poli-éter-éter-cetona (PEEK), o sulfeto de polifenileno (PPS) e a polieterimida (PEI). Já um compósito termorrígido utiliza-se de resinas que, uma vez aquecidas, não podem ser mais remodeladas, como as resinas epóxis. Os compósitos termorrígidos apresentam melhores propriedades mecânicas e maior resistência à umidade quando comparados aos termoplásticos. Os dois materiais apresentados na Figura 3.37 são compostos por camadas de fibra de carbono, diferenciando o tipo de resina utilizado. A Figura 3.37a apresenta um compósito termorrígido de carbono epóxi e a Figura 3.37b um compósito termoplástico (PPS), ambos foram sujeitos a um ensaio de impacto com mesma energia no centro dos espécimes.

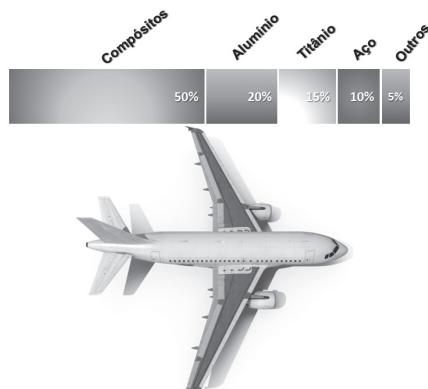
Figura 3.37 | Compósitos estruturais laminados



Fonte: elaborada pelo autor.

Pela análise visual das figuras, podemos concluir que o compósito-PPS (Figura 3.37b) apresenta uma região de deformação maior quando comparado ao carbono-epóxi (Figura 3.37a), corroborando a premissa de que os compósitos termorrígidos têm melhores propriedades mecânicas. Assim é fácil compreendermos a grande importância dessa classe de materiais para os diferentes ramos de indústrias, especialmente a de aeronaves (Figura 3.38).

Figura 3.38 | Porcentagem de diferentes tipos de materiais utilizados na fabricação de uma aeronave



Fonte: elaborada pelo autor.

## Avançando na prática

### Propriedades dos materiais compósitos

#### Descrição da situação-problema

Um jovem pedreiro foi contratado para construir a calçada de uma casa e fez a seguinte lista de compras dos materiais de construção:

Areia grossa, cimento e pedra grossa.

Considerando seus conhecimentos, quais as propriedades que podemos esperar dessa calçada?

Figura 3.39 | Construção de uma calçada



Fonte: <<http://pr.olx.com.br/regiao-de-curitiba-e-paranagua/jardinagem-e-construcao/construcao-de-muros-e-calçadas-237408200>>. Acesso em: 11 jun. 2016.

### Resolução da situação-problema

O concreto é um exemplo de compósito reforçado por partículas grandes, feito de uma matriz de cimento que une partículas de diferentes tamanhos, como areia e brita. As propriedades do cimento dissolvido em água, já com os materiais particulados, dependem do quanto bem esses materiais foram misturados, do tamanho dos materiais particulados e da quantidade de água. O uso de diferentes tamanhos (de pedra e areia) permite um melhor fator de empacotamento do que quando se usa partículas de tamanho semelhante. Se utilizarmos somente os materiais que foram solicitados, o resultado será uma calçada que não terá a mesma resistência de outra construída com diferentes tamanhos de materiais particulados. Nossa calçada terá uma vida útil menor do que uma que utilizou tamanhos diversificados.



#### Atenção

O cimento Portland é o tipo mais comum de cimento para uso geral em todo o mundo, utilizado como um ingrediente básico de concreto e argamassas.

### Faça valer a pena

**1.** Um compósito geralmente é definido como a combinação de dois ou mais materiais distintos, cada um com suas propriedades específicas, que, juntas, criam um novo material, com combinações de propriedades que não são observadas isoladamente.

Assinale a alternativa com a denominação correta dos materiais compósitos que contêm partículas na escala de 10 a 250 nanômetros (nm) de diâmetro:

- a) Estruturais
- b) Reforçados por fibras
- c) Reforçados por partículas grandes
- d) Reforçados por laminados
- e) Reforçados por dispersão

**2.** Os compósitos reforçados por partículas são divididos em dois tipos, de acordo com o tamanho das partículas, em partículas grandes e reforçados por dispersão.

Para o compósito reforçado por dispersão, é correto o que se afirma em:

- a) A matriz suporta a maior parte da carga aplicada, enquanto as partículas impedem o movimento das discordâncias, limitando a deformação plástica.
- b) A matriz suporta a menor parte da carga aplicada, enquanto as partículas promovem o movimento das discordâncias.
- c) A matriz suporta a maior parte da carga aplicada, enquanto as partículas impedem o movimento das discordâncias, limitando a deformação elástica.
- d) A matriz suporta a menor parte da carga aplicada, enquanto as partículas promovem o movimento das discordâncias, limitando a deformação elástica.
- e) A matriz suporta a maior parte da carga aplicada, enquanto as partículas promovem o movimento das discordâncias, limitando a deformação plástica.

**3.** As propriedades físicas dos materiais compósitos em geral não são independentes da direção das forças aplicadas na natureza, isto é, o compósito é mais resistente ao longo da direção de orientação das fibras e mais fraco na direção perpendicular à fibra.

Assinale a alternativa que apresenta o termo sinônimo ao texto destacado no parágrafo acima:

- a) Isômeros
- b) Anisotrópicos
- c) Isotrópicos
- d) Anisótropos
- e) Isótopos



# Referências

ALISSON, E. **Pesquisadores desenvolvem novas ligas metálicas**. 2012. Disponível em: <[http://agencia.fapesp.br/pesquisadores\\_desenvolvem\\_novas\\_ligas\\_metalicas\\_/15559/](http://agencia.fapesp.br/pesquisadores_desenvolvem_novas_ligas_metalicas_/15559/)>. Acesso em: 23 abr. 2016.

ASKELAND, D. R.; WRIGHT, W. J. **Ciência dos materiais**. São Paulo: Cengage Learning, 2014. 672 p.

BORGES, S. **Química**: o que são os polímeros. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=ENKnCkSc6TM>>. Acesso em: 22 abr. 2016.

CALLISTER, W.; RETHWISH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais**: uma introdução. 8. ed. São Paulo: LTC, 2013. 840 p.

CANAL DA CIÊNCIA. **Lançamento do ônibus espacial Discovery**. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=sjMraczJKJY>>. Acesso em: 17 maio 2016.

CANEVAROLO, S. **Ciência dos polímeros**. 2 ed. São Paulo: Artliber, 2006. 280 p.

CANFIELD, P. C.; BUD`KO, S. L. Supercondutor de baixa temperatura em alta. **Scientific American Brasil**, [s. d.]. Disponível em: <[http://www2.uol.com.br/sciam/reportagens/supercondutor\\_de\\_baixa\\_temperatura\\_em\\_alta.html](http://www2.uol.com.br/sciam/reportagens/supercondutor_de_baixa_temperatura_em_alta.html)>. Acesso em: 22 abr. 2016.

FUNDACION CIDETEC. **Polímero auto-regenerable**. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=aQmat9a6jXI>>. Acesso em: 17 maio 2016.

MANUAL DO MUNDO. **Como fazer fogo colorido (experimento de química)**. Disponível em: <[https://www.youtube.com/watch?v=OMe\\_X-oh2mc](https://www.youtube.com/watch?v=OMe_X-oh2mc)>. Acesso em: 22 abr. 2016.

PIRES, A. L. R.; BIERHALZ, A. C. K.; MORAES, Â. M. Biomateriais: tipos, aplicações e mercado. **Química Nova**, v. 38, n. 7, p. 957-971, 2015. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/qn/v38n7/0100-4042-qn-38-07-0957.pdf>>. Acesso em: 16 maio 2016.

RISSON, P. et al. Reaproveitamento de resíduos de laminados de fibra de vidro na confecção de placas reforçadas de resina poliéster. **Polímeros**: Ciência e Tecnologia, Caxias do Sul, Jul./set. 1998. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/po/v8n3/8307.pdf>>. Acesso em: 10 jun. 2016.

SHACKELFORD, J. F. **Ciência dos materiais**. 6. ed. Sao Paulo: Pearson Education do Brasil, 2008. 576 p.

TARPANI, J. R. Inspeção termográfica de danos por impacto em laminados de matriz polimérica reforçados por fibras de carbono. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 19, n. 4, p. 318-328, 2009. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/po/v19n4/12.pdf>>. Acesso em: 10 jun. 2016.

# Processamento e desempenho dos materiais

## Convite ao estudo

Aluno, seja bem-vindo a nossa última unidade da disciplina de *Ciência dos Materiais*!

Como você deve ter percebido, o conteúdo desta unidade finalizará o estudo de cada eixo do tetraedro da ciência dos materiais. Na primeira e segunda unidade estudamos o primeiro eixo do tetraedro dos materiais: composição e estrutura. Nossa estudo iniciou-se com a introdução da ciência dos materiais e em sequência revisitamos as teorias e estruturas atômicas, os diferentes tipos de ligações químicas e como elas influenciam nas propriedades dos materiais, também aprendemos sobre as estruturas e sistemas cristalinos, compreendendo a importância do arranjo e empacotamento atômico.

Na Unidade 3, estudamos outro eixo da ciência dos materiais: as propriedades. Conhecemos as principais propriedades dos materiais metálicos e entendemos a razão pela qual essa classe de materiais é tão utilizada, que é exatamente pela diversidade dessas propriedades. Os materiais metálicos utilizados vão desde fios condutores, passando por estruturas na construção civil, até em fins biomédicos, como próteses, pinos em cirurgias, entre outros. Os metais, as cerâmicas, os polímeros e os compósitos apresentam as mais diversas propriedades mecânicas, elétricas, térmicas, magnéticas e ópticas.

Por fim, na Unidade 4, vamos estudar os últimos eixos: processamento e desempenho. Nesta unidade, introduziremos algumas das principais aplicações dos materiais e alguns tipos de processamento. Ao final desta

unidade e, consequentemente, da disciplina de *Ciência dos Materiais*, você terá conhecimento sobre os conceitos fundamentais, importantes para disciplinas futuras que aprofundarão os temas aqui introduzidos e que abordam os materiais específicos. Assim, você será capaz de selecionar materiais adequados para uma determinada aplicação, de modo a atender às características de desempenho.

Vamos iniciar nosso último desafio?

Após anos de carreira, iniciado no estágio, passando por vendedor técnico e, por fim, na consultoria de uma empresa, você decidiu que era hora de se tornar um empreendedor. Em parceria com dois amigos, vocês fundaram a EMIS Consulting, uma empresa formada por experts na área de materiais utilizados nas mais diversas indústrias. No entanto, além da consultoria técnica sobre as características dos materiais, como diferencial no mercado, a EMIS oferece suporte ao processamento e à viabilidade financeira de se utilizar determinado material em detrimento de outro.

*"Tu te tornas eternamente responsável por aquilo que cativas."*

(Antoine de Saint-Exupéry)

# Seção 4.1

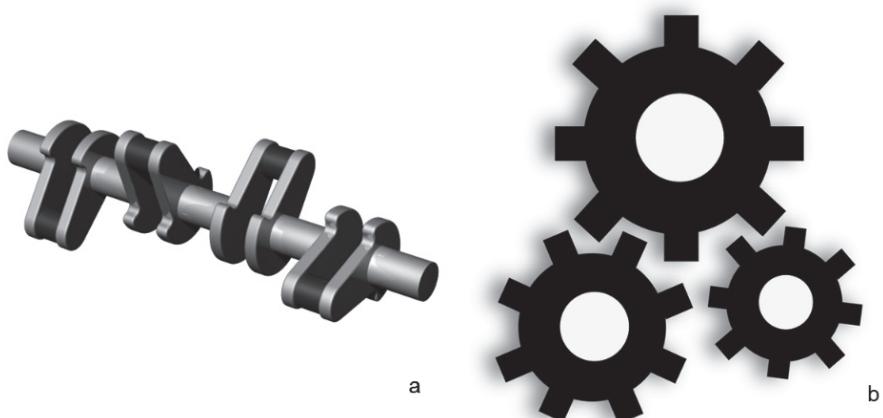
## Processamento e desempenho dos materiais metálicos

### Diálogo aberto

Caro aluno, iniciamos mais uma etapa rumo ao final do semestre. Nesta seção vamos estudar algumas aplicações e tipos de processamentos de ligas metálicas normalmente utilizadas em diversos setores industriais. Vamos conhecer a composição, os agrupamentos de diversas ligas metálicas e seus respectivos agrupamentos, aprender sobre os sistemas de especificações e introduzir alguns dos principais métodos de processamento. Dessa forma, você compreenderá a importância de termos estudo todos esses temas e será capaz de selecionar os metais adequados para uma determinada aplicação, que atenda todas as especificidades de utilização.

Você, como um dos proprietários da EMIS Consulting e expert na área de materiais, recebeu uma proposta da Nintai Automóveis, empresa na qual você iniciou sua carreira, para que a EMIS Consulting o auxilie na escolha dos possíveis materiais utilizados na fabricação de engrenagens e virabrequins. A Figura 4.1a apresenta um virabrequim, enquanto a Figura 4.1b apresenta uma engrenagem.

Figura 4.1 | Virabrequim e engrenagens



Fonte: elaborada pelo autor.

Quais os materiais mais indicados para essa fabricação? Quais os métodos de processamento? Ao longo desta seção, vamos estudar os principais tipos de ligas ferrosas e ligas não ferrosas, compreender as diferenças entre os aços com baixo, médio e alto teor de carbono e conhecer suas aplicações típicas. Você será introduzido sobre alguns tipos de fabricação de metais e operações de conformação a quente e a frio. Lembre-se de que as decisões sobre a seleção de um determinado material também são influenciadas pelas facilidades de processamento, mas, como sabemos, todas as escolhas devem ser pautadas na inter-relação entre composição, propriedades, processamento e desempenho.

Ao final deste estudo, você será capaz de selecionar o material ideal na fabricação das engrenagens e virabrequins, assim como indicar o tipo de processamento e as propriedades desse material.

Bons estudos!

## Não pode faltar

A seleção de um material é, frequentemente, um problema a ser resolvido dentro de projetos industriais e aplicações específicas. Os materiais devem atender às características do projeto, assim como apresentar as propriedades requeridas. Os materiais metálicos e suas ligas são os mais utilizados nas diversas áreas das ciências e engenharias e são agrupados em duas classes: metais ferrosos e não ferrosos. Essa classificação baseia-se principalmente na composição química desses materiais.

Os metais ferrosos ou ligas ferrosas são aqueles nos quais o ferro (Fe) é o principal constituinte, enquanto que os demais metais e ligas são denominados como metais ou ligas não ferrosas. Os materiais ferrosos são produzidos em quantidades superiores a de qualquer outro material metálico, em virtude da disponibilidade abundante de matéria-prima, facilidade de conformação, viabilidade econômica e, por fim, pela versatilidade de suas propriedades físicas e mecânicas. No entanto, os metais ferrosos apresentam algumas desvantagens, como densidade relativamente elevada e suscetibilidade à corrosão. Em materiais ferrosos, o principal elemento de liga é o carbono (C) e, de acordo com a quantidade de carbono presente, as ligas ferrosas apresentarão propriedades distintas, especialmente quando o teor de carbono é inferior ou superior a 2,14%. De maneira geral, as ligas ferrosas com quantidade de carbono inferior a 2,14% são denominadas aços, enquanto que as ligas ferrosas com teor de carbono acima de 2,14% são denominadas ferros fundidos.

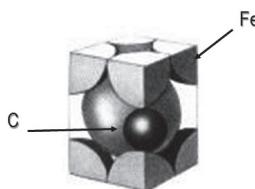


### Pesquise mais

O vídeo disponível em <<https://www.youtube.com/watch?v=CMGe7yuCHqE>> (acesso em: 17 jul. 2016) apresenta o processo de obtenção de barras de aço.

Os aços são ligas de ferro-carbono que contêm outros elementos químicos em sua composição, como crômio (Cr), níquel (Ni), molibdênio (Mo), tungstênio (W), entre outros. Nos aços, as propriedades mecânicas são sensíveis ao teor de carbono, isto é, quanto maior a concentração de carbono mais duro e menos dúctil é o aço. Dessa forma, os aços são classificados em aços com baixo, médio e alto teor de carbono. Os aços com baixo teor de carbono apresentam menos de 0,25% em peso de carbono (%p C), os com médio teor de carbono possuem concentrações de 0,25 a 0,6 %p C e, finalmente, os aços com alto teor de carbono apresentam concentrações superiores a 0,6%p C. Nos aços, os átomos de carbono ocupam os interstícios da estrutura cristalina do ferro, como mostra a representação da Figura 4.2, porém, outros elementos de liga são adicionados propositalmente, por diversas razões, a fim de melhorar as propriedades mecânicas dos aços e a resistência à corrosão, como observado nos aços-ligas.

Figura 4.2 | Representação para estrutura CCC do Fe-C por meio de esferas rígidas



Fonte: elaborada pelo autor.

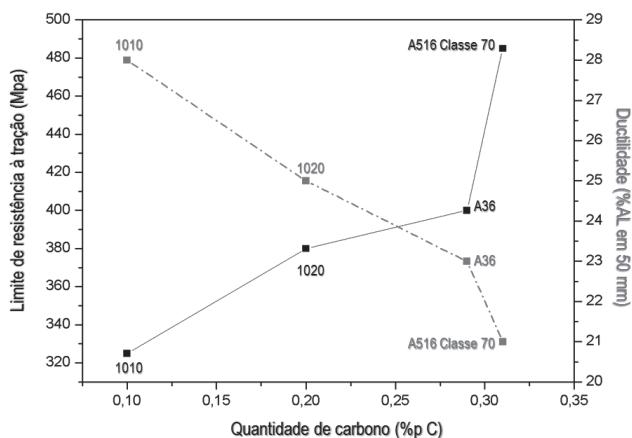
Os aços com baixo teor de carbono são os mais produzidos e, por apresentarem uma baixa concentração de carbono, não respondem eficientemente a tratamentos térmicos para o aumento de resistência mecânica, mas isso é possível por meio do trabalho a frio. A microestrutura é basicamente composta por ferrita e perlita, o que faz desses aços relativamente macios, frágeis e com uma excelente ductilidade combinada à elevada tenacidade. Assim, esses materiais são facilmente usinados e soldados e dentre todos os tipos de aços são os mais baratos de serem produzidos (CALLISTER; RETHWISCH, 2013). Os aços e as ligas com baixo teor de carbono são tipicamente aplicados na construção de edifícios, pontes, perfis estruturais, carcaças e componentes de automóveis, entre outras. Na Tabela 4.1 é possível analisarmos a especificação, o limite de resistência à tração, limite de escoamento e ductilidade de alguns aços-carbono comuns com baixo teor de carbono. No gráfico da Figura 4.3 é possível visualizar como o aumento da quantidade de carbono afeta as propriedades mecânicas dos aços, aumentando também o limite de resistência e diminuindo a ductilidade.

Tabela 4.1 | Composição e propriedades mecânicas de aços-carbono comuns com baixo teor de carbono e laminados a quente

Especificação	Composição (%p)			Propriedades Mecânicas		
Número AISI/ SAE ou ASTM	C	Mn	Outros	LRT* (Mpa)	Limite de Escoamento (Mpa)	%AL em 50 mm
1010	0,10	0,45	-	325	180	28
1020	0,20	0,45	-	380	210	25
A36	0,29	1,00	0,20 Cu (min)	400	220	23
A516 Classe 70	0,31	1,00	0,25 Si	485	260	21

Fonte: adaptada de Callister e Rethwisch (2013).

Figura 4.3 | Propriedades mecânicas de aços-carbono comuns em função da quantidade de carbono



Fonte: elaborada pelo autor.

Um grupo especial de ligas ferrosas com uma quantidade notável de elementos de liga é conhecido como HSLA (*high-strength, low-alloy*) ou ARBL (aços de alta resistência e baixa liga). Os elementos de liga mais comuns são: Cu, V, Ni, W, Cr, Mo etc. Essas ligas podem ter sua resistência aumentada por meio de tratamento térmico, ao mesmo tempo em que são dúcteis, usinados e conformados. Em condições atmosféricas normais esses aços ou ligas apresentam maior resistência à corrosão quando comparados aos aços-carbono comum.



### Assimile

Os aços e suas ligas são nomeados por códigos utilizados pelo Instituto Americano do Ferro e Aço (AISI – American Iron and Steel Institute), pela Sociedade de Engenheiros Automotivos (SAE – Society of Automotive Engineers) e pela Sociedade Americana para Ensaios e Materiais (ASTM – American Society for Testing and Materials).

A Tabela 4.2 apresenta as principais aplicações de aços-carbono comuns com baixo teor de carbono e de aços de alta resistência e baixa liga.

Tabela 4.2 | Principais aplicações de aços-carbono comuns com baixo teor de carbono e laminados e aços ARBL

Aços	
Número AISI/SAE ou ASTM	Aplicações
<b>Aços-Carbono com Baixo Teor de Carbono</b>	
1010	Painéis de automóveis, arames e pregos
1020	Aço estrutural, chapas e tubos
A36	Estrutural (pontes e edificações)
A516 Classe 70	Vasos de pressão para baixas temperaturas
<b>Aços de Alta Resistência e Baixa Liga</b>	
A440	Estruturas rebitadas ou parafusadas
A633 Classe E	Estruturas utilizadas em baixas temperaturas
A656 Classe 1	Chassis de caminhões e vagões de trem

Fonte: adaptada de Callister e Rethwisch (2013).

Os aços com médio teor de carbono (0,25 a 0,6 %p C) são mais resistentes e menos dúcteis quando comparados aos aços de baixo teor de carbono. Esses aços apresentam baixa temperabilidade e, assim, podem ser tratados termicamente com sucesso em seções muito finas e com elevada taxa de resfriamento. No entanto, a adição de elementos de liga, como o níquel, cromo e molibdênio, melhora sua temperabilidade. Entre as aplicações de aços com médio teor de carbono, temos a utilização em vias e rodas férreas, componentes estruturais de elevada resistência, na fabricação de engrenagens e virabrequins.



### Reflita

Se os aços com médio teor de carbono apresentam baixa temperabilidade, por que são comumente utilizados em peças sujeitas a grandes esforços como o virabrequim?

A AISI, SAE e ASTM são responsáveis por classificar e especificar os aços e ligas metálicas. As especificações AISI/SAE consistem em um número com quatro dígitos, os quais os dois primeiros correspondem ao tipo de liga, enquanto os últimos dois dígitos representam a quantidade de carbono multiplicada por 100. Para os aços-carbono comuns, os dois primeiros dígitos são 1 e 0, já para os aços-liga são especificadas outras combinações dos dois dígitos iniciais.



### Exemplificando

Os aços AISI/SAE 1020, 1045 e 1060 são exemplos de aços-carbono comuns e possuem, respectivamente, 0,20, 0,45 e 0,60 % p C.

Além dessas classificações também é utilizada a especificação UNS (Unified numbering system), que é um sistema de numeração unificado tanto de ligas ferrosas como não ferrosas. Nesse sistema cada família de metais é indicada por uma letra, seguida do número AISI/SAE, acrescentado de um quinto dígito igual a zero. Assim, o aço AISI/SAE 1020 na especificação UNS é G10200.



### Pesquise mais

Pesquise mais sobre esse assunto! Na obra a seguir, há um capítulo que apresenta algumas tabelas com as especificações AISI/SAE e UNS.

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

Os aços com elevado teor de carbono são mais resistentes e duros, consequentemente, apresentam a ductilidade muito limitada. Eles são tratáveis termicamente e utilizados principalmente em condições endurecidas e revenidas. Além disso, têm elevada resistência ao desgaste e são capazes de manter a aresta de corte afiada, característica utilizada na fabricação de ferramentas, como facas, lâminas de barbear, lâminas de serra, entre outras. A adição de elementos de liga como o Cr, V, Mo, W, reagem com o carbono produzindo carbonetos duros e resistentes ao desgaste. O aço inoxidável é outro tipo de aço que apresenta elevada resistência à corrosão, ou seja, dificulta a formação de ferrugem em virtude da adição de elementos de liga, principalmente, um mínimo de 11% p de Cr.

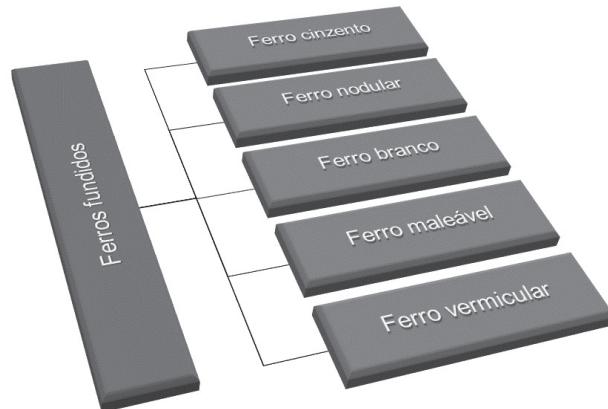
Os aços inoxidáveis são divididos em três classes: ferríticos, martensíticos e austeníticos. Essa classificação é baseada com base na fase predominante da microestrutura. Os aços inoxidáveis ferríticos são ligas de Fe-Cr-C com 12-14% de Cr, principalmente, e podem ter pequenas quantidades de Mo, V, Nb, e Ni. Os aços inoxidáveis austeníticos geralmente contêm 18% de Cr e 8% de Ni, além de outros elementos de liga em menores concentrações. Por fim, os aços martensíticos são tratados termicamente, de modo que a martensita é a principal fase constituinte.

Os aços inoxidáveis são utilizados em componentes de exaustão automotiva, câmaras de combustão, construções com solda, peças de motores ajato, instrumentos cirúrgicos, vasos de pressão, entre outros. Além dos aços, fazem parte das ligas metálicas ferrosas os ferros fundidos, que são ligas com teor superior a 2,14% p C, no entanto, na prática, os ferros fundidos apresentam entre 3 a 4,5% p C. As ligas metálicas com esse teor de carbono são facilmente fundidas em temperaturas inferiores às dos aços, o que viabiliza a utilização destes na produção de peças fundidas.

A cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) é uma fase metaestável, dura e quebradiça que está presente nos ferros fundidos e em determinadas condições de decomposição para formar ferrita ( $\alpha$ ) e grafita. A tendência de ferros fundidos formarem grafita é geralmente controlada por

sua composição e taxa de resfriamento. Com base na forma de carbono presente, os ferros fundidos são classificados como cinzento, nodular, branco, maleável e vermicular como mostra a Figura 4.4.

Figura 4.4 | Esquema de classificação dos ferros fundidos



Fonte: elaborada pelo autor.

A seguir temos a definição dos tipos de ferros fundidos:

**Ferro cinzento:** essas ligas são constituídas de grafita em forma de flocos envoltos por uma matriz de ferrita ( $\alpha$ ) ou perlita. Em virtude da presença de grafita, quando a superfície é fraturada ela fica acinzentada. Esses metais têm boas propriedades de amortecimento e algumas aplicações típicas incluem: estruturas de base, carna para máquinas pesadas etc.

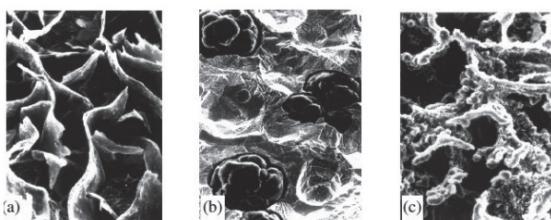
**Ferro nodular:** adições de magnésio e cério ao ferro cinzento durante a fundição resultam na formação de microestrutura e de grafita em forma de aplicações típicas que incluem: corpos de bomba, eixos de manivela, componentes automotivos etc.

**Ferro branco:** quando o teor de silício é inferior a 1%, em combinação com taxas de resfriamento rápidas, não há tempo suficiente para a cementita se decompor, fazendo com que grande parte se conserve. A presença da cementita torna a superfície fraturada esbranquiçada. Esse metal é utilizado em cilindros de laminação em laminadores.

**Ferro maleável:** esses metais são formados após o tratamento térmico do ferro fundido branco que é mantido por horas em uma temperatura de 800-900 °C. Posteriormente, o material é resfriado na temperatura ambiente, promovendo a decomposição da cementita e, consequentemente, a formação de grafita na forma de aglomerados envolvidos por uma matriz de ferrita ou perlita, de acordo com a taxa de resfriamento. Algumas aplicações típicas incluem: estradas de ferro e outros serviços pesados.

**Ferro vermicular:** como o próprio nome sugere, nesse tipo de liga a grafita está disposta em forma de vermes em uma matriz perlítica ou ferrítica/perlítica. A Figura 4.5 apresenta alguns exemplos da disposição das grafitas.

Figura 4.5 | Micrografia eletrônica de varredura mostrando da esquerda para a direita a grafita lamelar, nodular e vermicular, respectivamente



Fonte: adaptada de Colpaert (1974).

Outra classe dos materiais metálicos são os metais ou ligas não ferrosas. Estes são fabricados com facilidade e de forma econômica. Entre eles destacam-se as ligas de alumínio e cobre. As ligas de alumínio são caracterizadas pela baixa densidade, alta condutividade térmica e elétrica, e boa resistência à corrosão. As aplicações comuns de ligas de alumínio são: latas de bebidas, peças automotivas, carrocerias, estruturas de aeronaves etc. Algumas das ligas de alumínio são capazes de aumentar a resistência por precipitação, enquanto outras são reforçadas por trabalho a frio ou métodos de solução sólida.

As ligas de cobre são caracterizadas por apresentarem boa resistência à corrosão em diversas atmosferas. Assim como as de alumínio, a maioria dessas ligas são reforçadas por um ou outro trabalho a frio ou método de solução sólida. O latão e o bronze são exemplos de ligas de cobre. O latão é uma liga de cobre e zinco, enquanto o bronze é uma liga de cobre e estanho. Entre as principais aplicações destacam-se o uso em bijuterias, moedas, instrumentos musicais, eletrônicos, molas, instrumentos cirúrgicos e odontológicos, radiadores, entre outros.



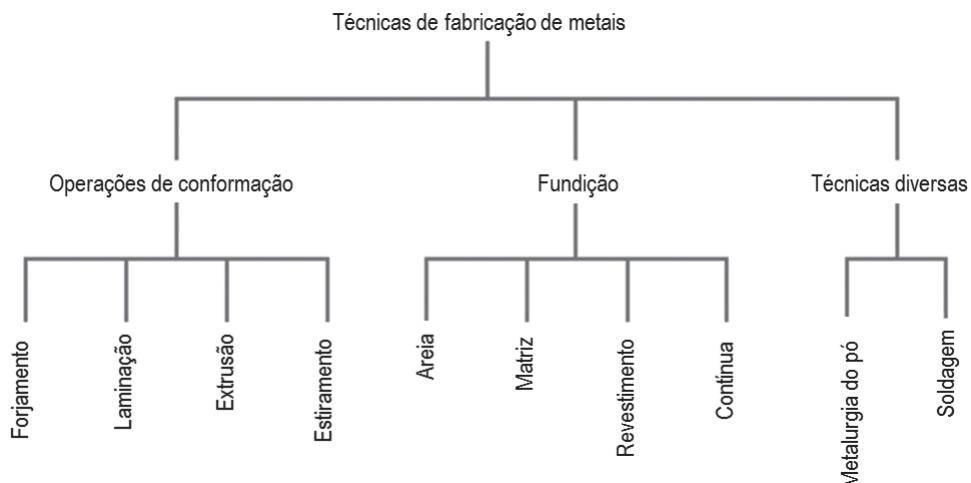
### Pesquise mais

Além das ligas anteriormente citadas, existem outras não ferrosas e metais muito importantes, como as ligas de magnésio, de titânio, metais refratários, superligas e metais nobres. Não deixe de consultar as referências indicadas, como o livro a seguir, que apresenta de forma bem objetiva as características desses metais. Aprofunde-se no tema e invista em seus estudos!

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

Todos esses metais e ligas são submetidos a diferentes processos para a obtenção de uma determinada peça, o processamento mais adequado será definido com base nas propriedades dos metais, o tamanho e forma acabada, assim como o custo. A Figura 4.6 apresenta as principais técnicas de fabricação de peças metálicas.

Figura 4.6 | Principais técnicas de fabricação de peças metálicas



Fonte: adaptada de Callister e Rethwisch (2013).

### Sem medo de errar

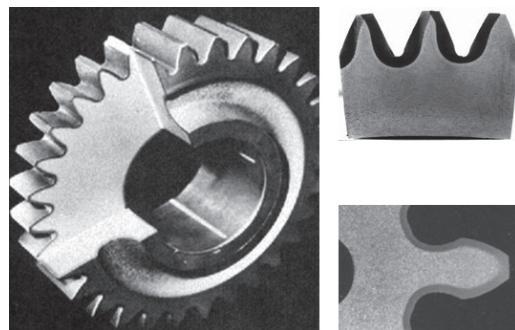
Você, como um dos proprietários da EMIS Consulting e expert na área de materiais, recebeu uma proposta da Nintai Automóveis, empresa na qual você iniciou sua carreira, para que a EMIS Consulting o auxilie na escolha dos possíveis materiais utilizados na fabricação de engrenagens e virabrequins. Quais os materiais mais indicados para essa fabricação? Quais os métodos de processamento?

Ao longo desta seção estudamos os principais tipos de metais e vimos que esses materiais podem ser classificados de acordo com sua composição em ligas metálicas ferrosas e não ferrosas, sendo que a principal diferença entre elas é a quantidade de Fe. Você aprendeu que as chamadas ligas ferrosas são diferenciadas com base na concentração de carbono presente nesses metais entre aços com baixo, médio e alto teor de carbono.

As engrenagens e virabrequins são componentes mecânicos que tipicamente são fabricados com aços com médio teor de carbono (0,25 a 0,6 %p C), apresentam baixa temperabilidade e podem ser tratados termicamente com sucesso em seções muito finas e com elevada taxa de resfriamento. Essas são características necessárias na fabricação de virabrequins e engrenagens, que precisam apresentar elevada dureza

superficial e núcleo mais dúctil e tenaz para que a peça suporte os esforços solicitados e não frature. A Figura 4.7 apresenta uma engrenagem submetida a um tratamento térmico de têmpera superficial.

Figura 4.7 | Engrenagem submetida ao tratamento térmico superficial



Fonte: elaborada pelo autor.

Na Figura 4.7 é possível observar que os dentes da engrenagem apresentam uma microestrutura diferente daquela presente no núcleo da peça, que é evidenciado pela diferença de coloração. Essa formação corresponde a uma estrutura totalmente martensítica que apresenta elevada dureza e resistência mecânica, no entanto, baixa ductilidade. As engrenagens e virabrequins podem ser fabricados, por exemplo, por usinagem e por forjamento (conformação mecânica).



### Atenção

Acesse o link a seguir e assista à fabricação de um virabrequim pelo processo de forjamento. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=5Yg8AfclJ4g>>. Acesso em: 18 jul. 2016.

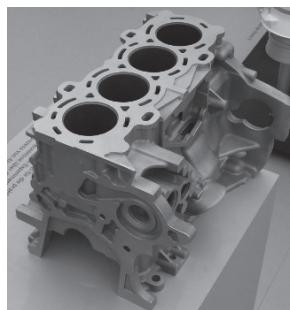
## Avançando na prática

### Processamento e desempenho dos materiais metálicos

#### Descrição da situação-problema

O bloco do motor é a peça que aloja os cilindros de um motor de combustão interna (Figura 4.8). Ele é chamado de "bloco" porque geralmente é uma peça sólida do carro que abriga os cilindros e seus componentes dentro de um cárter refrigerado e lubrificado.

Figura 4.8 | Bloco de um motor



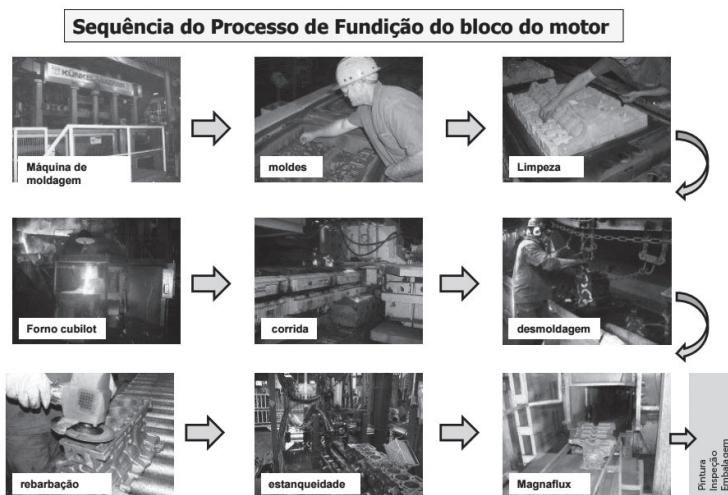
Fonte: <[https://pt.wikipedia.org/wiki/Bloco\\_do\\_motor#/media/File:BlocoMotor4CilindrosAluminio.PNG](https://pt.wikipedia.org/wiki/Bloco_do_motor#/media/File:BlocoMotor4CilindrosAluminio.PNG)>. Acesso em: 18 jul. 2016.

Quais são os materiais e processos que podem ser utilizados para a obtenção dessa peça? Quais são as características que esses materiais devem ter?

### Resolução da situação-problema

As indústrias automobilísticas sempre buscam materiais que apresentam boa resistência mecânica associada à baixa densidade. Na produção de blocos de motores, as ligas de alumínio e os ferros fundidos são os materiais tipicamente utilizados. No entanto, aquelas se destacam em relação ao ferro fundido, pois apresentam menor densidade, isto é, são mais leves e têm melhores propriedades dissipadoras, porém é um material com custo mais elevado que o ferro fundido. Entre os processos de fabricação, destacam-se a usinagem e a fundição. A Figura 4.9 apresenta a sequência do processo de fundição para a fabricação de um bloco de motor.

Figura 4.9 | Sequência do processo de fundição de um bloco de motor



Fonte: <<http://www.damec.ct.utfpr.edu.br/automotiva/downloadsAutomot/d7MatMotorMod3.pdf>>. Acesso em: 20 jul. 2016.

## Faça valer a pena

**1.** A seleção de um material é frequentemente um problema a ser resolvido dentro de projetos industriais e aplicações específicas. Os materiais devem atender às características do projeto, assim como apresentar as propriedades requeridas, e os materiais metálicos e suas ligas são os mais utilizados nas diversas áreas da ciência e engenharias.

Assinale a alternativa que apresenta corretamente o agrupamento dos metais e suas ligas:

- a) Ligas ferrosas e não ferrosas.
- b) Ligas metálicas e ferros fundidos.
- c) Aços e ligas metálicas.
- d) Aço inoxidável e ferros fundidos.
- e) Ligas ferrosas e ligas não ferrosas.

**2.** Assinale a alternativa que preenche corretamente as lacunas a seguir:

As \_\_\_\_\_ são aquelas em que o \_\_\_\_\_ é o principal constituinte, enquanto o \_\_\_\_\_ é o principal elemento de liga nesses metais.

- a) ligas ferrosas, ferro e carbono
- b) ligas não ferrosas, ferro e níquel
- c) ligas ferrosas, carbono e ferro
- d) ligas não ferrosas, carbono e manganês
- e) ligas metálicas, metal e carbono

**3.** Analise as colunas

Coluna A	Coluna B
A. Baixo teor de carbono	I. Elemento predominante é o cromo.
B. Médio teor de carbono	II. Baixa temperabilidade, mas eficiente têmpera superficial.
C. Alto teor de carbono	III. Resistente ao desgaste e pouco dúctil.
D. Aço inoxidável	IV. Microestrutura é basicamente composta por ferrita e perlita.

- a) A - I; B - II; C - III; D - IV.
- b) A - III; B - II; C - IV; D - I.
- c) A - IV; B - II; C - III; D - I.
- d) A - II; B - III; C - IV; D - I.
- e) A - II; B - I; C - III; D - IV.

## Seção 4.2

### Processamento e desempenho dos materiais cerâmicos

#### Diálogo aberto

Caro aluno, seja bem-vindo.

Mais uma etapa foi concluída e a EMIS Consulting começa a se destacar no mercado. A primeira empresa a acreditar no trabalho da EMIS foi a Nintai Automóveis, que contratou seus serviços para auxiliá-los na escolha dos materiais e dos principais processos de fabricação de engrenagens e virabrequins. Você foi capaz de apontar que as engrenagens e virabrequins são fabricados com aços com médio teor de carbono (0,25 a 0,6 %p C) e que apresentam baixa temperabilidade, mas podem ser submetidos a tratamentos térmicos superficiais com sucesso. Essas peças também podem ser fabricadas por usinagem ou por forjamento.

Após trabalhar com os metais, a EMIS recebeu uma proposta de trabalho em uma olaria que está em atividade há mais de três décadas e é especializada na fabricação de tijolos. A cidade cresceu e estão sendo construídos muitos condomínios residenciais, porém a olaria não tem suprido a demanda e, consequentemente, vem perdendo muitos clientes. Os tijolos são feitos basicamente de argila, em forma de paralelepípedo e são submetidos a cozimento de maneira artesanal. Existe uma solução para aumentar a produção da olaria? O correto seria contratar mais funcionários e, assim, aumentar a produção? Existe alguma técnica que poderia aumentar a produção? A Figura 4.10 mostra os tijolos da olaria já expostos ao sol para secagem.

Figura 4.10 | Tijolos expostos ao sol



Fonte: <[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/ca/Brick\\_production\\_in\\_Songea,\\_Tanzania.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/ca/Brick_production_in_Songea,_Tanzania.jpg)>. Acesso em: 28 jul. 2016.

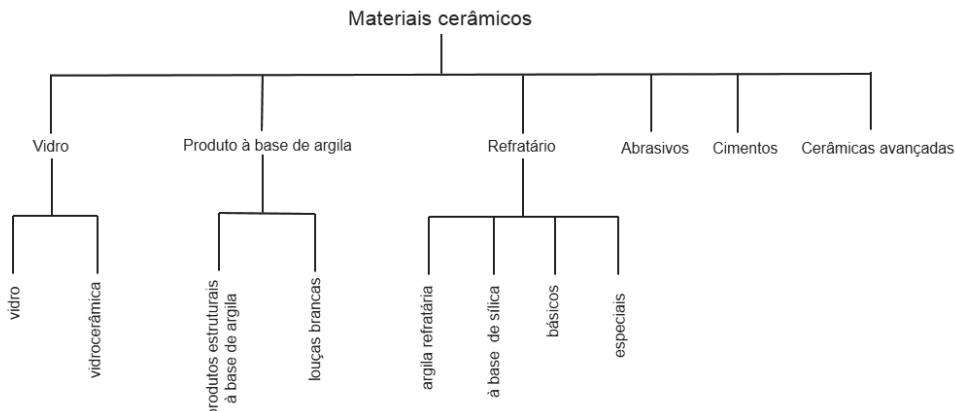
Nesta seção vamos estudar as classificações dos materiais cerâmicos, suas diversas aplicações, processamentos e desempenho. Ao final deste estudo, você será capaz de identificar alternativas e técnicas que irão auxiliar o proprietário a aumentar sua produção e conseguir atender a demanda do mercado.

## Não pode faltar

Os materiais cerâmicos são utilizados nas mais diversas aplicações de engenharia em virtude da diversidade das composições básicas e ligações interatômicas, que resultam em diferentes propriedades do material final. Esse material pode ser classificado de acordo com sua composição específica ou com base em suas aplicações. Em relação à composição química, as cerâmicas podem ser classificadas como: óxidos, carbetas, nitretos, sulfetos, fluoretos etc.

A Figura 4.11 apresenta a classificação dos materiais cerâmicos de acordo com suas aplicações.

Figura 4.11 | Classificação dos materiais cerâmicos



Fonte: elaborada pelo autor.

Em geral, os materiais cerâmicos utilizados para aplicações de engenharia podem ser divididos em dois grupos: cerâmicas tradicionais e cerâmicas de engenharia. Normalmente, as cerâmicas tradicionais são feitas de três componentes básicos: argila, sílica e feldspato, produzindo produtos como tijolos, telhas e artigos de porcelana. Já as cerâmicas de engenharia são compostos altamente puros de óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), carboneto de silício (SiC) e nitreto de silício ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ).

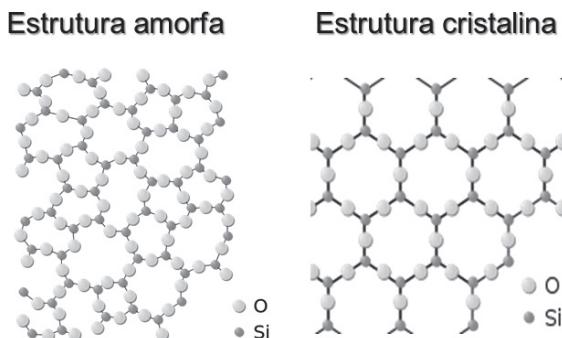


### Exemplificando

Em geral, os materiais que utilizamos na construção de uma casa, como telhas e tijolos, são exemplos de cerâmicas tradicionais. Já cerâmicas avançadas são utilizadas em sistemas de comunicação por fibras ópticas, por exemplo.

O vidro é um dos tipos de materiais cerâmicos com o qual temos contato diariamente: o vemos em recipientes, janelas, espelhos, utensílios domésticos, entre outros. Os vidros são silicatos não cristalinos com adição de outros óxidos que influenciam suas propriedades finais. Entre os óxidos mais utilizados destacam-se CaO (óxido de cálcio), Na<sub>2</sub>O (óxido de sódio), K<sub>2</sub>O (óxido de potássio) e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (óxido de alumínio). Os vidros são uma linha exclusiva de materiais cerâmicos definidos principalmente por sua estrutura atômica, que não é cristalina e ordenada, como a maior parte das outras cerâmicas, mas apresentam uma estrutura amorfa altamente desordenada. Já os denominados vidrocerâmicos são, em sua grande maioria, vidros inorgânicos submetidos a tratamentos térmicos em elevadas temperaturas. A Figura 4.12 apresenta as estruturas da sílica amorfa (SiO<sub>2</sub>), estrutura típica de um vidro, e a estrutura desse mesmo material, mas como sólido cristalino.

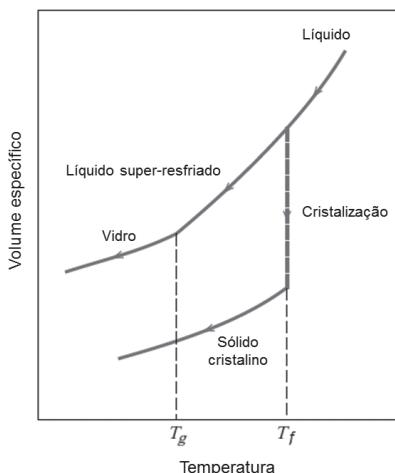
Figura 4.12 | Estruturas atômicas da sílica



Fonte: elaborada pelo autor.

A utilização de vidros é importante, principalmente em aplicações que envolvam sua resposta ao aquecimento, pois, diferentemente dos materiais cristalinos, não existe uma temperatura em que o líquido se transforma em sólido. A temperatura específica, denominada temperatura de transição vitrea ( $T_g$ ) ou temperatura fictícia é definida com base na viscosidade, isto é, o volume diminui continuamente com a redução da temperatura, enquanto que nos materiais cristalinos ocorre uma redução descontínua do volume na temperatura de fusão. O gráfico apresentado na Figura 4.13 apresenta um contraste entre o comportamento do volume específico versus temperatura para os materiais cristalinos e não cristalinos.

Figura 4.13 | Comportamento do volume específico versus temperatura para os materiais cristalinos e não cristalinos



Fonte: adaptada de Callister e Rethwisch (2013).



### Refletá

Mas afinal, você já é capaz de responder se o vidro é um líquido ou um sólido?

No caso dos materiais vítreos, a partir da temperatura de transição vítreia até a temperatura de fusão ( $T_f$ ), o material é denominado como líquido super-resfriado e, após a  $T_f$ , é denominado líquido, enquanto que para temperaturas abaixo da  $T_g$  o material é denominado vidro.

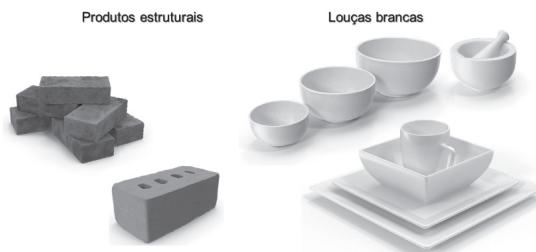


### Pesquise mais

Aprofunde os seus estudos com a obra a seguir, que em um de seus capítulos, aborda pontos muito importantes como o diagrama de transformação por resfriamento do vidro, assim como as composições e características de alguns vidros comerciais.

Os produtos à base de argila são materiais muito utilizados e encontrados em abundância em virtude da facilidade que esses são feitos. Esses produtos são basicamente de dois tipos: os produtos estruturais (tijolos, telhas, tubos de esgoto) e louças brancas (porcelana, louças, cerâmicas etc). Os produtos estruturais, como o próprio nome já indica, têm como característica mais importante a integridade estrutural do material. Já as louças brancas recebem esse nome pela característica desses materiais quando submetidos ao cozimento em elevadas temperaturas, que tornam-se brancos (Figura 4.14).

Figura 4.14 | Exemplos de produtos estruturais e louças brancas



Fonte: elaborada pelo autor.

Os materiais refratários pertencem a outra classe de materiais cerâmicos e são descritos pela sua capacidade de suportar altas temperaturas sem fundir ou se decompor, eles mantêm-se inertes quando expostos a ambientes severos e são bons isolantes térmicos. Essas propriedades descritas dependem da composição química, fazendo com que esses materiais sejam classificados em argila refratária, à base de sílica, básicos e especiais.



### Assimile

**Argila refratária:** são de alta pureza, resistindo a elevadas temperaturas, mas sua resistência mecânica não é uma consideração importante.

**À base de sílica:** apresentam elevada resistência mecânica em temperaturas elevadas.

**Básicas:** são resistentes ao ataque por escórias e apresentam elevadas concentrações de MgO e CaO.

**Especiais:** são utilizadas em aplicações refratárias específicas, incluem alumina, sílica, magnesita, zircônia, mulita, carbeto, carbono e grafita.

As cerâmicas abrasivas são materiais que se destacam pela elevada dureza e resistência ao desgaste, além de alta tenacidade. Esses materiais são utilizados no desgaste, corte ou polimento de materiais com menor dureza. O diamante, carboneto de silício, carboneto de tungstênio, areia de sílica e óxido de alumínio são alguns exemplos típicos de materiais cerâmicos abrasivos, que podem ser empregados em várias formas, como: grãos soltos, abrasivos revestidos e colados a discos de esmirilhamento.

Os cimentos constituem outra classificação de material cerâmico. Estes, ao serem misturados em água, formam inicialmente uma pasta que, posteriormente, pega e seca. Essa propriedade do cimento é muito útil, pois permite que materiais sólidos com diferentes geometrias sejam moldados, além de ser utilizado como fase de

ligação entre os tijolos em construção. O cimento, cimento portland, gesso e cal são materiais que fazem parte desse grupo de materiais cerâmicos.

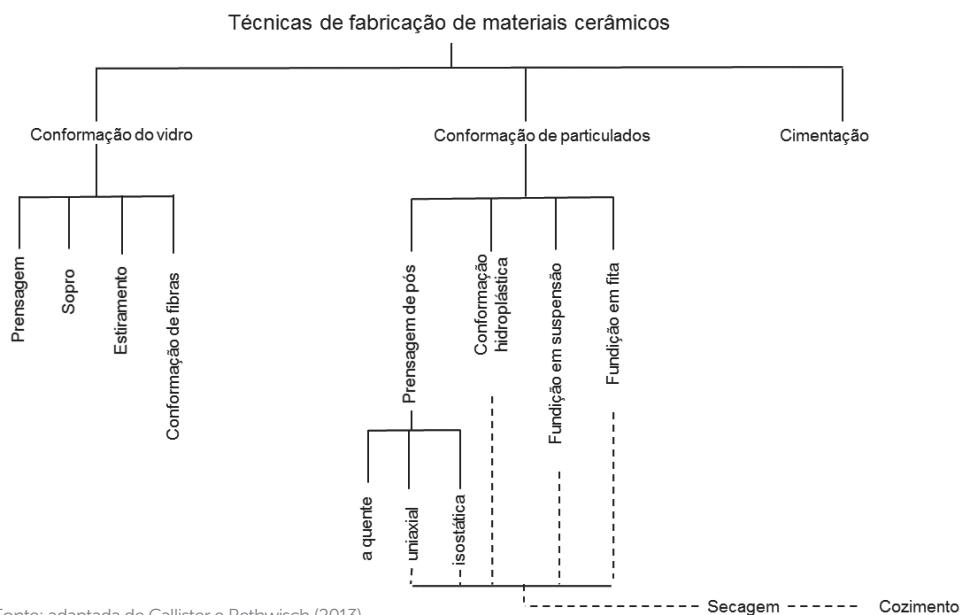


### Exemplificando

O cimento portland é o tipo mais comum de cimento utilizado em todo o mundo, ele é usado como um ingrediente básico de concreto e argamassa, por exemplo.

As cerâmicas avançadas são mais recentes e fabricadas em aplicações específicas. Normalmente, as propriedades ópticas, magnéticas e elétricas são as mais exploradas. Motores de combustão, fibras ópticas e sistemas microeletrônicos são algumas aplicações típicas. Os materiais cerâmicos podem ser processados por diversas técnicas. A Figura 4.15 apresenta um esquema dos principais processos de fabricação desses materiais.

Figura 4.15 | Técnicas de fabricação de cerâmicas

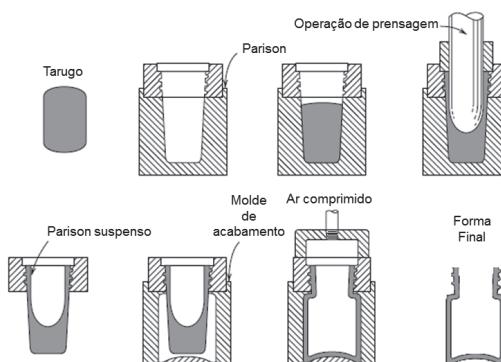


Fonte: adaptada de Callister e Rethwisch (2013).

As cerâmicas apresentam temperaturas de fusão elevadas e exibem um comportamento frágil sob tensão. Como resultado, a fusão convencional, a fundição e rotas de processamento termomecânicos não são técnicas de fabricação adequadas para o processamento de cerâmicas policristalinas. Porém, os vidros inorgânicos apresentam temperaturas de fusão mais baixas em virtude da formação de eutéticos. Assim, a maioria dos produtos cerâmicos é fabricada com base no processamento de pós-cerâmicos. Esse processamento é muito similar ao denominado de

metalurgia do pó, que é empregado na fabricação de peças metálicas. No entanto, há uma consideração na formação de cerâmica que é mais proeminente do que na conformação de metal: a tolerância dimensional. Os vidros, no entanto, são produzidos pelo aquecimento das matérias-primas acima da temperatura de fusão. Diferentes técnicas de fabricação são utilizadas na fabricação dos vidros, por exemplo, objetos de vidro com paredes grossas, como pratos e louças, são produzidos por prensagem, na qual a peça é conformada pela aplicação de pressão em um molde de ferro fundido revestido com grafita (CALLISTER; RETHWISCH, 2013), enquanto que o sopro é utilizado para produzir objetos como jarros, garrafas e ampolas. Neste processo, um tarugo de vidro é submetido a um processo de prensagem em molde temporário (parison), posteriormente, é inserido em um molde de acabamento. A peça é forçada a obter as formas do contorno do molde por causa da pressão criada pela injeção de ar, como mostra a Figura 4.16.

Figura 4.16 | Técnica de prensagem e sopro



Fonte: adaptada de Callister e Rethwisch (2013).

Entre as técnicas utilizadas na fabricação de particulados, destaca-se a conformação hidroplástica e a fundição em suspensão. A conformação hidroplástica mais comum é a extrusão, na qual a massa cerâmica é forçada por meio do orifício de uma matriz que apresenta uma geometria desejada. Na fundição em suspensão, em que se utiliza uma suspensão que é derramada no interior de um molde poroso, a água é absorvida formando uma camada sólida sobre a parede do molde (drenagem) ou uma peça toda preenchida (sólida).



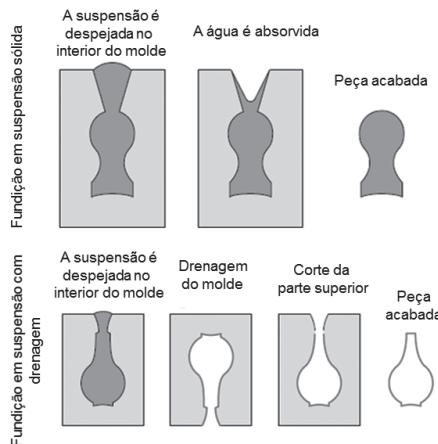
### Pesquise mais

Existem outros processos de fabricação de cerâmica que são muito importantes, como estiramento, conformação de fibras, fundição em fita e cimentação. Aprenda mais sobre isso no livro a seguir:

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

A Figura 4.17 apresenta as etapas da fundição por suspensão.

Figura 4.17 | Etapas da fundição em suspensão sólida e com drenagem



Fonte: adaptada de Callister e Rethwisch (2012).

Uma das técnicas mais populares para produzir formas relativamente simples de produtos cerâmicos em grandes números é uma combinação de compactação e sinterização, denominada como prensagem de pós. Basicamente, esse processo envolve a aplicação de uma pressão igual em todas as direções a uma mistura de pó cerâmico, a fim de aumentar sua densidade. Posteriormente, a peça moldada é submetida ao cozimento, nessa etapa a peça se contrai e reduz a presença de porosidade.

### Sem medo de errar

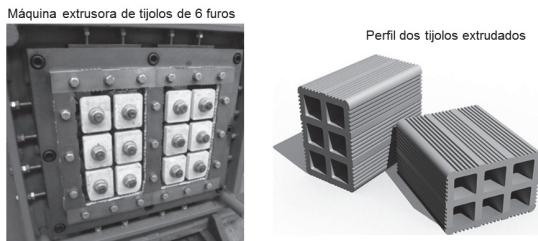
Neste novo trabalho, você se deparou com o proprietário de uma olaria que fabrica exclusivamente tijolos feitos por um processo muito artesanal. No entanto, a cidade cresceu e estão sendo construídos muitos condomínios residenciais, porém a olaria não tem suprido a demanda e, consequentemente, vem perdendo muitos clientes. Os tijolos são feitos basicamente de argila, em forma de paralelepípedo e são submetidos a cozimento de maneira artesanal. Existe uma solução para aumentar a produção da olaria? O correto seria contratar mais funcionários e, assim, aumentar a produção? Existe alguma técnica que poderia aumentar a produção?

Estudando os temas abordados nesta seção você conheceu as diferentes classificações dos materiais cerâmicos em vidros, produtos à base de argila, refratários, abrasivos, cimentos e cerâmicas avançadas. Você compreendeu que as propriedades das cerâmicas estão relacionadas a sua composição química, o que afeta diretamente

o tipo de processamento do material. Os tijolos mais comuns são fabricados a partir de argila moldada em forma de paralelepípedos, que posteriormente são cozidos e expostos ao sol para secar. No entanto, sabemos que os tijolos são massas cerâmicas, portanto, podemos utilizar a conformação hidroplástica como a extrusão na qual a massa é迫使 por meio do orifício de uma matriz, que apresenta uma geometria desejada, como no caso dos tijolos.

A Figura 4.18 apresenta uma máquina extrusora de tijolos de 6 furos e o perfil da peça final.

Figura 4.18 | Extrusora e perfil extrudado (tijolos)



Fonte: elaborada pelo autor.

A compra de uma extrusora de tijolos certamente aumentará a produtividade da oficina, que passará a atender as demandas de mercado. Mas você sabe o quanto rápido são fabricados os tijolos por uma extrusora? Não deixe de acessar o link sugerido a seguir.



### Atenção

Acesse o link a seguir e assista à fabricação de tijolos por extrusão. O vídeo apresenta a massa cerâmica saindo do equipamento já com a geometria escolhida por meio da matriz que fica localizada na extremidade do equipamento, com o corte posterior. Assista!

Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=60yLrWFxFbs>>. Acesso em: 27 jul. 2016.

## Avançando na prática

### Processamento e desempenho dos materiais cerâmicos

#### Descrição da situação-problema

Há anos trabalhando na produção de peças artísticas de vidro, você conheceu um fabricante de vinhos da região que por causa dos custos oferece seus produtos em embalagem plástica. No entanto, em um concurso para pequenos produtores, o vinho

ganhou um importante selo de qualidade e reconhecimento, mas as embalagens plásticas foram muito criticadas, já que desmerecem um vinho de tanta qualidade. Como bom conhecedor de vidros, você convenceu o produtor a fabricar garrafas de vidro (Figura 4.19), mas qual é o processo mais indicado? Todos materiais cerâmicos são classificados como vidros?



### Lembre-se

Os materiais cerâmicos podem ser classificados de acordo com sua composição específica ou com base em suas aplicações. Em relação à composição química, as cerâmicas podem ser classificadas como: óxidos, carbonetos, nitretos, sulfetos e fluoretos.

Figura 4.19 | Garrafas de vidro



Fonte: elaborada pelo autor.

### Resolução da situação-problema

Nem todos os materiais cerâmicos são vidros. Os vidros são definidos principalmente por sua estrutura atômica e são classificados como vidros e vidrocerâmicas. Eles apresentam uma estrutura amorfa, altamente desordenada, enquanto que as vidrocerâmicas são, em sua grande maioria, vidros inorgânicos submetidos a tratamentos térmicos em elevadas temperaturas.



### Faça você mesmo

Faça uma pesquisa sobre as diferentes composições dos vidros e suas propriedades e anotações sobre a mudança das propriedades dos vidros quando adicionamos um óxido a ele.

O sopro é uma técnica de fabricação de garrafas de vidro e peças artísticas, no entanto, para uma escala industrial é impossível fazer a produção de forma artesanal. As

grandes empresas utilizam o processo conhecido como sopro-sopro. Este é iniciado pelo aquecimento de matéria-prima nos fornos, seguido pela produção da gota de vidro que é inserida em um pré-molde de aço. O primeiro sopro de ar comprimido forma quase que completamente o gargalo, e no segundo sopro o vidro chega à forma final. Esse processo é altamente veloz. O link a seguir apresenta a produção industrial de garrafas de vidro, vale a pena saber como muitas das peças que vemos ou utilizamos todos os dias são fabricadas! Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=eRee5zBqLaA>>. Acesso em: 27 jul. 2016.

### Faça valer a pena

**1.** Os materiais cerâmicos são utilizados nas mais diversas aplicações de engenharia em virtude da diversidade das composições básicas e ligações interatômicas, que resultam em diferentes propriedades do material final.

Assinale a alternativa que apresenta exemplos desses materiais classificados com base na composição química:

- a) Vidro, refratários e abrasivos.
- b) Cimentos, cerâmicas avançadas e carbonetos.
- c) Óxidos, carbetos e fluoretos.
- d) Carbonetos à base de sílica e óxidos.
- e) Vidrocerâmicas, nitretos e sulfetos.

**2.** Em geral, os materiais cerâmicos utilizados para aplicações de engenharia podem ser divididos em dois grupos: cerâmicas tradicionais e cerâmicas de engenharia.

Assinale a alternativa que preenche corretamente as lacunas a seguir:

"Normalmente, as cerâmicas tradicionais são feitas de três componentes básicos: \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_ e \_\_\_\_\_".

- a) argila, sílica e ferro.
- b) sílica, feldspato e argila.
- c) tijolo, água e cimento.
- d) carbeto de silício, óxido de alumínio e feldspato.
- e) óxido de alumínio, argila e nitreto de silício.

**3.** Relacione as colunas.

Coluna A	Coluna B
A. Vidros	I. Mantêm-se inertes quando expostos a ambientes severos.
B. Refratários	II. Silicatos não cristalinos com adição de outros óxidos.
C. Abrasivos	III. Areia de sílica é um dos exemplos típicos.
D. Produtos estruturais	IV. A integridade estrutural é a característica mais importante.

- a) A- I; B- II; C- III; D- IV.
- b) A- III; B- II; C- IV; D- I.
- c) A- IV; B- II; C- III; D- I.
- d) A- II; B- III; C- IV; D-I.
- e) A- II; B- I; C- III; D- IV.

# Seção 4.3

## Processamento e desempenho dos materiais poliméricos

### Diálogo aberto

Seja bem-vindo à terceira seção da última unidade de ensino de *Ciência dos Materiais*. Como um dos proprietários da EMIS Consulting você conseguiu ajudar duas grandes empresas. No primeiro momento, a EMIS ajudou a Nintai Automóveis na escolha dos materiais utilizados na fabricação de engrenagens e virabrequins. Você foi capaz de explicar as diferenças entre os aços com diferentes teores de carbono e indicar as principais técnicas de fabricação. Em um segundo momento, a EMIS foi contratada por uma olaria que ainda utilizava os métodos artesanais de fabricação de tijolos e não conseguia atender às construtoras que estavam investindo na construção de condomínios e, assim, perdia muitos clientes. No entanto, graças a EMIS foram estudados diversos métodos de fabricação, chegando à técnica de conformação hidroplástica, com destaque para a extrusão, na qual a massa cerâmica é forçada por meio do orifício de uma matriz que apresenta a geometria desejada. A extrusão é uma técnica que permite a produção em escala e materiais de boa qualidade, por isso, a olaria investiu na compra de uma extrusora para a fabricação de tijolos e, assim, atender à demanda. O trabalho desenvolvido para a olaria foi tão bom que um investidor amigo do fabricante de tijolos contratou a EMIS para auxiliá-lo no projeto de uma fábrica de caixas d'água. O investidor só conhece a fabricação dessas peças utilizando amianto (Figura 4.20). Porém, no estado de São Paulo, é proibida a fabricação de caixas d'água e telhas de amianto desde 2001, pois esse produto é uma substância cancerígena. Mas o amianto é a única alternativa? Que outro material poderia ser utilizado? Neste caso, existe uma técnica de fabricação que associe qualidade e velocidade de produção?

Figura 4.20 | Caixas d'água de amianto



Fonte: elaborada pelo autor.

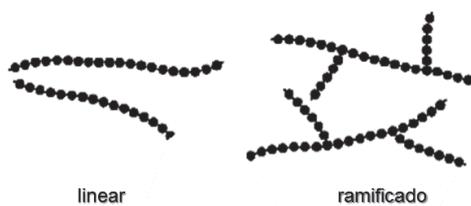
Nesta seção vamos estudar o processamento e desempenho dos materiais poliméricos e compreender as diferenças dos polímeros termoplásticos e termofixos, assim como a diferença das técnicas que são empregadas para a fabricação de cada produto. Ao final desta seção, você estará mais preparado e será capaz de identificar os polímeros e técnicas adequadas na fabricação de caixas d'água.

Vamos ao trabalho!

### Não pode faltar

Os materiais poliméricos são classificados de várias maneiras: pela forma que as moléculas são sintetizadas, pela sua estrutura molecular, ou através da sua família química. Por exemplo, os polímeros lineares consistem em longas cadeias moleculares, enquanto que os polímeros ramificados consistem em pequenos ramos ligados à cadeia principal. No entanto, linear não significa linhas retas. Essas diferenças podem ser notadas na Figura 4.21.

Figura 4.21 | Estruturas poliméricas



Fonte: elaborada pelo autor.

A melhor maneira de classificar os polímeros é de acordo com o seu comportamento mecânico e térmico. Industrialmente, os polímeros são classificados em duas classes principais: plásticos e elastômeros. Os plásticos são resinas orgânicas moldáveis, podem ser de ocorrência natural ou sintética e o método mais comum de fabricação destes é a moldagem. Os plásticos são importantes materiais de engenharia por muitas razões: apresentam uma ampla gama de propriedades e na maioria dos casos, são de custo relativamente baixo. Entre as propriedades dos plásticos, destacam-se: baixa densidade, baixa condutividade térmica e elétrica, boa tenacidade, boa resistência a ácidos, bases e umidade, alta rigidez dielétrica (uso em isolamento elétrico) etc.

Como dito anteriormente, os plásticos também podem ser classificados de acordo com seu comportamento mecânico e térmico em termoplásticos (polímeros termoplásticos) e termofixos (polímeros termofixos).



## Assimile

A baquelite, por exemplo, é um polímero termofixo utilizado na fabricação de peças de automóveis, cabos de panela, entre outros. Lembrando que termofixo, termorrígido e termoendurecível são sinônimos.

Os termoplásticos amolecem quando aquecidos e endurecem quando resfriados e esses processos são totalmente reversíveis e podem ser repetidos, isto é, reciclados. Esses materiais são normalmente fabricados pela aplicação simultânea de calor e pressão. Os termoplásticos são polímeros lineares sem qualquer ligação cruzada na estrutura, no qual longas cadeias moleculares estão ligadas umas às outras por ligações secundárias e têm a propriedade de aumentar a plasticidade com o aumento da temperatura, que rompe as ligações secundárias entre cadeias moleculares. Os termoplásticos mais comuns são: acrílicos, cloreto de polivinila (PVC), nylon, polipropileno, poliestireno, polimetilmetacrilato (PMMA). Já os termorrígidos requerem calor e pressão para moldá-los. Eles são produzidos em uma forma permanente e curados ou “ativados” por meio de reações químicas, como a reticulação. Os termorrígidos não podem ser refundidos ou reformados em outra forma, isto é, não podem ser reciclados, uma vez que foram moldados e quando são novamente submetidos a elevadas temperaturas esses polímeros se decompõem. O polímero termoendurecível implica que o calor é necessário para definir a forma do plástico permanentemente. A maioria dos termoendurecíveis são compostos de longas cadeias que são fortemente reticuladas (e/ou ligada de forma covalente) umas às outras para formar estruturas de rede 3-D, um sólido rígido (Figura 4.22).

Figura 4.22 | Estrutura polimérica reticulada típica de um termofixo



Fonte: elaborada pelo autor.

Em sua grande maioria, os termofixos são mais duros (elevada resistência mecânica) e mais frágeis, quando comparados aos termoplásticos. Outras vantagens desses polímeros incluem: elevada estabilidade térmica, dimensional, baixa densidade, boas propriedades de isolamento elétrico e térmico, resistência à deformação e deformação sob carga.



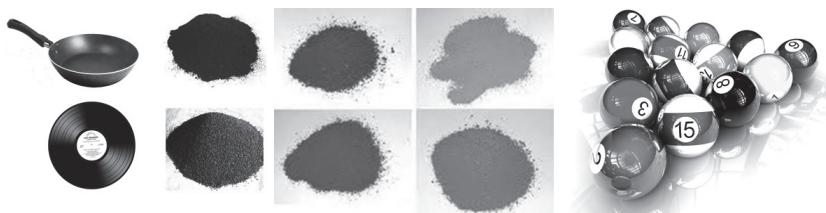
## Exemplificando

É engraçado como, muitas vezes, não associamos que as propriedades dos materiais sempre são utilizadas para o nosso conforto. Você alguma

vez se queimou em uma panela segurando-a pelo cabo de baquelite? Certamente não, pois uma das propriedades da baquelite é não ser condutora térmica ou elétrica.

A Figura 4.23 apresenta a baquelite em pó (antes de ser moldada) e peças desse termofixo.

Figura 4.23 | Baquelites coloridas e peças moldadas



Fonte: elaborada pelo autor.

Existem dois métodos pelos quais as reações de reticulação podem ser iniciadas: a ligação cruzada, também denominada *crosslinking*, pode ser obtida por aquecimento da resina em um molde apropriado (por exemplo, a baquelite). No segundo método, as resinas, como a epóxi, são curadas em baixa temperatura pela adição de um agente de ligação cruzada, por exemplo, uma amina. Epóxides, borrachas vulcanizadas, fenólicos, resinas de poliéster insaturadas, resinas de amino (ureias e melaminas) são exemplos de termofixos. Outro tipo de polímero são os elastômeros, popularmente conhecidos como borrachas. Eles são polímeros que, em temperatura ambiente, suportam grandes alongamentos sob carga e retornam à condição original quando a carga é liberada. O processamento dos polímeros envolve a preparação e síntese de matérias-primas em substâncias menores por meio da polimerização. As matérias-primas para a polimerização são geralmente derivadas de carvão e de produtos petrolíferos. As propriedades dos polímeros podem ser melhoradas ou modificadas com a utilização de aditivos.



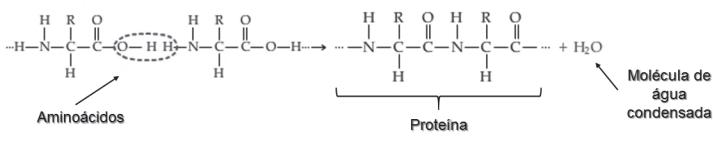
### Refletá

A utilização de aditivos para a melhoria ou modificação de propriedades dos polímeros não lhe parece com uma situação que já conhecemos, como a adição de elementos de ligas em metais?

A polimerização dessas macromoléculas pode acontecer por adição e condensação. Na polimerização por adição, as unidades dos monômeros são ligadas uma de cada vez, encadeando-se para formar uma macromolécula linear. Esse tipo de polimerização envolve três fases distintas: iniciação, propagação e terminação. Já a polimerização por condensação, também conhecida como policondensação, geralmente envolve mais do que uma espécie de monômero e normalmente existe um subproduto que é eliminado, isto é, condensado, um exemplo comum de subproduto é a condensação

da água. As proteínas, por exemplo, são polímeros de condensação feitos a partir de monômeros de aminoácidos, enquanto que os carboidratos são um exemplo de polímero de condensação obtidos a partir de monômeros de açúcares, como a glicose. A Figura 4.24 apresenta a formação da proteína a partir da reação de condensação entre os aminoácidos.

Figura 4.24 | Reação de polimerização por condensação



$\text{R} = \text{H}, \text{CH}_3$ , ou outros grupos de átomos

Fonte: elaborada pelo autor.

O tempo das reações de polimerização por condensação é maior quando comparado ao das reações de polimerização por adição. Os fenóis-formaldeídos, nylons e policarbonatos são exemplos de polímeros produzidos por condensação. As reações de polimerização também ocorrem na técnica sol-gel utilizada no processamento de materiais cerâmicos.



### Pesquise mais

Quer saber mais sobre o processo sol-gel? A dissertação de mestrado a seguir aborda técnica de processamento com mais detalhes:

SIMÊNCIO, Éder Cícero Adão. **Preparação e caracterização de filmes finos sol-gel de  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ : Zr.** 2009. 66 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais)-Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/88/88131/tde-01092009-113406/pt-br.php>>. Acesso em: 31 ago. 2016.

A maioria das propriedades dos polímeros são características intrínsecas, isto é, de um polímero específico. As substâncias denominadas como aditivos são introduzidas para melhorar ou modificar as propriedades dos polímeros. Esses aditivos incluem cargas, plastificantes, estabilizadores, corantes e retardantes de chama (CALLISTER; RETHWISCH, 2012). As cargas são usadas para melhorar a resistência à tração e à compressão, à abrasão, à tenacidade e à estabilidade dimensional e térmica (*Ibid*). Pó de madeira, areia, argila, talco, entre outros são alguns exemplos desses aditivos. Já os aditivos plastificantes são utilizados quando o objetivo é melhorar a flexibilidade, ductilidade e a tenacidade dos polímeros, diminuindo a temperatura de transição vítreia

do polímero. Os aditivos plastificantes são, geralmente, líquidos de baixo peso molecular e utilizados em polímeros que são frágeis a uma temperatura ambiente, o que melhora a tenacidade, ductilidade e flexibilidade e, consequentemente, diminui a dureza e rigidez. Os estabilizadores são outro tipo de aditivo polimérico que neutraliza os processos de deterioração como a oxidação e radiação. Os corantes são os responsáveis por dar uma cor específica a um polímero. Esses corantes são adicionados na forma de pigmentos, que permanecem como uma fase distinta ou tintas (matiz) que se dissolvem no polímero. A Figura 4.25 apresenta diversos produtos fabricados a partir de polímeros com a adição de corantes.

Figura 4.25 | Peças de materiais poliméricos com adição de corantes



Fonte: elaborada pelo autor.

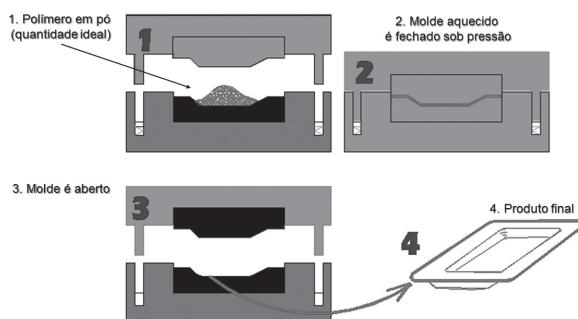
Por fim, os aditivos retardantes de chama são usados para aumentar a resistência ao fogo dos polímeros combustíveis, já que a maioria dos materiais poliméricos é inflamável na forma pura. Esses aditivos interferem no processo de combustão por meio da fase gasosa ou pela iniciação de uma reação de combustão que gera menos calor (CALLISTER; RETHWISCH, 2013). Os materiais poliméricos podem ser processados por diversas técnicas que serão determinadas com base em alguns fatores, como a natureza do material (ser termoplástico ou termorrígido), a temperatura de fusão (para os termoplásticos) e degradação (para os termorrígidos). A estabilidade do polímero sob conformação é fabricado por diversas técnicas diferentes, a escolha do processamento correto dependerá de alguns fatores, como: o material é termoplástico ou termoendurecível, temperatura de fusão/degradação, estabilidade atmosférica quando está sendo conformado e as dimensões, forma e complexidade do produto acabado.

Os polímeros são frequentemente conformados a temperaturas elevadas e sob pressão, enquanto os termoplásticos são conformados acima da temperatura de transição vítreia, quando amorfos, ou acima da temperatura de fusão, quando semicristalinos. Os termofixos são conformados em duas etapas, na primeira, prepara-se um polímero líquido de baixa massa molecular que, posteriormente, é curado, isso pode ocorrer pelo aquecimento ou pela adição de catalisadores, posteriormente termofixo é submetido a pressão, moldando-o.

Entre os diversos processos de fabricação dos materiais poliméricos, destaca-se a moldagem e, entre as técnicas de moldagem, a compressão, a transferência, o sopro, a injeção e a extrusão. A moldagem por compressão envolve uma quantidade apropriada

com um pequeno excesso do polímero e de aditivos que são colocados entre as partes "macho" e "fêmea" do molde já aquecidas. O molde é fechado e o calor e a pressão são aplicados, tornando o polímero viscoso e, consequentemente, preenchendo o molde. O produto final é obtido com uma possível pequena rebarba de material. A Figura 4.26 apresenta um esquema de um equipamento de compressão.

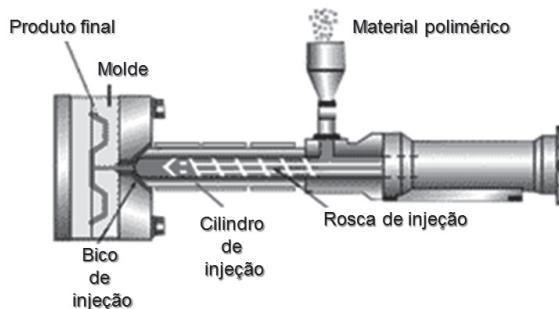
Figura 4.26 | Moldagem por compressão



Fonte: adaptada de <<http://paws.wcu.edu/ballaaron/www/met366/modules/module5/imageJPS.JPG>>. Acesso em: 1 ago. 2016.

A moldagem por transferência, outra técnica de fabricação de materiais poliméricos, difere da moldagem por compressão na forma como os materiais são introduzidos na cavidade do molde, já que o polímero é, primeiramente, fundido em uma câmara de transferência aquecida e externa às cavidades do molde no qual será introduzido. Quando o molde está fechado, um êmbolo força o material para o interior das cavidades do molde, no qual o material é curado e moldado. Outro método de fabricação é a moldagem por injeção, amplamente utilizado na fabricação de termoplásticos no qual a quantidade correta do material peletizado é alimentada por uma moega de carregamento para o interior de um cilindro, pelo movimento de um êmbolo ou pistão (CALLISTER, RETHWISCH, 2013), conforme o apresentado na Figura 4.27.

Figura 4.27 | Esquema de um equipamento de moldagem por injeção



Fonte: <<http://goo.gl/vDOwCD>>. Acesso em: 1 ago. 2016.



## Pesquise mais

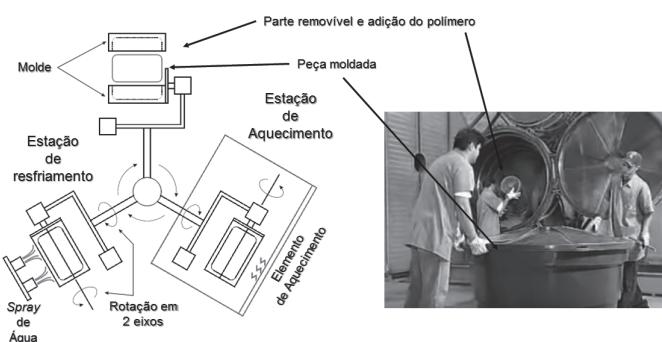
Existem outros processos de fabricação polimérica, como: moldagem por sopro, extrusão, termoformagem, calandragem, rotomoldagem e fundição.

## Sem medo de errar

Neste momento, a EMIS foi contratada por um investidor que pretende abrir uma fábrica que produz caixas d'água. No entanto, esse investidor só conhece a fabricação dessas peças utilizando amianto. Mas essa substância é a única alternativa? Qual outro material poderia ser utilizado? Neste caso, existe uma técnica de fabricação que associe qualidade e velocidade de produção?

Nos estudos desta seção você aprendeu um pouco mais sobre as diferenças entre os polímeros termoplásticos e termorrígidos. Vimos que a escolha do processo de fabricação depende das características e propriedades dos materiais poliméricos. A técnica de moldagem por compressão pode ser utilizada tanto na fabricação de termoplásticos quanto termorrígidos, a moldagem por transferência é a mais indicada para polímeros termofixos e peças complexas. Já a moldagem por injeção é a mais frequente na fabricação de termoplásticos, no entanto, os termorrígidos também podem ser processados dessa maneira. A cura ocorre enquanto o material está sob pressão em um molde aquecido, o que resulta em ciclos mais demorados. Na fabricação de caixas d'água é utilizado o polietileno de alta densidade (PEAD), que é um material termoplástico, e a técnica mais adequada de fabricação é a rotomoldagem. Essa técnica envolve um molde oco aquecido que é preenchido pela quantidade exata de material polimérico, em seguida, este é lentamente rotacionado (geralmente em torno de dois eixos perpendiculares), o material amolecido é dispersado e adere às paredes do molde. A fim de manter a mesma espessura em toda a parte, o molde continua a rotacionar em todos os momentos durante as fases de aquecimento e resfriamento para evitar a deformação do produto final. A Figura 4.28 apresenta um esquemático e uma imagem real desse processo.

Figura 4.28 | Rotomoldagem: fabricação de caixas d'água



Fonte: elaborada pelo autor.



## Atenção

Aprenda mais sobre a fabricação de caixas d'água assistindo ao vídeo disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=Yjl3CuWiSA>>. Acesso em: 1 ago. 2016.

## Avançando na prática

### Processamento e desempenho dos materiais poliméricos

#### Descrição da situação-problema

Após a implementação da fábrica de caixas d'água, o investidor percebeu que a empresa possuía capital para investir também em outros materiais e se interessou na fabricação de outros produtos. Chegando em sua casa teve um insight, por que não investir em uma linha de produtos com pouca concorrência de mercado e peças exclusivas, como na fabricação de banheiras de hidromassagem (Figura 4.29)? Mas seria possível fabricá-las utilizando os mesmos equipamentos das caixas d'água de PEAD? Em caso negativo, qual seria o processo e o tipo de polímero indicado para essa fabricação?



## Lembre-se

A escolha da técnica de fabricação deve ser alicerçada no tipo de material que é utilizado, como: termoplástico, termorrígido ou elastômero.

Figura 4.29 | Banheiras de hidromassagem

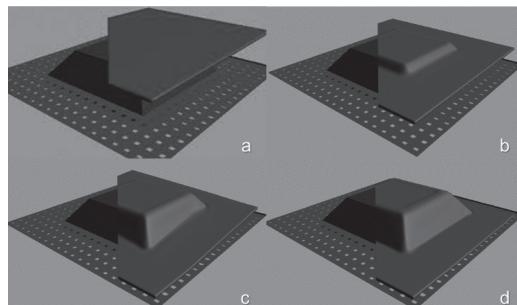


Fonte: elaborada pelo autor.

#### Resolução da situação-problema

Apesar da empolgação da estrutura utilizada para a fabricação de caixas d'água, esta não é indicada para a produção de banheiras de hidromassagem. Neste caso, indica-se a termoforagem a vácuo, técnica na qual uma placa plana de material termoplástico previamente extrudada é aquecida (Figura 4.30a) e amolece sobre a superfície de um molde (Figura 4.30b) (macho ou fêmea), por fim, o ar é sugado, fazendo com que a placa do material amolecida adquira a forma do molde, como apresentado na Figura 4.30.

Figura 4.30 | Termoformagem a vácuo



Fonte: elaborada pelo autor.



### Faça você mesmo

Acesse o link a seguir, ele apresenta a fabricação de banheiras por meio do processo de termoformagem a vácuo. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=of2RZ3azpxg>>. Acesso em: 1 ago. 2016.

### Faça valer a pena

1. Os materiais poliméricos são classificados de várias maneiras: pela forma que as moléculas são sintetizadas, pela sua estrutura molecular ou através da sua família química.

Observe atentamente a figura a seguir:



Assinale a alternativa que apresenta a designação correta da cadeia polimérica:

- Estrutura polimérica ramificada.
- Estrutura polimérica linear.
- Estrutura polimérica bilinear.
- Estrutura polimérica reticulada.
- Estrutura polimérica diramificada.

**2.** "A melhor maneira de classificar os polímeros é de acordo com o seu comportamento \_\_\_\_\_ e \_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_, os polímeros são classificados em duas classes principais: plásticos e \_\_\_\_\_".

Assinale a alternativa que preenche corretamente as lacunas:

- a) químico, mecânico, termicamente e borrachas.
- b) físico, mecânico, quimicamente e termoplásticos.
- c) mecânico, térmico, industrialmente e elastômeros.
- d) frágil, duro, mecanicamente e termofixos.
- e) geométrico, espacial, fisicamente e baquelites.

**3.** Os termoplásticos e termorrígidos são exemplos de classificações dos materiais plásticos.

Analise as afirmações a seguir como verdadeiras (V) ou falsas (F).

- I. Os materiais termoplásticos são polímeros lineares sem qualquer ligação cruzada na estrutura.
- II. A maioria dos termoendurecíveis são compostos por longas cadeias fortemente ramificadas.
- III. Borrachas vulcanizadas, fenólicos, resinas de poliéster insaturadas, resinas de amino são exemplos de termofixos.

Assinale a alternativa que apresenta a sequência correta.

- a) V; V; F.
- b) V; F; V.
- c) F; V; F.
- d) F; F; V.
- e) V; V; V.



# Seção 4.4

## Processamento e desempenho dos materiais compósitos

### Diálogo aberto

Aluno, seja bem-vindo a nossa última seção e ao último conteúdo que vamos abordar na disciplina de *Ciência dos Materiais*.

Nesta unidade, já estudamos o processamento e desempenho dos metálicos, cerâmicos e poliméricos. Aprendemos que os metais e suas ligas são frequentemente agrupados em duas classes: os metais ferrosos e os não ferrosos. Essa classificação se baseia principalmente na composição química desses materiais, o processamento mais adequado será definido com base nas propriedades, dimensão e forma acabada do produto final, assim como o custo de produção. Em uma segunda etapa, estudamos as classificações dos materiais cerâmicos e compreendemos que eles podem ser divididos em dois grupos: cerâmicas tradicionais e cerâmicas de engenharia. As cerâmicas tradicionais são feitas de três componentes básicos: argila, sílica e feldspato, enquanto que as cerâmicas de engenharia são formadas por compostos altamente puros de óxidos, carbonetos e nitreto. Os materiais cerâmicos podem ser processados por diversas técnicas, como prensagem, sopro, estiramento, conformação de fibras, prensagem de pó, conformação hidroplástica, entre outras. Posteriormente, estudamos os polímeros que são frequentemente conformados a temperaturas elevadas e sob pressão, vimos que os termoplásticos são conformados acima da temperatura de transição vítrea, quando amorfos, ou acima da temperatura de fusão, quando semicristalinos. Já os termofixos são conformados em duas etapas, na primeira, prepara-se um polímero líquido de baixa massa molecular que, posteriormente, é curado. Nesta última seção vamos finalizar nossos estudos sobre a ciência dos materiais conhecendo as diferentes técnicas de processamento dos materiais compósitos, que são fabricados com base na combinação das propriedades de diferentes materiais.

Vamos ao nosso último desafio:

Uma empresa que trabalha com laminação de chapas de aço abriu uma filial para a produção de compósitos avançados para a indústria aeronáutica. Mas quais são os processos de fabricação de compósitos? Existe algum método semelhante à laminação de metais?

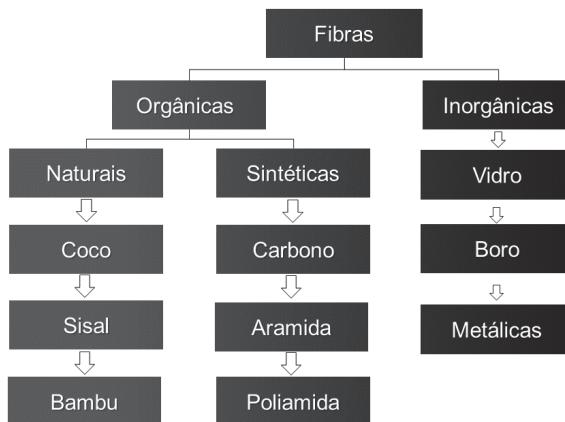
A EMIS foi contratada para analisar e sugerir os possíveis processos de fabricação e identificar seus aspectos específicos.

Nesta unidade, vamos conhecer alguns processos de fabricação de compósitos e suas peculiaridades. Ao final deste estudo, você será capaz de selecionar o material adequado e o melhor processamento para uma determinada aplicação. Assim, fecharemos nossos estudos introdutórios sobre a *Ciência dos Materiais*.

### Não pode faltar

Os materiais compósitos são típicos do consumo da indústria de tecnologias avançadas, como a aeronáutica, automóveis, barcos, peças de esportes e dispositivos médicos. Como vimos anteriormente, a função da matriz nesses materiais é dar forma à parte composta, proteger os reforços do meio ambiente e permitir a transferência de cargas para o reforço e tenacidade do material, juntamente com o reforço. Já os reforços são utilizados para obter rigidez, condutividade térmica, entre outros. Estes materiais, quando comparados aos metais, apresentam algumas vantagens, como: menor peso, moldáveis em formas complexas, baixa condutividade térmica, expansão térmica e boa resistência à fadiga. Porém, esses materiais também apresentam desvantagens, como o custo dos materiais, um longo tempo de preparação, danos invisíveis ou imperceptíveis. Desta forma, podemos usar os diferentes tipos de fibras, como apresentado na Figura 4.31.

Figura 4.31 | Tipos de fibras utilizadas na fabricação de compósitos



Fonte: elaborada pelo autor.

Os compósitos estruturais mais avançados utilizam-se se de fibra de vidro, carbono/grafite, boro, Kevlar® e outros materiais orgânicos, resultando em materiais leves e que ao mesmo tempo apresentam elevada resistência e dureza.

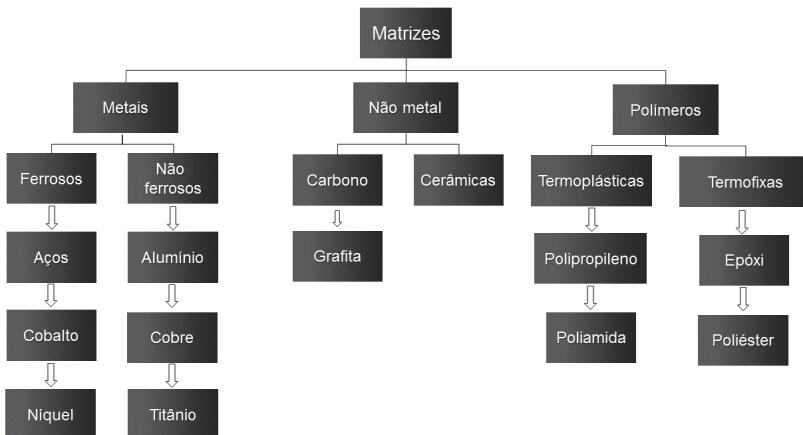


## Assimile

Kevlar® é uma marca registrada da DuPont que fabrica fibras sintéticas muito resistentes e leves.

Além dos diferentes tipos de fibras, na fabricação de um material compósito vários materiais, como polímeros, metais e não metais podem ser utilizados como matrizes. A Figura 4.32 apresenta um esquemático com alguns exemplos de materiais que são utilizados como matriz de um compósito.

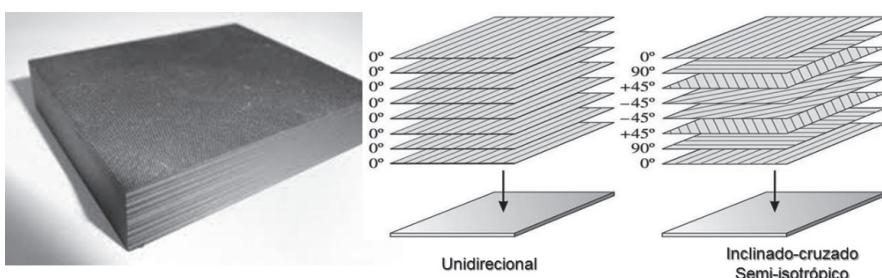
Figura 4.32 | Exemplos de matrizes utilizadas na fabricação de compósitos



Fonte: elaborada pelo autor.

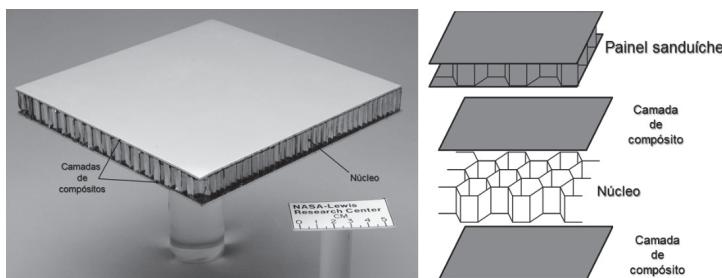
Os materiais compósitos podem ser classificados em duas categorias de acordo com a construção do material: laminados, que têm camadas ligadas em conjunto com orientações específicas da disposição das fibras (Figura 4.33) e painéis sanduíche que são materiais estruturais de múltiplas camadas contendo um núcleo de baixa densidade entre camadas finas de materiais compósitos como mostra a Figura 4.34.

Figura 4.33 | Compósitos laminados



Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 4.34 | Painéis sanduíche



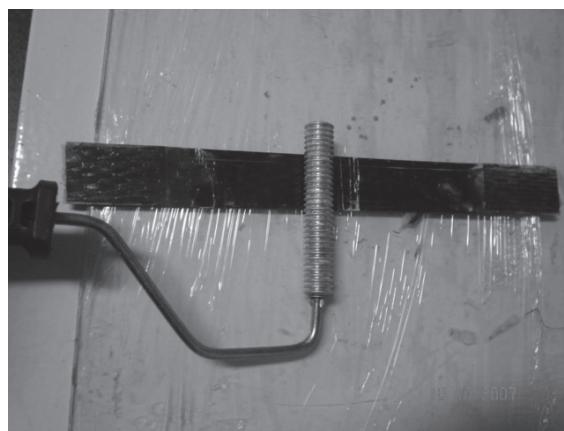
Fonte: elaborada pelo autor.

Alguns dos métodos mais comuns de fabricação de compósitos são: laminação manual e automática (*hand lay-up* e *automatized lay-up*), *spray up*, enrolamento filamentar (*filament winding*), modelagem por transferência de resina (*resin transfer molding*) e pultrusão.

Na laminação manual ou *hand lay-up* deve-se cortar o material de reforço do tamanho adequado e colocar as fibras dispostas como tecidos ou mantas. As peças cortadas são molhadas e impregnadas no material da matriz e são colocadas sobre a superfície de um molde aberto que é coberta com um gel-coat. A acomodação da manta impregnada é realizada com o auxílio de um rolete, garantindo a distribuição uniforme da matriz e a remoção de ar retido. Terminada essa etapa, o compósito é deixado em repouso até a completa secagem da matriz. O tempo de espera para secagem irá variar de acordo com a espessura do compósito fabricado, quanto maior a quantidade de camadas mais tempo para secagem.

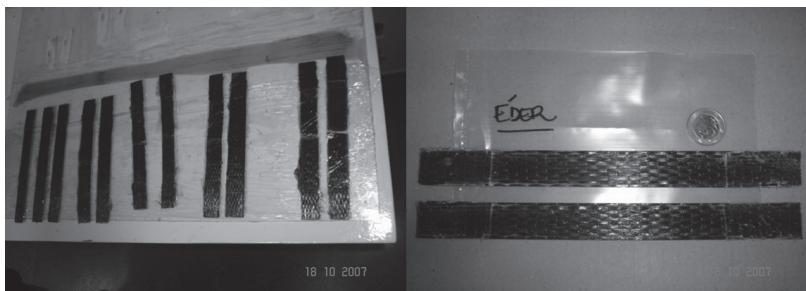
As Figuras 4.35 e 4.36 apresentam algumas dessas etapas da laminação manual para um corpo de prova utilizando uma manta de fibras de carbono.

Figura 4.35 | Laminação manual (distribuição da resina polimérica e remoção de ar retido)



Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 4.36 | Laminação manual (secagem e compósito final)



Fonte: elaborada pelo autor.



### Pesquise mais

O artigo a seguir apresenta um trabalho que aborda as principais implicações do processo de moldagem e acabamento em plástico reforçado com fibra de vidro (PRFV) no impacto ambiental e ao mesmo tempo na saúde do trabalhador.

ORTH, C. M.; BALDIN, N.; ZANOTELLI, C. T. Implicações do processo de fabricação do compósito plástico reforçado com fibra de vidro sobre o meio ambiente e a saúde do trabalhador: o caso da indústria automobilística. **Revista Produção Online**, Florianópolis, v. 12, n. 2, p. 537-556, abr./jun. 2012. Disponível em: <<https://www.producaoonline.org.br/rpo/article/download/943/918>>. Acesso em: 1 ago. 2016.

A produtividade da laminação manual pode ser automatizada usando máquinas CNC (Comando Numérico Computadorizado). Essas máquinas são utilizadas tanto para a pré-impregnação das fibras quanto das mantas, e normalmente a indústria aeroespacial faz uso dela. Na técnica de *spray up* a resina é pulverizada sobre a superfície e preparada do molde por uma pistola especialmente projetada.

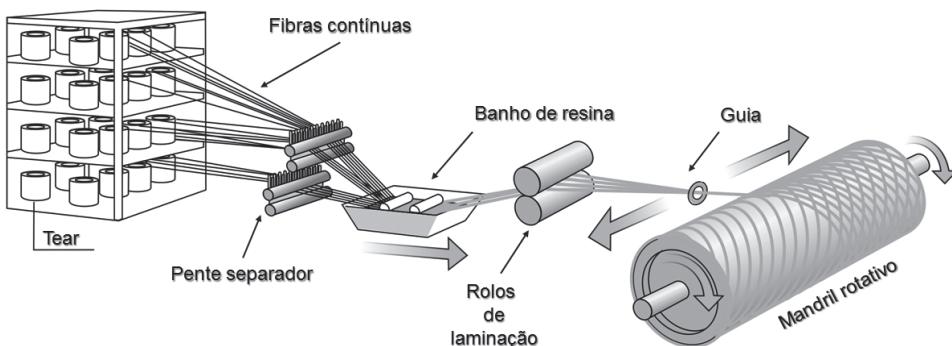


### Pesquise mais

O vídeo disponível em <[https://www.youtube.com/watch?v=ZotUR\\_GiVK8](https://www.youtube.com/watch?v=ZotUR_GiVK8)> (acesso em: 2 ago. 2016.) apresenta o processo de laminação manual e de *spray up*.

A técnica conhecida como enrolamento filamentar ou *filament winding* consiste no enrolamento de fibras contínuas impregnadas de resina em torno de um cilindro, mandril ou do perfil que se deseja (Figura 4.37). Assim, após a remoção do molde (cilindro), tem-se como resultado uma forma oca. As aplicações mais comuns para essas técnicas são as fabricações de tubulação, tubos, vasos de pressão, tanques, entre outras.

Figura 4.37 | Enrolamento filamentar



Fonte: adaptada de <<http://goo.gl/6Xjg52>>. Acesso em: 2 ago. 2016.

O enrolamento filamentar normalmente é aplicado utilizando-se um aro ou enrolamento helicoidal. A cada rotação do mandril o material avança apoiado em um carro que percorre de uma extremidade a outra do mandril. Os mandris de enrolamento filamentar podem ser metálicos ou não metálicos e são fabricados de forma a facilitar a remoção da peça produzida ao terminar a distribuição da fibra impregnada de resina.

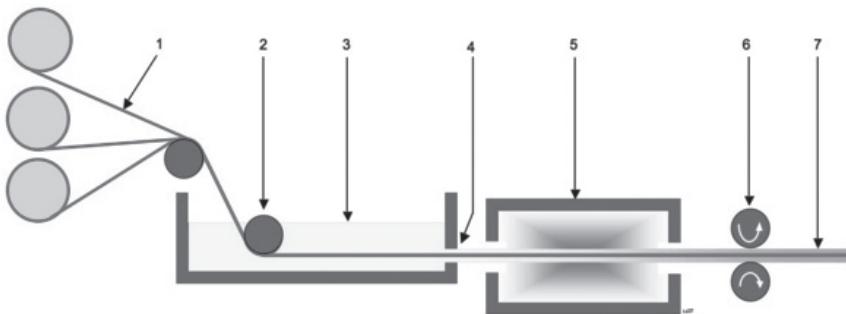


### Refletá

A velocidade de rotação do mandril pode ser controlada de acordo com o material a ser produzido, mas é adequado operar em baixas velocidades? Para auxiliar você nessa questão, não deixe de acessar o vídeo disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=4ihtyjydqA>>. Acesso em: 2 ago. 2016.

A pultrusão é um processo de laminação contínuo utilizado principalmente para produção de longos perfis lineares de seção transversal constante. Essa técnica de fabricação é muito semelhante à extrusão, exceto pelo fato de que o material compósito deve ser puxado ao invés de ser empurrado por meio de uma matriz, como acontece na extrusão. Na pultrusão as fibras contínuas são impregnadas pela matriz, em seguida, moldados e curados por um molde pré-aquecido ou um conjunto de fieiras. Uma vez curado, o material é cortado. Algumas das aplicações típicas dessa técnica é a fabricação de tubulação, tubos, escada e degraus, entre outros. A Figura 4.38 apresenta um esquemático da pultrusão.

Figura 4.38 | Processo de pultrusão

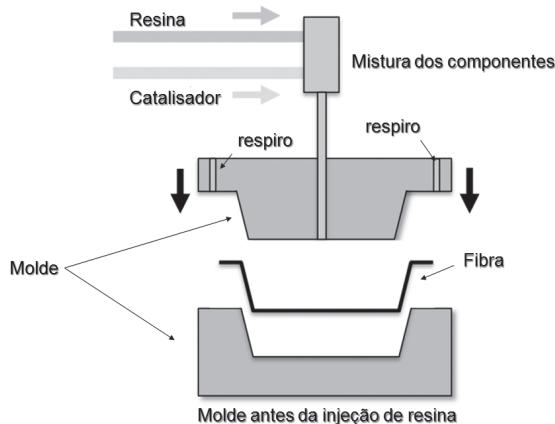


1- Fibras contínuas/tapete de fibra tecida; 2- Rolete de tração; 3- Banho de resina; 4- Fibra embebida de resina; 5- Matriz e fonte de calor; 6- Rolos de laminiação; 7- Polímero reforçado com fibras.

Fonte: adaptada de <[https://en.wikipedia.org/wiki/Pultrusion#/media/File:Pultrusion\\_process\\_01.png](https://en.wikipedia.org/wiki/Pultrusion#/media/File:Pultrusion_process_01.png)>. Acesso em: 2 ago. 2016.

A moldagem por transferência de resina ou RTM (*resin transfer molding*) é utilizada na fabricação de itens complexos e com grandes dimensões, como banheiras, armários, peças de aeronaves e componentes automotivos. A Figura 4.39 apresenta uma representação da RTM momentos antes da fibra receber a injeção de resina.

Figura 4.39 | Moldagem por transferência de resina



Fonte: adaptada de <<http://goo.gl/52rvOg>>. Acesso em: 2 ago. 2016.

Nesse processo de fabricação, um conjunto de metades de molde são carregados com o material de reforço e, em seguida, fechados em conjunto. A resina é então injetada sob pressão na cavidade do molde fechado contendo a manta de fibras. O molde preenchido de resina é curado e após essa etapa as metades do molde são separadas e a peça é removida para corte ou acabamento final.

## Sem medo de errar

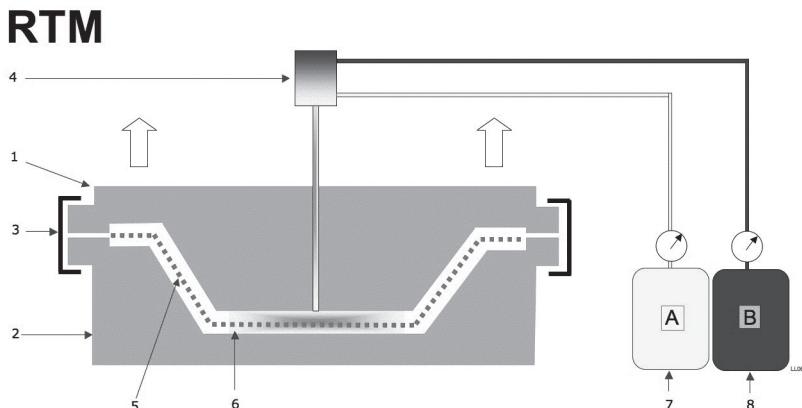
Chegamos a nossa última seção de *Ciência dos Materiais*. O último desafio proposto foi auxiliar uma empresa que trabalha com laminação de chapas de aço e que pretende iniciar a fabricação de compósitos avançados para a indústria aeronáutica. Mas quais são os processos de fabricação de compósitos? Existe algum método semelhante à lamination de metais? A EMIS foi contratada para analisar e sugerir os possíveis processos de fabricação e identificar seus aspectos específicos.

Nos estudos desta unidade conhecemos diferentes processos, como a lamination manual ou *hand lay-up*, a lamination automatizada ou *automatized lay-up, spray up*, enrolamento filamentar (*filament winding*), modelagem por transferência de resina (*resin transfer molding*) e pultrusão. Vimos que:

Na técnica *hand lay-up* o material de reforço é cortado com a dimensão adequada, posteriormente, é “molhada” pela matriz e, por fim, são colocadas sobre a superfície de um molde aberto, que é coberta com um gel-coat até a secagem da resina.

Já a técnica denominada *filament winding* é o enrolamento de fibras contínuas impregnadas de resina em torno de um mandril. A pultrusão é um processo de lamination contínuo muito semelhante à extrusão, exceto pelo fato de que o material compósito deve ser puxado ao invés de ser empurrado por uma matriz, como acontece na extrusão. Por fim, a RTM consiste em um conjunto de metades de moldes que são preenchidos com o material de reforço, fechados em conjunto e, posteriormente, é injetada a resina e o molde é curado. A Figura 4.40 apresenta um esquemático do processo RTM.

Figura 4.40 | Moldagem por Transferência de resina (RTM)



1- Molde superior; 2- Molde inferior; 3- Trava de fechamento; 4- Cabeça de mistura; 5- Fibra pré-moldada; 6- Aquecimento do molde; 7- Resina; 8- Catalisador.

Fonte: adaptada de <[https://en.wikipedia.org/wiki/Transfer\\_molding#/media/File:RTM\\_process.png](https://en.wikipedia.org/wiki/Transfer_molding#/media/File:RTM_process.png)>. Acesso em: 2 ago. 2016.



## Atenção

As técnicas de fabricação de compósitos dependem do tipo de material e propriedades que se pretende produzir.

## Avançando na prática

### Processamento e desempenho dos materiais compósitos

#### Descrição da situação-problema

A EMIS foi contratada tempos atrás por um investidor que tinha interesse em parar a produção de caixas d'água com amianto para fabricar as que são de produtos poliméricos. A solução para esse caso foi a técnica de rotomoldagem e logo nosso amigo deixa claro que uma das técnicas na fabricação de banheiras é a termoformagem, no entanto, essa será a única técnica? Qual outra técnica pode possibilitar a fabricação de banheiras?



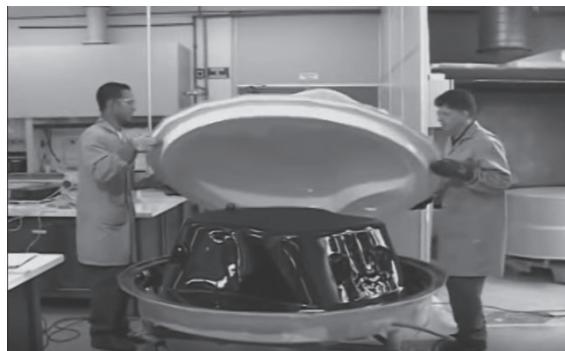
## Lembre-se

No processo de fabricação de banheiras por termoformagem a vácuo, o material utilizado era um polímero. Agora estamos tratando de um compósito.

#### Resolução da situação-problema

Entre os métodos que estudamos ao longo desta seção, a melhor alternativa para fabricar uma banheira com material compósito é a técnica de *spray up*. Nesta, a resina é pulverizada sobre a superfície preparada do molde por uma pistola especialmente projetada. No vídeo disponível em <<https://www.youtube.com/watch?v=wZDpsTBdwgs>> (acesso em: 2 ago. 2016) podemos ver a fabricação de uma banheira (Figura 4.41) utilizando a técnica de *spray up*.

Figura 4.41 | Banheira fabricada pela técnica de *spray up*



Fonte: <<https://www.youtube.com/watch?v=wZDpsTBdwgs>>. Acesso em: 2 ago. 2016.



### Faça você mesmo

Faça uma pesquisa de produtos compósitos fabricados pelos processos de moldagem por transferência de resina e por pultrusão.

### Faça valer a pena

**1.** Os materiais compósitos são tipicamente consumidos pelas indústrias de tecnologias avançadas, como a aeronáutica, automóveis, barcos, peças de esportes e dispositivos médicos.

"Os materiais compósitos podem ser definidos como um material composto pela \_\_\_\_\_ de dois ou mais materiais, sendo que um é um elemento de \_\_\_\_\_ e o outro um \_\_\_\_\_ de resina compatível para se obter características e propriedades específicas".

- a) Combinação, reforço e ligante.
- b) Propriedade, soluto e solvente.
- c) Propriedade, soluto e impurezas.
- d) Combinação, liga e reforço.
- e) Combinação, solvente e reforço.

**2.** Sobre uma das funções da resina na composição de um compósito, é correto somente o que se afirma em:

- a) Proteger os reforços do meio ambiente.
- b) Reter cargas na própria matriz.
- c) Conferir rigidez ao compósito.
- d) Promover a condutividade térmica.
- e) Propiciar elevada resistência mecânica.

**3.** Os materiais compósitos são utilizados na substituição de vários outros materiais.

Comparados aos materiais metálicos, analise as afirmações a respeito das vantagens do material compósito:

- I. Apresentam baixa condutividade térmica.
- II. São resistentes à fadiga.
- III. Fabricação de baixo custo.

IV. Os danos na superfície são imperceptíveis.

Assinale a alternativa que apresenta as afirmações corretas em relação à vantagem dos compósitos:

- a) I, II, III e IV.
- b) I e II.
- c) III e IV.
- d) I, II e IV.
- e) I e III.



# Referências

ASKELAND; D. R.; WRIGHT, W. J. **Ciência dos materiais**. São Paulo: Cengage Learning, 2014. 672 p.

CALLISTER, W.; RETHWISH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais**: uma introdução. 8 ed. São Paulo: LTC, 2013. 840 p.

NEWS ERRADO. **O segredo das coisas**: aço. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=CMGe7yuCHqE>> Acesso em: 17 jul. 2016.

ORTH, C. M.; BALDIN, N.; ZANOTELLI, C. T. Implicações do processo de fabricação do compósito plástico reforçado com fibra de vidro sobre o meio ambiente e a saúde do trabalhador: o caso da indústria automobilística. **Revista Produção Online**, Florianópolis, v. 12, n. 2, p. 537-556, abr./jun. 2012. Disponível em: <<https://www.producaoonline.org.br/rpo/article/download/943/918>>. Acesso em: 1 ago. 2016.

PLASACRE INDÚSTRIA. **Plasacre**: sistema de rotomoldagem. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=YjI3CuWiSA>>. Acesso em: 1 ago. 2016.

SHACKELFORD, J. F. **Ciência dos materiais**. 6 ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2008. 576 p.

SIMÊNCIO, E. C. A. **Preparação e caracterização de filmes finos sol-gel de Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>; Zr**. 2009. 66 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais)-Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/88/88131/tde-01092009-113406/pt-br.php>>. Acesso em: 31 ago. 2016.

SKIBA, L. **Extrusão e corte de tijolos**. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=60yLrWFxFbs>>. Acesso em: 27 jul. 2016.

# Anotações

# Anotações

# Anotações

# Anotações

# Anotações



ISBN 978-85-8482-536-3



9 788584 825363 >