



Mineralogia e Cristallografia

Mineralogia e Cristalografia

Simone Garcia de Ávila
Monique Becker

© 2018 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 e de Educação Básica

Mário Ghio Júnior

Conselho Acadêmico

Ana Lucia Jankovic Barduchi

Camila Cardoso Rotella

Danielly Nunes Andrade Noé

Grasiele Aparecida Lourenço

Isabel Cristina Chagas Barbin

Lidiane Cristina Vivaldini Olo

Thatiane Cristina dos Santos de Carvalho Ribeiro

Revisão Técnica

Isabella Gotti

Editorial

Camila Cardoso Rotella (Diretora)

Lidiane Cristina Vivaldini Olo (Gerente)

Elmir Carvalho da Silva (Coordenador)

Leticia Bento Pieroni (Coordenadora)

Renata Jéssica Galdino (Coordenadora)

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Ávila, Simone Garcia de
A958m Mineralogia e cristalografia / Simone Garcia de Ávila,
Monique Becker. – Londrina : Editora e Distribuidora
Educacional S.A., 2018.
184 p.

ISBN 978-85-522-0742-9

1. Mineralogia. 2. Cristalografia. I. Ávila, Simone
Garcia de. II. Becker, Monique. III. Título.

CDD 550

Thamiris Mantovani CRB-8/9491

2018
Editora e Distribuidora Educacional S.A.
Avenida Paris, 675 – Parque Residencial João Piza
CEP: 86041-100 – Londrina – PR
e-mail: editora.educacional@kroton.com.br
Homepage: <http://www.kroton.com.br/>

Sumário

Unidade 1 Fundamentos da cristalografia	7
Seção 1.1 - Introdução à mineralogia e à cristalografia	9
Seção 1.2 - Sistemas e estruturas cristalinas	24
Seção 1.3 - Estrutura e propriedades dos sólidos iônicos e metálicos	38
Unidade 2 Fundamentos de mineralogia	53
Seção 2.1 - Origem e propriedades dos minerais	55
Seção 2.2 - Grupos minerais	68
Seção 2.3 - Caracterização dos minerais	81
Unidade 3 Rochas: origem, composição e classificação	95
Seção 3.1 - Introdução ao estudo das rochas: origem, classificação e composição	97
Seção 3.2 - Rochas ígneas	111
Seção 3.3 - Rochas sedimentares e metamórficas	125
Unidade 4 Recursos minerais e processos industriais	141
Seção 4.1 - Recursos minerais	143
Seção 4.2 - Extração e utilização dos minerais	158
Seção 4.3 - Aplicações e processamentos industriais	170

Palavras do autor

Caro estudante, daremos continuidade aos estudos envolvendo as substâncias químicas e suas transformações, entretanto, neste material, daremos enfoque ao estudo dos minerais e de cristalografia. Você sabe o que são minerais? São compostos químicos inorgânicos, formados naturalmente e que apresentam uma estrutura espacial muito bem definida, isto é, os átomos que compõem esses materiais apresentam-se em um sistema altamente organizado, ou seja, um sistema cristalino. Dentro deste contexto, compreender o que é cristalografia e estudar as principais formas cristalográficas, ou seja, as formas como os átomos se organizam no espaço, é muito importante para entender o comportamento e as propriedades dos minerais. Os minerais podem ser formados na Terra, por meio de fenômenos geológicos, ou por meio de transformações que ocorrem em meteoritos ou outros corpos não terrestres. Eles são utilizados pelo homem desde tempos passados, tendo como objetivo melhorar a qualidade de vida humana, entretanto, com o crescimento tecnológico, a utilização dos minerais apresentou um significativo aumento nas atividades industriais, contribuindo para a produção de novos materiais que estão diretamente presentes em nosso cotidiano, por exemplo, objetos metálicos, pisos de cerâmica, azulejos etc.

Sendo assim, é extremamente importante que você seja capaz de compreender as principais classes de minerais existentes, sua composição química, estrutura, propriedades etc., de modo que os possa utilizar e transformar, contribuindo para o desenvolvimento tecnológico. Neste contexto, o objetivo desta disciplina é que você seja capaz de compreender os fundamentos básicos de mineralogia e cristalografia, assim como as principais características das estruturas cristalinas, formação dos minerais e rochas, caracterização e propriedades dos minerais, como também conhecer os principais processos industriais que envolvem o uso de minerais e refletir sobre os impactos ambientais que essa atividade pode trazer, propondo mecanismos para minimizar esses impactos.

Nossa disciplina será dividida em quatro unidades. Na Unidade 1, estudaremos os fundamentos básicos da cristalografia, enfatizando

como as propriedades estruturais podem refletir nas propriedades macroscópicas dos minerais. Na Unidade 2, conheceremos os fundamentos básicos de mineralogia, enfatizando a origem, a classificação, a caracterização e as propriedades dos diversos tipos de minerais. Em seguida, na Unidade 3, faremos um estudo detalhado sobre as rochas, abordando sua origem, composição e classificação. Na Unidade 4, estudaremos os principais recursos minerais disponíveis e os principais processos industriais envolvidos, ressaltando tanto os aspectos tecnológicos como ambientais.

A caminhada proposta para esta disciplina é bastante desafiadora e interessante. Ao término das quatro unidades, a compreensão das estruturas e propriedades físicas e químicas dos minerais irá auxiliá-lo em sua jornada profissional, de modo que você desenvolva o senso crítico e técnico, auxiliando na resolução de situações-problema que envolvam o uso, a extração e o processamento dos recursos minerais, de forma consciente e sustentável.

Fundamentos da cristalografia

Convite ao estudo

Iniciaremos nosso estudo à mineralogia e à cristalografia por meio dos fundamentos básicos da cristalografia, introduzindo conceitos essenciais que permitam associarmos as propriedades de diversos minerais com sua estrutura microscópica, entendendo como a maneira que os elementos químicos se combinam pode refletir nas propriedades e aplicações dos minerais no nosso cotidiano. Nesta primeira unidade, estudaremos os principais sistemas e estruturas cristalinas existentes, assim como as notações cristalográficas e os eixos cristalinos, fazendo um estudo mais detalhado sobre a estrutura cristalina de materiais metálicos e iônicos, ressaltando como essas estruturas e o tipo de ligação/interação entre as partículas podem interferir nas propriedades dos minerais. Estudaremos também como você, profissional responsável, poderá realizar testes que permitirão obter informações sobre as estruturas cristalinas dos minerais, ressaltando os conceitos principais envolvidos na difratometria de raio X e as aplicações da Equação de Bragg. Sendo assim, você será capaz de conhecer os principais sistemas cristalinos e realizar análises técnicas a respeito da estrutura cristalina de um material metálico ou iônico.

Vamos considerar, então, que você trabalha em um laboratório que recebe constantemente amostras de minerais para análise. Nesse laboratório, você dispõe de equipamentos e vidrarias convencionais e também de um difratômetro de raio X. Uma indústria química procurou esse laboratório para auxiliar na caracterização de algumas amostras minerais que ela recebe constantemente. Visando determinar as características químicas e estruturais desses minerais, você, como o responsável, necessita entregar um estudo que aponte a caracterização deles. Os

resultados dessa investigação, que serão destinados à indústria, serão apresentados na forma de um relatório. Esse estudo será dividido em três etapas, as quais serão trabalhadas seção após seção da seguinte forma:

- Etapa 1: Determinação da natureza química do mineral: iônico ou metálico.
- Etapa 2: Determinação da estrutura cristalina e das dimensões da célula unitária.
- Etapa 3: Determinação da densidade.

Ao término desta unidade, você será capaz de elaborar esse relatório, apresentando as principais características do mineral; de compreender os princípios básicos de mineralogia e de cristalografia; de reconhecer as principais ligações/interações existentes entre os minerais e relacioná-las com as propriedades destes materiais; e também de compreender os principais sistemas cristalinos, sua importância na compreensão das propriedades dos minerais e como a técnica de difratometria de raio X poderá auxiliá-lo nos estudos de cristalografia e das propriedades dos minerais. Por meio desta unidade, você será capaz de responder a algumas perguntas, como: como as ligações químicas refletem nas propriedades dos minerais? Quais são as estruturas cristalinas existentes e como elas refletem nas propriedades dos minerais? O que são células unitárias? Como podemos determinar as estruturas cristalinas?

Para que esses conhecimentos sejam construídos, abordaremos, nesta primeira unidade, noções gerais que permitam a você relacionar como as ligações químicas e as interações intermoleculares podem afetar as propriedades dos minerais e também como essas propriedades são afetadas pela estrutura cristalina do mineral, ou seja, pela maneira como os átomos se organizam no espaço.

Seção 1.1

Introdução à mineralogia e à cristalografia

Diálogo aberto

Caro aluno, você já deve ter reparado que muitas substâncias que usamos no nosso cotidiano são extraídas da natureza, não é mesmo? O sal de cozinha, que tem em sua composição principal o cloreto de sódio (NaCl), é obtido por meio da água do mar (salmoura), enquanto o óxido de cálcio (CaO), empregado na indústria do cimento, é proveniente das rochas calcárias, cujo componente principal é o carbonato de cálcio ($CaCO_3$). Por meio desses exemplos, é possível notar como os minerais estão presentes em nossas vidas. Porém, enquanto algumas substâncias são extraídas da natureza e utilizadas de forma direta, outras são processadas e convertidas em novas substâncias ou materiais que serão utilizados pela sociedade. Em outras palavras, o uso dos recursos minerais é muito importante para o desenvolvimento tecnológico, desse modo, conhecer as propriedades dessas substâncias é muito importante para que ela seja aplicada da forma que melhor nos traga benefícios e desenvolvimentos. Portanto, o entendimento dos aspectos básicos de cristalografia poderá auxiliá-lo a entender as propriedades e os comportamento dos minerais, de modo que você possa desenvolver o senso crítico de como utilizá-los e processá-los da melhor maneira.

Para melhor exemplificar a importância desses conhecimentos, vamos considerar a situação hipotética que vimos no item "Convite ao Estudo", na qual você trabalha em um laboratório que recebe minerais para análise constantemente.

Uma indústria química que trabalha com a extração e o processamento desses minerais contratou o laboratório que você trabalha para analisar algumas amostras de minerais, assim como para realizar a caracterização dessas amostras, e você será o responsável por esse estudo. Essa caracterização é importante para que a indústria possa destinar a melhor aplicação a esses materiais. Você, como profissional, sabe que são necessários alguns estudos macro e microscópicos, visando trazer o máximo de informações possíveis sobre as amostras em questão. Para que você conclua a primeira

etapa dos estudos propostos no item “Convite ao Estudo”, mostrados no início desta unidade, deverá definir um conjunto de testes iniciais e observações que poderão trazer informações a respeito da natureza química desse mineral, do ponto de vista de suas ligações químicas (iônica/metálica).

Quais dados referentes à aparência física do mineral poderão trazer informações sobre sua constituição? Como é possível diferenciar os minerais iônicos daqueles formados exclusivamente por metais?

O levantamento de dados da literatura a respeito de algumas substâncias das quais desconhamos estar presentes no material analisado é sempre importante para trazer informações adicionais e, muitas vezes, conclusivas para a análise, assim, é importante a busca na literatura específica a respeito dessas informações.

Para resolver essa situação-problema, você deverá realizar um estudo a respeito da estrutura das amostras, buscando conhecer suas principais características macro e microscópicas e entender o tipo de arranjo dos elementos que a compõem, assim como o tipo de interação/ligação existente entre esses elementos. Nesta seção, você entenderá como é importante conhecer como os elementos se organizam no espaço (arranjo cristalográfico) e como eles estão ligados para entender as propriedades dos minerais.

Tenha um excelente trabalho!

Não pode faltar

Prezado aluno, daremos início ao estudo dos minerais e de sua estrutura. A mineralogia é um ramo das ciências geológicas dedicada ao estudo das propriedades, da constituição, das estruturas, das gênese e do modo de ocorrências dos minerais.

Podemos definir como mineral um corpo de origem natural, sólido e que apresenta uma estrutura cristalina, ou seja, um material no qual seus átomos e/ou moléculas estão agrupados de maneira organizada e bem definida. Eles, normalmente, são substâncias compostas ou constituídas apenas por um elemento químico, apresentando uma composição química bem estabelecida. Os minerais são formados por meio de processos físico-químicos em ambientes geológicos,

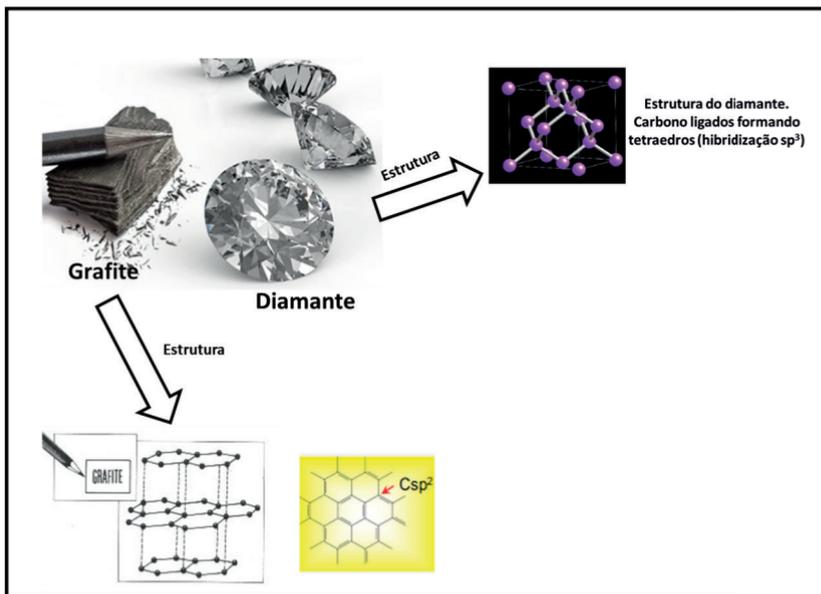
decorrentes de transformações inorgânicas. Diversos processos que ocorrem no centro da Terra e em sua superfície são responsáveis pela formação dos minerais. Eles também podem ser formados por transformações decorrentes de materiais extraterrestres, como meteoritos, por exemplo.

Os minerais estão presentes nas rochas, as quais são constituídas, na realidade, por um aglomerado de minerais aglutinados. Esses materiais são classificados não apenas com base em sua composição química mas também em sua estrutura cristalina, uma vez que temos minerais quimicamente iguais, porém com propriedades diferentes, e essas diferenças são atribuídas ao diferente arranjo espacial que os elementos estão distribuídos.

Para melhor entendermos a importância de se conhecer as diferenças estruturais dos minerais, vamos observar a Figura 1.1. Nesta figura, podemos observar imagens do grafite e do diamante. Ambos apresentam a mesma composição química, tendo como componente principal o elemento carbono (C). Mas será que ambos apresentam as mesmas propriedades? A resposta para essa pergunta é "não", pois sabemos que o diamante é um material de alta dureza e bastante resistente, podendo ser utilizado na indústria como matéria-prima para broca de perfuração e ferramentas de corte. Na indústria automobilística, por exemplo, o diamante é utilizado na usinagem de peças, como no polimento de discos de freios e também dos cilindros dos motores, pois na produção de veículos, normalmente, trabalha-se com peças duras e bastante abrasivas.

Diferentemente do diamante, o grafite é um material maleável e um bom condutor. Em relação às propriedades visuais (aparência do material), o diamante apresenta faces brilhantes e transparentes, já o grafite é um material de coloração negra e sem brilho. Como podemos explicar essas diferenças se estamos falando de materiais com a mesma composição química? A diferença está na maneira como eles foram formados. O grafite é um material formado sob condições de pressão e temperatura bem menor, quando comparada às condições nas quais o diamante é formado. Este é formado quando submetido a altas pressões e a altas temperaturas.

Figura 1.1 | Imagens das diferentes formas minerais do carbono: grafite e diamante, respectivamente



Fonte: adaptada de Atkins e Shriver (2008)

As diferenças na formação refletem na maneira como os átomos de carbono se agrupam, resultando em estruturas diferentes. No diamante, os átomos de carbono estão ligados, formando uma estrutura tetraédrica (hibridização sp^3 , presença apenas de ligações sigmas) que se estende por todo o material (Figura 1.1). No caso do grafite, os átomos de carbono sofrem hibridização do tipo sp^2 , fazendo com que os carbonos formem uma rede hexagonal, que dá origem a lâminas. Essas lâminas permanecem alinhadas umas sobre as outras, conforme mostrado na Figura 1.1. Esse alinhamento é decorrente das interações de London/Wander's Walls, que são interações intermoleculares relativamente fracas, assim, permitem o deslizamento das lâminas. É a presença dessas lâminas que torna o material maleável e também a presença da ligação π (dupla ligação), resultante da hibridização sp^2 do carbono, que faz com que ele seja condutor de eletricidade. Essas propriedades fazem com que esses materiais apresentem aplicações industriais e tecnológicas muito diferentes. Enquanto o diamante pode ser utilizado como ferramenta de corte devido à sua elevada dureza, o grafite, por exemplo, pode ser usado como lubrificante de sólidos e

como eletrodos, devido à sua propriedade de conduzir eletricidade. Isso nos permite concluir que, mesmo que ambos os materiais apresentem a mesma composição química, se as estruturas forem diferentes, as propriedades irão variar.



Reflita

Os minerais aragonita e calcita apresentam a mesma composição química CaCO_3 , porém as estruturas cristalinas são diferentes. De que maneira a estrutura desses minerais pode interferir em suas propriedades? O fato de a composição química ser a mesma significa que ambos podem apresentar as mesmas aplicações tecnológicas e industriais?

Caro aluno, conforme você pode ter notado na discussão anterior, o conhecimento da estrutura cristalina de um mineral é extremamente importante para entendermos suas propriedades e definirmos a melhor aplicação e utilização dele. Dentro desse contexto, daremos início ao estudo da cristalografia, para que possamos melhor entender o comportamento dos minerais.

A cristalografia é o ramo da ciência que estuda os materiais cristalinos. Uma substância cristalina é aquela que apresenta um arranjo atômico/molecular muito bem ordenado. Os cristais são encontrados na natureza, principalmente em formações rochosas, mas também podem ser achados em outras formas, como flocos de neve (gelo), grãos de sais etc. Além dos cristais naturais, também é possível obter diversos materiais cristalinos de origem sintética, o que é uma prática comum na indústria. Neste caso, a síntese do material é feita de acordo com sua aplicação, o que requer cuidados nas condições reacionais, de modo que se obtenha o material na estrutura desejada.

Para entendermos como um cristal é formado ou constituído, precisamos conhecer a geometria das moléculas e/ou íons que o compõem e as interações existentes entre essas espécies. São essas interações que serão responsáveis pela organização do sistema, resultando no cristal.

Os estudos cristalográficos tiveram grandes avanços por meio da descoberta dos raios X em 1895. Esse tipo de radiação é caracterizado por feixes de luz não perceptíveis ao olho humano, porém, quando atingem uma estrutura organizada, esses raios sofrem espalhamento. A partir dessa radiação espalhada, os cientistas foram capazes de

reproduzir imagens tridimensionais dos átomos que compunham um material cristalino. Na Seção 1.3, deste material, você será capaz de compreender melhor como o uso do raio X contribuiu para a determinação das estruturas cristalográficas.

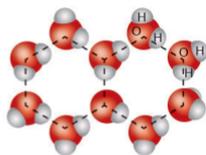
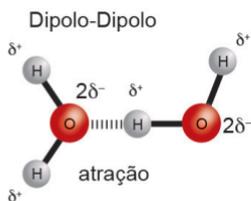


Exemplificando

Vamos considerar a formação de um floco de neve para entendermos o que é o cristal. A Figura 1.2 mostra o agrupamento das moléculas de água e também de um cristal de neve. A molécula de água possui uma geometria angular e é uma molécula bastante polar.

A diferença de eletronegatividade entre seus átomos ligantes (H e O) combinada à sua geometria angular resultam em forças de atrações bastante significativas, sendo representadas pelas cargas positivas acumuladas próximo aos átomos de hidrogênio e pelas cargas negativas acumuladas ao redor do átomo de oxigênio. Essa força de atração é conhecida por interações de hidrogênio. A presença de cargas de sinais contrários forma um dipolo e faz com que as moléculas de água atraiam umas às outras, por meio de uma interação intermolecular denominada dipolo-dipolo, organizando-se de forma hexagonal, assim, a simetria hexagonal observada em um cristal de neve é fruto da maneira com que as moléculas de água se organizam no estado sólido. No caso das interações intermoleculares envolvidas na formação dos cristais de gelo, temos a ocorrência das ligações de hidrogênio, as quais são interações do tipo dipolo-dipolo de maior intensidade.

Figura 1.2 | Representação das interações intermoleculares presentes na molécula de água



Organização das moléculas em um arranjo hexagonal



Cristal de neve (gelo)

Fonte: adaptada de Atkins e Shriver (2008)

Você sabia que a cristalografia é, hoje, a base do desenvolvimento de grande parte dos novos materiais utilizados no nosso cotidiano? Por isso, muitos países investem em cristalografia. A compreensão das propriedades e estruturas é fundamental para o desenvolvimento e a aprimoração de produtos de uso cotidiano, como cartões de memória do computador, telas de televisão plana e diversos componentes de meios de transporte, que vão desde veículos de passeio a aviões. Um cristalógrafo, além de estudar as estruturas dos materiais, também estuda como modificar as estruturas dos materiais de modo a modificar suas propriedades e seu comportamento, adequando o material a usos diversos para benefício da sociedade.

Você sabia que, por meio da cristalografia, é possível estabelecer uma “impressão digital” do material estudado? Isso mesmo! Um laboratório de pesquisa e desenvolvimento de uma indústria, por exemplo, pode utilizar conhecimentos de cristalografia para provar que seu material desenvolvido é único e, assim, se candidatar a uma patente.

Sem sombra de dúvidas, a cristalografia apresenta diversas aplicações, e uma delas está no ramo da mineralogia. Praticamente tudo que conhecemos a respeito das rochas e minerais, incluindo sua estrutura e formações geológicas, é decorrente do desenvolvimento da cristalografia.

Cristalografia: conceitos básicos e definições

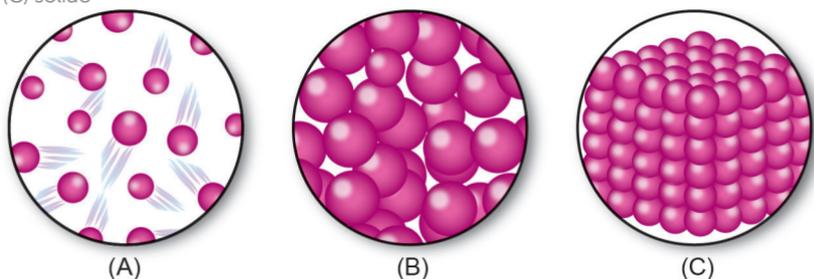
Conforme exemplificamos anteriormente, a cristalografia não se restringe apenas ao estudo dos minerais, ela pode contribuir para o desenvolvimento de diversos segmentos, sendo útil nos processos de desenvolvimento de materiais sintéticos e também de origem inorgânica. A cristalografia pode ser dividida em alguns segmentos específicos, como:

- **Cristalografia morfológica:** utilizada para a definição dos limites externos dos cristais.
- **Cristalografia estrutural:** traz informações sobre a estrutura tridimensional do material, ou seja, estuda a periodicidade das partículas que constituem o cristal.
- **Cristalografia química:** estuda a relação entre a estrutura do cristal com as propriedades físico-químicas do material.
- **Cristalografia física:** estuda a relação entre as propriedades físicas e a estrutura do cristal.

Caro aluno, como você pode ver, a cristalografia pode trazer muitas informações sobre a estrutura e as propriedades dos minerais. Quando nos referimos às substâncias estudadas por meio da cristalografia, estamos considerando apenas o estado sólido da matéria, que é o estado físico de maior agregação e interação entre as partículas, resultado do menor grau de agitação das moléculas ou dos átomos, portanto a cristalografia envolve um estudo detalhado do estado sólido da matéria.

A Figura 1.3 representa os três estados físicos da matéria. Como podemos perceber, a principal diferença entre os estados físicos é o grau de agregação entre as moléculas. No sólido, temos uma diminuição significativa da energia cinética e um aumento das forças de atração entre as moléculas.

Figura 1.3 | Representação dos estados físicos da matéria: (A) gasoso, (B) líquido e (C) sólido



Fonte: adaptada de Constantino e Silva (2011, p. 21).

Existem materiais sólidos, cujos constituintes se distribuem no espaço de uma maneira desorganizada, aleatória e irregular, não apresentando, portanto, uma estrutura ordenada e bem definida. Esses sólidos são denominados sólidos amorfos, e sua estrutura se assemelha com a estrutura de um líquido, porém um líquido congelado no tempo. Assim, os sólidos amorfos são substâncias que apresentam estrutura atômica e molecular desorganizada, com baixo grau de mobilidade. Um exemplo bem conhecido de um material amorfo é o vidro, que apresenta uma estrutura molecular polimérica formada pela ligação de átomos de silício (Si) e oxigênio (O), de maneira desordenada. A Figura 1.4 representa um material monocristalino, um policristalino e um material amorfo (não cristalino). No caso de materiais policristalinos, temos regiões com grau ou tipo de organização diferente; já os sólidos monocristalinos apresentam um único grau de organização.

Figura 1.4 | Representação dos diferentes tipos de materiais sólidos quanto ao grau de organização das partículas que os compõem



Fonte: Constantino e Silva (2011, p. 9).



Assimile

A cristalografia apresenta ampla aplicação, não se restringindo apenas ao estudo dos cristais naturais (mineralogia). A indústria farmacêutica é uma das indústrias que faz uso muito grande da cristalografia, pois essa ciência permite a distinção de diferentes formas sólidas de um medicamento. Essas formas podem apresentar propriedades físico-químicas diferentes, o que pode refletir na eficácia e interação do medicamento no organismo. Definimos cristais como estruturas sólidas, nas quais seus átomos ou moléculas que os compõem se apresentam organizados. Os minerais fazem parte da classe de substâncias cristalinas, por isso esta primeira unidade sobre o material é destinada à cristalografia.

Conforme você pode notar, a classificação mostrada na Figura 1.4 está relacionada à maneira como os átomos ou as moléculas se organizam, porém também podemos classificar os materiais sólidos por meio dos tipos de ligação química, sendo eles: sólidos metálicos, iônicos e moleculares. Para entendermos a ligação metálica, vamos considerar que cada átomo do metal apresenta formato esférico e que essas esferas estejam alinhadas como laranjas empilhadas. Para que a ligação aconteça, cada átomo perde um ou mais elétrons, estando estes mergulhados em um “mar de elétrons” que circulam por todo o agrupamento metálico. A força da ligação resulta das atrações combinadas entre esses elétrons, movendo-se livremente, e os cátions resultantes. O tipo de ligação nos permite concluir algumas características em comum dos metais: a presença de elétrons livres na estrutura faz com que eles sejam bons condutores de eletricidade, e a presença desses elétrons livres também explica porque os metais

apresentam brilho, uma vez que este é resultante da absorção e reflexão da radiação eletromagnética incidente. Os metais são maleáveis e dúcteis porque os elétrons podem se ajustar rapidamente ao posicionamento dos núcleos dos átomos metálicos quando esse material é submetido a uma força externa, por exemplo, à pancada de um martelo. Assim, se um material metálico for submetido à pancada de um martelo, um número muito grande de átomos pode mudar de lugar, mas os elétrons se ajustam tão rapidamente, evitando com que os átomos sejam ejetados.

Os sólidos iônicos são aqueles formados pela combinação de cátions, partículas com carga positiva, e ânions, partículas com cargas negativas. Como temos a combinação de partículas com cargas opostas, a força de atração entre elas é muito elevada, o que contribui muito para a formação do sistema cristalino (organização do sistema) e também para a compreensão de algumas propriedades dos sólidos iônicos. A forte atração entre as partículas explica porque substâncias iônicas apresentam elevado ponto de fusão, uma vez que é necessário o fornecimento de muita energia para desorganizar o sistema e vencer as forças de atração. Outra característica importante é que esses materiais são quebradiços e frágeis. Quando eles são submetidos a uma força externa (podemos considerar novamente a pancada de um martelo), no momento do choque, partículas de mesmo sinal (dois cátions ou dois ânions) entrarão em contato, promovendo a repulsão das partículas. A consequência desse fenômeno é a ruptura do material. Outra característica interessante dos materiais iônicos é o fato de gerarem soluções condutoras quando dissolvidos em água, o que é decorrente da presença de cátions e ânions em sua estrutura. Os sólidos moleculares são aqueles formados por ligações covalentes. Diferentemente dos sólidos iônicos e metálicos, não podemos estabelecer um conjunto de propriedades em comuns entre esses sólidos, pois as propriedades, nesse caso, dependerão do tipo de interação intermolecular, por exemplo, força de London, forças dipolo-dipolo, ligações de hidrogênio etc.



Pesquise mais

Sem sombra de dúvidas, a cristalografia apresenta muitas aplicações que vão além do uso em mineralogia. Ela pode ser utilizada para a compreensão da estrutura e das propriedades de diversos materiais

sólidos que apresentam uma estrutura organizada, estando envolvida nos diversos ramos industriais. Para entender um pouco mais sobre a importância e as aplicações da cristalografia, consulte o material:

INTERNATIONAL UNION OF CRISTALOGRAPHY. **Cristalografia e Aplicações**: no íntimo da matéria. Organização das Nações Unidas para a Educação, 2014. Disponível em: <http://www.iycr2014.org/__data/assets/pdf_file/0011/98309/Cristalografia-e-aplicacoes_no-intimo-da-materia_final-2.pdf>. Acesso em: 30 ago. 2017.

Faça a leitura da página 3 até a página 14. Excelente leitura!

Sem medo de errar

Vamos imaginar que você trabalhe em um laboratório de análise química e que este é especializado em análise de estruturas de materiais cristalinos. Esse laboratório recebeu um conjunto de amostras oriundas de uma indústria que atua no ramo de extração e processamento de minerais. Essa indústria tem por objetivo obter informações sobre a estrutura cristalina e a natureza química dessas amostras (metálica/iônica) para melhor estudar suas aplicações e seu processamento. A você, que é um dos profissionais que trabalha nesse laboratório, foi atribuída a responsabilidade pela realização desse estudo. Agora, você está desenvolvendo a primeira etapa do desafio proposto no item “Convite ao estudo”, que envolve a determinação da natureza química do mineral: iônico ou metálico? Sabendo da importância das observações macroscópicas das amostras, você analisou as principais características dessas amostras que lhe possam trazer informações a respeito do tipo de ligação química (iônica e metálica) existente nos materiais. Você sabe que, se o material apresentar brilho, alto ponto de fusão, for maleável, dúctil e conduzir eletricidade, pode se tratar de um mineral metálico. Entretanto, se o material for quebradiço, frágil, apresentar alto ponto de fusão e, quando solúvel em água, gerar uma solução condutora de eletricidade, ele apresentará natureza iônica. Portanto, observações iniciais a respeito da coloração e da aparência da amostra poderão contribuir para conclusões importantes. Testes capazes de determinar as propriedades físicas da amostra são muito importantes para a realização desta diferenciação. Considerando que

o laboratório que você trabalha dispõe de um difratômetro de raio X, seguramente, você realizou ensaios utilizando esse equipamento. Esse estudo lhe trouxe mais informações a respeito da estrutura cristalina da amostra, o que auxiliará muito no entendimento do comportamento da amostra e de seu processamento. No final de seu estudo, você entregou para a empresa solicitante um relatório contendo as descrições das aparências físicas das amostras, assim como suas propriedades (densidade e ponto de fusão), o que lhe permitiu concluir sobre a natureza das ligações químicas que compõem cada amostra. Você também apresentou os resultados de difração de raio X, evidenciando as estruturas dos materiais estudados. A empresa ficou bastante satisfeita com os resultados apresentados, pois por meio deles será possível destinar a melhor aplicação tecnológica para esses minerais.

Avançando na prática

Resolvendo um problema forense

Descrição da situação-problema

Caro aluno, você trabalha no Instituto Criminalístico de seu estado. Durante um procedimento de fiscalização da Polícia Federal, algumas joias foram apreendidas e questionou-se sua originalidade. As joias eram vendidas como peças de ouro, porém desconfiou-se que elas continham o mineral pirita (Figura 1.5), o qual é constituído de Sulfeto de Ferro (II) (FeS) e recebe o nome popular de "ouro dos tolos", devido à sua forte semelhança com o metal ouro. Você, como profissional responsável por este estudo, tem por objetivo verificar se as joias apresentam originalidade ou não. Assim, é necessário que você realize uma análise macroscópica do material. Isso permitirá diferenciar as propriedades do mineral pirita das propriedades do mineral ouro. Como você faria essa análise? Será que um estudo das propriedades macroscópicas e também das propriedades físicas seria suficiente?

Figura 1.5 | Imagem do mineral pirita



Fonte: <<http://entendendoageologiaufba.blogspot.com.br/2012/03/pirita.html>>. Acesso em: 27 ago. 2017.

Resolução da situação-problema

Para resolver esse problema, você consultou uma ficha técnica dos dois minerais em questão (ouro e a pirita), visando conhecer as propriedades das duas substâncias envolvidas, como densidade, ponto de fusão, dureza, cor, transparência etc. Nessa ficha, você verificou que o aquecimento da pirita deve ser feito com muito cuidado, pois ela se decompõe emitindo dióxido de enxofre (SO_2), um gás tóxico, quando aquecida. Levando em consideração seus conhecimentos químicos já adquiridos, você sabe que a pirita é um material iônico, e que o ouro é metálico. Todas essas informações foram suficientes para lhe orientar a solucionar a situação-problema. Você realizou alguns estudos iniciais por meio da observação da aparência da amostra, determinou a densidade por meio de medidas de massa e volume e a aqueceu cuidadosamente, verificando se há ou não liberação de gases. Você também realizou uma análise macroscópica para verificar se a amostra era frágil, como um composto iônico, ou se era maleável e dúctil, como um metal.

Faça valer a pena

1. Diamante e grafite são minerais que apresentam carbono em sua composição química. Enquanto o primeiro apresenta alta dureza, resistência e transparência, o segundo é um material mole, opaco e de coloração negra. Por conta dessas características, ambos apresentam aplicações

industriais muito diferentes. A respeito das estruturas cristalinas do diamante e do grafite, foram feitas algumas afirmações:

I. No grafite, os átomos estão ligados por meio de quatro ligações simples (hibridização), por isso o material não apresenta resistência.

II. A presença de ligações pi (hibridização) entre os átomos de carbono é o que confere ao grafite o poder de conduzir eletricidade.

III. Na estrutura do diamante, os átomos estão ligados em estruturas hexagonais, formando lâminas, as quais estão unidas por interações intermoleculares.

Assinale a alternativa que apresenta a(s) afirmação(ões) correta(s):

a) I, II e III.

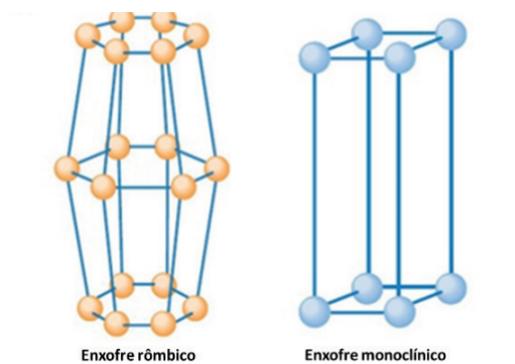
b) II, apenas.

c) II e III.

d) I e III.

e) I e II.

2. A cristalografia é um ramo da ciência que estuda a estrutura e as propriedades dos materiais cristalinos, ou seja, materiais que apresentam seus átomos ou suas moléculas em um arranjo espacial bem definido e organizado. Seu estudo é importante, pois as propriedades dos materiais não são apenas definidas por sua composição química. O enxofre pode ser encontrado na natureza de duas formas: estrutura rômbrica e monoclinica, conforme mostrado na figura a seguir:



Fonte: <<http://slideplayer.com.br/slide/10222282/>>. Acesso em: 27 ago. 2017.

Analisando as estruturas, podemos concluir que os materiais apresentados na figura acima:

- a) Apresentam a mesma composição química, portanto apresentarão as mesmas propriedades.
- b) Não apresentam mesma forma cristalina, mas isso não irá refletir aplicação industrial do enxofre.
- c) Apresentam estruturas cristalinas diferentes, portanto, mesmo apresentando a mesma composição química, ambos terão propriedades diferentes.
- d) Não poderiam ser diferenciados por um estudo cristalográfico.
- e) Poderiam ser identificados por meio de suas propriedades físicas e químicas, pois apresentam composição química distinta.

3. Os sólidos podem ser classificados por meio do tipo de ligação química, podendo ser metálicos, iônicos ou covalentes. O tipo de ligação química ou o tipo de interação intermolecular, no caso dos sólidos covalentes, pode explicar algumas propriedades dos materiais. Um laboratório de análises recebeu uma amostra de um material mineral para análise. Após estudos, foram observadas algumas características:

- Alto ponto de fusão.
- Condutor de eletricidade.
- Alta resistência.

Essa análise nos permite concluir que o material em questão apresenta natureza:

- a) Iônica.
- b) Molecular ou iônica.
- c) Iônica ou metálica.
- d) Metálica.
- e) Covalente.

Seção 1.2

Sistemas e estruturas cristalinas

Diálogo aberto

Prezado(a) aluno(a), na seção anterior, discutimos a respeito das propriedades dos materiais sólidos e vimos que tanto a composição química quanto a maneira como os átomos se organizam no espaço são importantes para compreendermos as propriedades de um material. Você já deve ter visto ou ter tido contato com grafite e diamante em seu cotidiano, mas, possivelmente, nunca imaginou que ambos tivessem a mesma composição química e que as diferenças de suas propriedades estão relacionadas ao arranjo estrutural dos átomos de carbono. O mesmo acontece com muitos minerais que usamos no nosso dia a dia, e isso refletirá diretamente na aplicação do mineral. Portanto, entender como os átomos se organizam no espaço é extremamente importante para compreendermos melhor sobre as propriedades dos materiais sólidos. O conhecimento das estruturas cristalinas poderá auxiliar você a melhor perceber a química do estado sólido, assim como as propriedades dos minerais.

Para entender melhor a importância do conhecimento das estruturas cristalográficas, vamos considerar que você trabalha em um laboratório de análise de materiais e, constantemente, recebe amostras de minerais para análise. O laboratório que você trabalha também é responsável pela realização de ensaios relacionados à química forense. Imagine agora que você, como responsável, recebeu uma amostra de uma joia para análise. Essa amostra foi enviada por uma indústria que apresenta parceria com o laboratório onde você trabalha. A indústria em questão recebeu um lote desse material e deseja verificar sua originalidade. Para isso, você deverá elaborar uma metodologia de análise que traga informações a respeito da estrutura cristalina e da célula unitária do material analisado. Lembrando que este é o momento de realização da segunda etapa de seu estudo, proposto no início da unidade.

Para realizar essa etapa, responda aos seguintes questionamentos: qual técnica é utilizada para trazer informações sobre a estrutura cristalina e sobre a célula unitária de uma substância? De qual maneira

o conhecimento da estrutura cristalina pode contribuir para entender as propriedades do mineral? Para resolver esse problema, você irá buscar informações sobre a composição química das amostras e, assim, propor um meio de determinar as estruturas cristalinas. Uma análise preliminar das propriedades macroscópicas poderá nortear você a tomar algumas decisões.

Não pode faltar

Prezado(a) aluno(a), daremos início ao estudo da química do estado sólido, visando entender um pouco mais sobre as estruturas cristalinas. Como sabemos, os minerais são encontrados na natureza no estado sólido, assim, para entendermos melhor suas propriedades, precisamos estudar um pouco mais sobre a química do estado sólido.

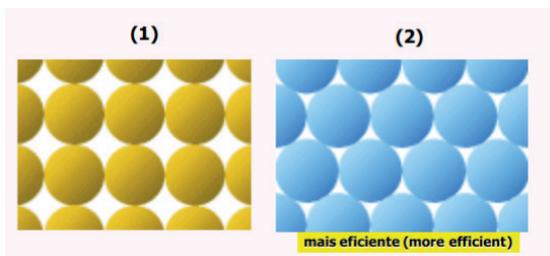
Esse estado físico é caracterizado pela organização espacial das espécies químicas que compõem o material. O arranjo de átomos ou íons nas estruturas sólidas simples pode ser representado por diferentes arranjos de esferas rígidas. Quando nos referimos a um material metálico, consideramos que cada átomo que compõe o metal é representado por uma esfera neutra, pois cada cátion está rodeado de elétrons, os quais neutralizam a estrutura.

No caso de substâncias iônicas, as esferas utilizadas representam os cátions e ânions, o que resulta em uma pequena expansão do agrupamento, quando comparado a um material metálico, devido às forças de repulsão existentes quando espécies de cargas de mesmo sinal se aproximam.

Vamos considerar que os materiais cristalinos são formados por meio de empacotamento dos átomos e que estes são representados por esferas. A Figura 1.6 representa duas maneiras de como essas esferas podem ser organizadas no espaço. No primeiro modelo, temos um empacotamento menos eficiente, pois há mais espaços vazios entre as esferas. Diferentemente, no segundo modelo, temos um empacotamento mais eficiente, pois as esferas estão organizadas de maneira que os espaços vazios diminuam, aumentando o número de esferas por espaço ocupado. Esses dois tipos de empacotamento darão origem a arranjos cristalinos diferentes, pois a formação de um cristal envolve a junção de elementos estruturais que se repetem regularmente, os quais podem ser átomos, moléculas ou espécies

iônicas. A rede cristalina é um padrão formado pela união desses elementos e é usada para representar as posições dos elementos estruturais que se repetem, sendo assim, a porção mais simples que se repete ao longo da estrutura do sólido e que mostra sua simetria global é denominada **célula unitária**.

Figura 1.6 | Representação dos diferentes tipos de empacotamento de esferas que darão origem aos materiais sólidos



Fonte: adaptada de Constantino e Silva (2011, p. 10).



Refleta

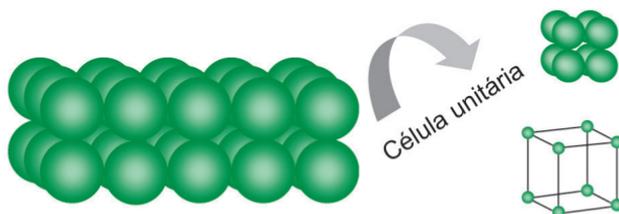
Como você pode notar, os materiais são formados por átomos, íons ou moléculas e espaços vazios. A maneira como esses elementos se organizam resultará em um maior ou menor espaçamento entre eles. Considerando que a densidade seja a relação entre a massa e o volume de um material, sólidos que apresentam mesma composição química, mas diferentes arranjos estruturais podem apresentar densidades diferentes? De que maneira a organização estrutural dos elementos pode refletir na densidade dos sólidos?

De uma maneira mais formal, podemos definir uma rede como um arranjo de pontos tridimensional infinito, sendo que cada ponto é um elemento que compõe o sólido. Em uma rede de pontos, cada ponto está rodeado de forma idêntica por seus pontos vizinhos, os quais definirão a estrutura básica que se repetirá no cristal. A estrutura cristalina do material será obtida pela associação de uma ou mais unidades estruturais com cada ponto da rede. Assim sendo, a **célula unitária** do cristal é uma região imaginária, de lados paralelos, a partir da qual o cristal inteiro pode ser construído por deslocamentos translacionais.

A Figura 1.7 mostra a representação organizacional de elementos que compõem um sólido e a sua célula unitária. Se imaginarmos várias

células unitárias, elas se encaixarão umas às outras perfeitamente, dando origem à estrutura global do sólido.

Figura 1.7 | Modelo de representação organizacional de um material sólido e sua célula unitária

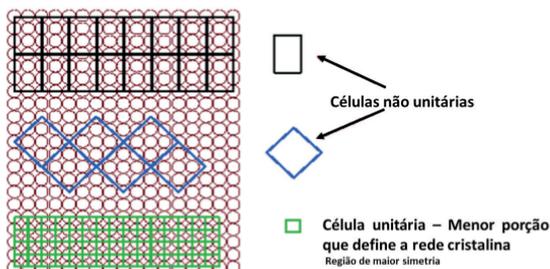


Fonte: adaptado de Constantino e Silva (2011, p. 10).

Como definir uma célula unitária a partir de um modelo de arranjo bidimensional

Conforme podemos observar na Figura 1.8, na qual há uma representação bidimensional da estrutura cristalina, há várias possibilidades de se definir uma célula unitária. Podemos considerar os retângulos demarcados pela coloração preta, ou os elementos destacados pelas colorações azul ou verde. Mas a correta é aquela que apresenta maior simetria e também a menor unidade que representa a estrutura cristalina. Portanto, nesse exemplo, podemos considerar que a representação correta é aquela demarcada pelo esquema em verde. As células unitárias em preto e azul apresentam menor simetria quando comparada à verde, portanto elas não devem ser consideradas. Além disso, uma célula unitária deve representar a menor porção que realmente define a rede cristalina, nesse caso, podemos notar que a região em verde apresenta não somente maior simetria mas também um menor número de elementos na porção.

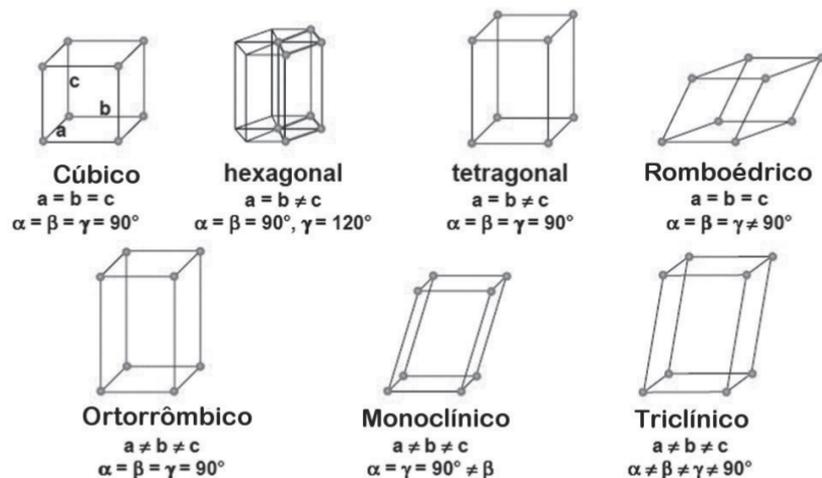
Figura 1.8 | Como definir a célula unitária a partir de um arranjo bidimensional



Fonte: adaptada de Constantino e Silva (2011, p. 5).

Definimos como sistema cristalino um grupo de ordenamento espacial pontual e regular de átomos, moléculas ou espécies iônicas. Esse sistema pode ser definido por um conjunto de parâmetros. Os ângulos (α , β , γ) e os comprimentos (a , b , c) usados para definir o tamanho e a forma de uma célula unitária (Figura 1.9) são denominados **parâmetros da célula unitária** ou **parâmetros de rede**. Por convenção, o ângulo entre a e b é o γ ; o ângulo entre b e c é o α ; e entre a e c é o β .

Figura 1.9 | Representação dos sete sistemas cristalinos



Fonte: <<http://sites.ifi.unicamp.br/lfmoderna/conteudos/difracao-de-raio-x/>>. Acesso em: 9 set. 2017.

A fim de que você entenda os sistemas cristalinos apresentados na Figura 1.9, vamos discutir o que seriam os elementos de simetria. Para que uma estrutura seja simétrica, é preciso que, quando ela for dividida em partes, estas devam coincidir perfeitamente quando sobrepostas. Sendo assim, a simetria apresenta relação direta com a forma, o tamanho e a posição de uma estrutura ou um objeto, refletindo de maneira direta nas propriedades dos minerais. A identificação dos elementos de simetria é a forma mais eficiente e racional de se estudar a estrutura molecular/atômica de um material. Esses elementos são, na realidade, eixos, centros ou planos que permitem executar operações, como rotação, inversão e reflexão, conduzindo a uma nova situação de equivalência. Essas operações são denominadas operações de simetria e são executadas sobre o correspondente elemento de simetria. Cada uma dessas operações representa ações, tais como uma rotação

por um certo ângulo que deixa a estrutura molecular inalterada. A Tabela 1.1 relaciona as operações de simetria com os elementos de simetria correspondentes.

Tabela 1.1 | Operação e elementos de simetria

Operação	Elemento de Simetria	Símbolo
Identidade	"todo o espaço"	E
Rotação por $360^\circ/n$	n-ésimo eixo de simetria	C_n
Reflexão	Plano de reflexão	σ
Inversão	Centro de inversão	I
Rotação por $360^\circ/n$ seguida por reflexão perpendicular ao eixo de rotação.	n-ésimo eixo de rotação imprópria	S_n

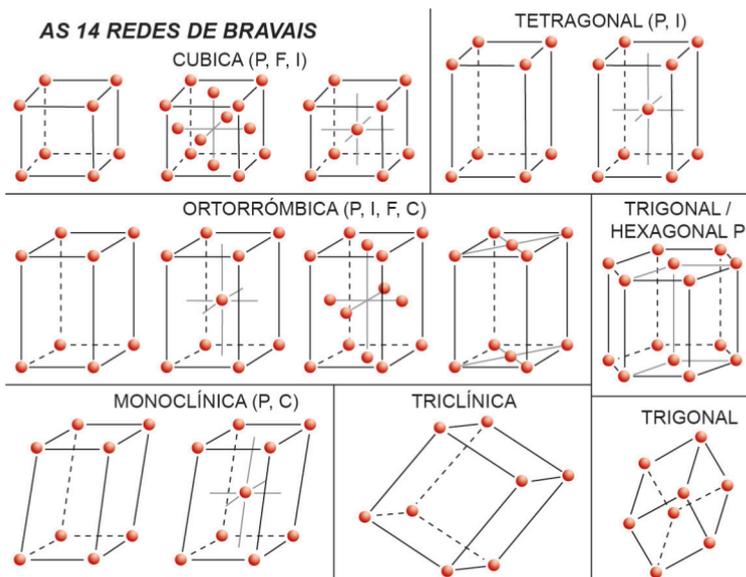
Fonte: Atkins e Shriver (2008).

Ao relacionar os parâmetros de rede, considerando um sistema tridimensional, com o resultado da simetria da estrutura, temos a ocorrência de **sete sistemas cristalinos**, conforme presentes na Figura 1.9. Observando esses sistemas cristalinos, podemos notar a presença dos seguintes elementos de simetria:

- **Triclínico**: ausência de elementos de simetria.
- **Monoclínico**: um eixo binário de rotação.
- **Ortorrômbico**: três eixos binários perpendiculares e/ou planos de reflexão.
- **Romboédrico**: um eixo ternário de rotação.
- **Tetragonal**: um eixo quaternário de rotação.
- **Hexagonal**: um eixo de rotação de ordem seis.
- **Cúbico**: quatro eixos ternários de rotação, arranjados tetraedricamente.

Esses sete sistemas cristalinos darão origem a 14 células unitárias diferentes, conforme ilustrado na Figura 1.10. Cada uma dessas células unitárias apresenta características particulares que as diferenciam umas das outras diretamente nas propriedades físicas dos sólidos. Essas representações das células unitárias são conhecidas também como **redes de Bravais**.

Figura 1.10 | Representação das células unitárias



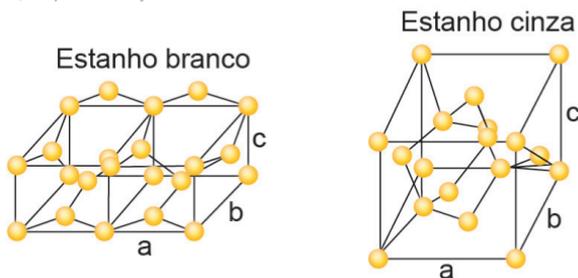
Fonte: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Rede_de_Braavais>. Acesso em: 9 set. 2017.



Exemplificando

O estanho é um metal que pode ser encontrado em dois arranjos estruturais diferentes: arranjo cúbico, que resulta no estanho de cor branca, e arranjo tetragonal de corpo centrado, referente ao estanho de cor cinza, conforme ilustrado na Figura 1.11. A transformação do estanho branco em cinza ocorre por meio do resfriamento do material. Essa transição resulta na expansão da célula unitária em 27%, resultando na desintegração do material. Para que você entenda como as células unitárias podem refletir nas propriedades dos materiais, vamos tomar como exemplo um dado histórico. Por volta de 1812, o exercicio de Napoleão invadiu a Rússia. Os botões dos uniformes dos soldados eram feitos de estanho, porém o que não se sabia na época é que o estanho apresenta duas estruturas cristalinas diferentes, com propriedades bem distintas. Com a chegada do inverno russo, os átomos de estanho branco, que faziam parte da composição dos botões, sofreram um rearranjo espacial, transformando-se em estanho cinza, o que resultou no esfarelamento dos botões, devido à expansão da célula unitária. O ocorrido levou à morte de muitos soldados franceses, devido à exposição ao frio intenso. Nesse exemplo, podemos notar que a história poderia ser diferente se na época os franceses tivessem mais conhecimento de cristalografia e sobre as propriedades dos sólidos.

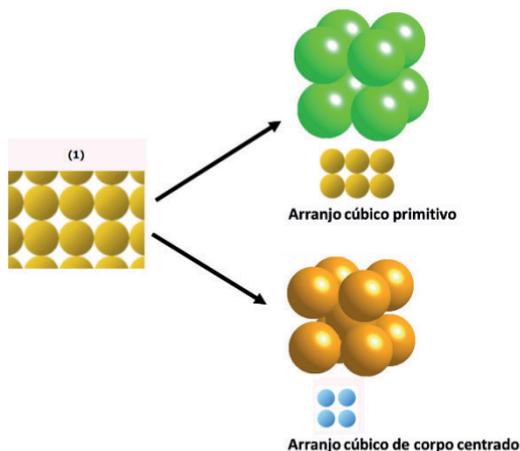
Figura 1.11 | Representação das células unitárias do estanho branco e cinza



Fonte: <<http://engenheirodemateriais.com.br/tag/alotropia-do-estanho/>>. Acesso em: 9 set. 2017.

Para entendermos melhor como as células unitárias podem ser obtidas, vamos considerar os arranjos de esferas presentes na Figura 1.6, já discutidos no início desta seção. Considerando que todas as esferas tenham tamanhos iguais, a sobreposição dessas esferas em camadas dará origem a um arranjo **cúbico primitivo**, ou dependendo do espaçamento entre os elementos, haverá formação de um arranjo **cúbico de corpo centrado** (Figura 1.12). No caso do arranjo cúbico primitivo, 58% do volume da célula unitária é ocupado pelas esferas que a compõem, e do arranjo cúbico de corpo centrado, o empacotamento resulta em 68% do volume total a ser ocupado pelas esferas (espécies químicas).

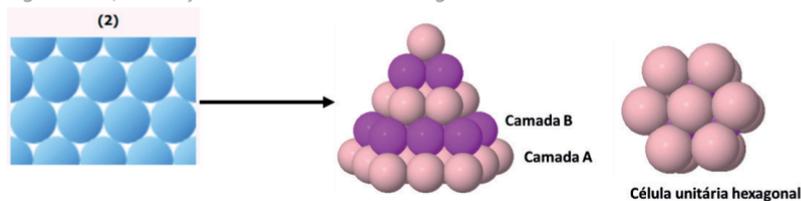
Figura 1.12 | Formação das células unitárias cúbica primitiva e cúbica de corpo centrado



Fonte: adaptada de Ávila (2016, p. 10).

Considerando o empacotamento dos átomos de forma mais eficiente (Figura 1.6, modelo 2), as diferentes disposições das camadas esféricas que irão se sobrepor darão origem às células unitárias **cúbicas de face centrada** ou **hexagonal**. Para a formação da **hexagonal** (Figura 1.13), a camada de esferas B se sobrepõem à camada de esferas A, de modo que B ocupe os vãos da camada A. Denominamos esse tipo de **empacotamento do tipo ABA**.

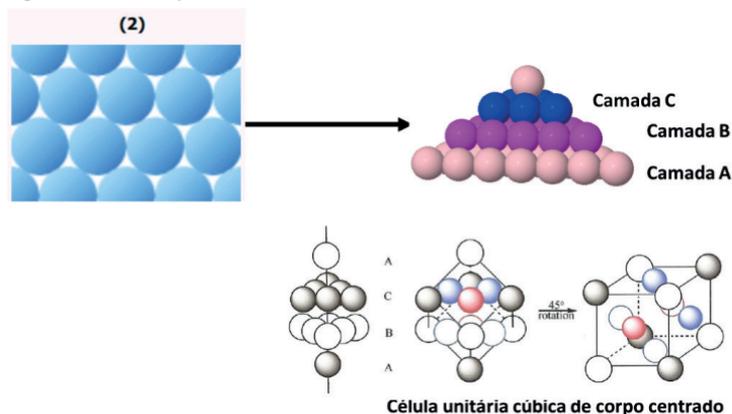
Figura 1.13 | Formação da célula unitária hexagonal



Fonte: adaptado de Ávila (2016, p. 11).

Já no caso da célula unitária **cúbica da face centrada**, temos a disposição de três camadas de esferas (camada A, B e C), de modo que a camada B ocupe os vãos da camada A, e a camada C ocupe os vãos da camada B, o que resulta em um **empacotamento do tipo ABC** (Figura 1.14).

Figura 1.14 Formação da célula unitária cúbica de face centrada



Fonte: adaptado de Ávila (2016, p. 11).

Tanto a célula unitária hexagonal como a cúbica de face centrada apresentam um empacotamento no qual as esferas ocupam 74% do volume da célula unitária, o restante é ocupado por espaços vazios.

A maioria dos metais e das substâncias iônicas empregados na indústria apresentam células unitárias cúbicas do corpo centrado (ccc), cúbicas de face centrada (cfc) ou hexagonal (hc), por isso a importância de conhecer esses sistemas cristalinos.



Assimile

A maneira como as espécies químicas (átomos, íons ou moléculas) se distribuem no espaço reflete diretamente nas propriedades que as substâncias vão apresentar. Para entender melhor a química do estado sólido, consideramos que cada espécie química é representada por uma esfera. A maneira com que essas esferas se empacotam no espaço dará origem às diferentes unidades de repetição, que são denominadas células unitárias. Os ângulos e as dimensões das células unitárias são definidos pelos parâmetros de rede e , por meio desses parâmetros, teremos sete sistemas cristalinos diferentes, os quais originarão quatorze células unitárias diferentes.



Pesquise mais

Prezado(a) aluno(a), como você pode notar, o entendimento das estruturas cristalinas envolve a descrição de alguns modelos que representam o empacotamento dos átomos, considerando as propriedades microscópicas. Dentro desse contexto, para melhor auxiliá-lo, consulte os vídeos presentes nos links a seguir. O primeiro envolve a formação de estruturas cristalinas de metais e o grau de empacotamento das células unitárias. Recomendamos que você assista aos 10 minutos iniciais do vídeo. Já o segundo aborda com mais detalhes a formação e as características das estruturas do tipo ccc, cfc e hexagonal.

- 1) Células unitárias cúbicas CCC, CFC e CS, dedução de arestas e número de coordenação. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=2s_TjH1teOI>. Acesso em: 28 set. 2017.
- 2) Ligação Metálica, Coesão do Reticulo Cristalino, Volume Ocupado da Cella Unitária. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=_JDspjOnjiw>. Acesso em: 28 set. 2017.

No endereço <www.quimica3d.com>, da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), é possível encontrar animações que mostram a formação da célula unitária de diversos minerais. Consulte!

Sem medo de errar

Prezado aluno, vamos relembrar a situação-problema que lhe foi proposta nesta seção. Vamos considerar que você é o responsável por um laboratório de análise de materiais. Esse laboratório recebe, frequentemente, amostras de minerais para análise, com o objetivo principal de determinar os arranjos cristalinos (célula unitária), e também é responsável por ensaios de cunho forense. Uma indústria que apresenta parceria com seu laboratório solicitou uma análise de uma joia para que seja verificada sua originalidade. Você sabe que, para realização deste estudo, deverá elaborar uma metodologia de análise que traga informações a respeito da estrutura cristalina e do material analisado, de modo que possa dar uma caracterização completa do material.

Durante o planejamento desta análise, você ressalta a importância de uma análise macroscópica da amostra, uma vez que a aparência física dela pode trazer informações sobre sua estrutura cristalina. Dentro dessa análise macroscópica, você determinou os seguintes parâmetros: cor, aparência física, transparência, densidade e brilho. Você sabe que por meio do valor de densidade obtido é possível relacionar o empacotamento das espécies químicas à sua célula unitária, uma vez que, quanto mais espaços vazios na estrutura do material, menor será sua densidade. Essas informações lhe auxiliaram na determinação de célula unitária, uma vez que o grau de empacotamento é característico da maneira como os átomos se agrupam. Para confirmar as informações obtidas por essa análise macroscópica, você também planejou a realização de um ensaio de difratometria de raio X.

A indústria solicitante lhe forneceu informações sobre a composição química do material recebido, o que lhe auxiliou na determinação da estrutura cristalina. Os testes que você realizou permitiram determinar a célula unitária do material, o que, em conformidade com a composição química, permitiu a caracterização completa do material analisado. Você sabe que esse seu estudo é muito importante para que a empresa possa não só verificar a originalidade do material recebido, como também entender melhor suas propriedades, pois estas estão relacionadas de forma direta com a estrutura do material.

Não se esqueça de que agora você deve apresentar os resultados na forma de um relatório, o que auxiliará a empresa a direcionar o material para uma aplicação tecnológica adequada ou um processamento industrial adequado.

Esfarelamento do estanho (Sn)

Descrição da situação-problema

Uma empresa comprou 10 quilos de estanho (Sn) de uma indústria produtora localizada em São João Del Rey. Essa empresa utiliza o metal em um processo que demanda resfriamento. Durante a aplicação desse metal para o fim desejado, a empresa percebeu que ele se desintegrava, o que levava a um desgaste do material e ao aumento do consumo de estanho. Visando melhor compreender o problema, a empresa realizou testes químicos do material comprado antes e após o uso e verificou que ambos apresentavam a mesma composição química, mas a aparência e as propriedades físicas eram muito diferentes. Para resolver esse problema, ela contratou um laboratório de análise de materiais e você é o responsável por realizar esse estudo. Quais testes você faria? Como as informações preliminares já obtidas pela empresa (teste químico, por exemplo) poderiam lhe ajudar a solucionar o problema?

Resolução da situação-problema

Para resolver esse problema, você deve analisar informações passadas pela empresa, como o teste químico, e também solicitar a amostra do material antes e após a aplicação. Sabendo que a composição química é a mesma, você deve informar à empresa que pode ter ocorrido uma modificação do arranjo estrutural do estanho devido à mudança de temperatura.

Você sabe que o estanho pode apresentar células unitárias com arranjos diferentes, e esses arranjos dependem das condições de pressão e temperatura do sistema. Se a mudança de estrutura resultar na expansão do arranjo atômico, será observada a desintegração ou o esfarelamento do material. Para poder sustentar essas desconfiças, você deve realizar testes de propriedades físicas dos dois materiais e também um ensaio de difratometria de raio X para verificar se as células unitárias eram iguais. Além disso, também deve fazer simulações a partir do material original, considerando que ele passe por processos de aquecimento e resfriamento. A partir dessas simulações, analise as

propriedades do material e forneça para a empresa as condições de temperaturas ideais para que o estanho não perca suas propriedades de interesse.

Faça valer a pena

1. Muitos sólidos iônicos e metálicos podem ser considerados como construídos a partir de entidades, tais como átomos e íons, representados como esferas rígidas. Essas esferas estão livres para se empacotarem tão próximas quanto a geometria permitir. Um empacotamento mais eficiente ou compacto resultará no _____ de espaço não ocupado pelas esferas, resultando em uma estrutura _____.

Assinale a alternativa que completa a frase corretamente.

- a) máximo, menos densa.
- b) mínimo, menos densa.
- c) mínimo, mais densa.
- d) máximo, mais densa.
- e) máximo, pouco organizada.

2. Definimos por **célula unitária** a menor unidade que se repete e que tem todas as características de simetria da forma organizada espacial dos átomos. Elas são derivadas de **sistemas cristalinos**, sendo estes definidos por três eixos a , b e c e pelos ângulos interaxiais α , β e γ e seus complementos.

Considerando um **sistema cristalino cúbico**, foram feitas algumas afirmações:

I. No caso de uma célula unitária cúbica primitiva, sua formação envolve uma estrutura de empacotamento de esferas que minimiza os espaços vazios.

II. Apresentam os seguintes parâmetros de rede: $a=b=c$ e $\alpha=\beta=\gamma$.

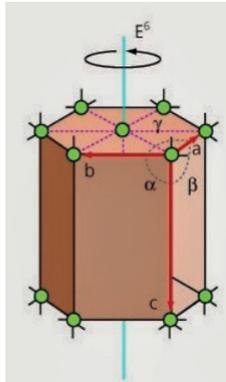
III. A célula unitária cúbica de face centrada é a que apresenta maior empacotamento, considerando os sistemas cristalinos cúbicos

Assinale a alternativa que apresenta as afirmações corretas.

- a) I, II e III.
- b) I e II, apenas.
- c) I e III, apenas.
- d) III, apenas.
- e) II e III, apenas.

3. Ao relacionar os parâmetros de rede (ângulos e dimensões das células unitárias), considerando um sistema tridimensional, com o resultado da simetria da estrutura, temos a ocorrência de sete sistemas cristalinos.

A figura a seguir representa um sistema cristalino hexagonal:



Fonte: <<http://ciencia-bizarra.blogspot.com.br/2014/08/el-ano-internacional-de-la.html>>. Acesso em: 10 set. 2017.

A respeito dos parâmetros de rede e dos elementos de simetria desse sistema cristalino, assinale a alternativa correta:

- a) Todas as dimensões da célula unitária são iguais.
- b) Todos os ângulos entre internos são iguais a 90° .
- c) Apresenta um eixo de rotação de ordem seis.
- d) Não apresenta nenhum elemento de simetria e todos os ângulos internos são iguais a 45° .
- e) Todas as suas dimensões são diferentes.

Seção 1.3

Estrutura e propriedades dos sólidos iônicos e metálicos

Diálogo aberto

Prezado aluno, na seção anterior, você conheceu um pouco mais sobre as estruturas cristalográficas dos materiais sólidos e, provavelmente, deve ter notado como é importante conhecermos essas estruturas para entendermos melhor como é o comportamento do material, o que pode auxiliar você na decisão de como melhor destiná-lo industrialmente, ou seja, como decidir qual a melhor aplicação tecnológica dele.

Para que você entenda ainda mais a importância da estrutura cristalográfica de um material, vamos considerar que você é o responsável em um laboratório de caracterização de materiais que recebeu uma amostra de um mineral para análise. Essa análise foi solicitada por uma indústria química, a mesma mencionada no item *Convite ao Estudo*. Lembra-se? A empresa solicitante já havia realizado alguns estudos iniciais do material, concluindo que se tratava de um material metálico. Você foi responsável pela caracterização dessa amostra. Para isso, foi recomendado que você realizasse um ensaio de difratometria de raio X. Quais informações esse ensaio poderá trazer? Como você faria a determinação da densidade do material? Seria possível determinar a massa atômica do metal?

A resolução desses questionamentos irá fazer com que você realize a terceira etapa do seu estudo, proposto no “Convite ao Estudo” da unidade. Lembrando que este estudo foi dividido em três etapas, as quais envolviam a determinação da natureza química do material, determinação da estrutura cristalina e determinação da densidade do material.

A realização deste estudo permitirá melhor conhecer as propriedades dos minerais e também auxiliar na aplicação industrial, por exemplo, que o mineral será submetido. Sendo assim, você deverá, agora, apresentar esse estudo na forma de um relatório, contendo detalhadamente a descrição das propriedades dos minerais que você determinou por meio de análises macroscópicas e de ensaios.

Não pode faltar

Conforme vimos na Seção 1, os metais apresentam brilho, são maleáveis, apresentam ductibilidade e são condutores de eletricidade. Todas essas características são explicadas por meio do modelo "mar de elétrons", que mostra como ocorre a ligação entre os metais. O que faremos agora é compreender melhor como os átomos dos metais se estruturam e como isso pode interferir em suas propriedades particulares.

Estudos mostram que muitos elementos metálicos possuem estruturas derivadas de um empacotamento compacto (mais eficiente). Uma consequência disso é que a maioria dos metais apresenta alta densidade, uma vez que, nesse tipo de empacotamento, a maior parte da massa está empacotada dentro do menor volume possível, resultando em uma estrutura com um número menor de espaços vazios. Grande parte dos elementos inferiores do bloco d da tabela periódica (metais de transição), próximos ao irídio e ao ósmio, correspondem aos sólidos de maior densidade já encontrados, devido à combinação da elevada massa molar e de um empacotamento compacto de seus átomos na estrutura cristalina.

Arranjos estruturais tridimensionais diferentes com a mesma estequiometria são, muitas vezes, observados nas estruturas de empacotamento compacto. O tipo de estrutura que um metal irá apresentar dependerá de detalhes da estrutura eletrônica de seus átomos, da extensão da interação entre os átomos vizinhos na estrutura e dos efeitos residuais do caráter da ligação. É importante ressaltar que, dependendo da extensão da eletrosfera (quantidade de níveis eletrônicos), a ligação entre os metais perde um pouco do caráter metálico e ganha uma certa tendência à covalência, o que refletirá na estrutura.

Na realidade, apesar de que na seção anterior abordamos os empacotamentos compactos considerando o empilhamento das camadas do tipo ABA ou ABC, há uma variação infinita de combinações de camadas que pode ocorrer na estrutura de um material metálico. Assim, as camadas podem se empilhar em uma repetição complexa ou mesmo sem uma sequência determinada. Você já deve ter notado que as sequências podem variar, mas não podem ser aleatórias, pois camadas adjacentes não podem ter esferas exatamente nas mesmas

posições, portanto, repetições do tipo AA, BB ou CC não são possíveis. As esferas de uma camada devem ocupar as depressões da camada vizinha. Um exemplo de uma estrutura que apresenta complexidade desse tipo é o elemento cobalto (Co). Acima de 500 °C, esse elemento apresenta uma estrutura com empacotamento compacto hexagonal, porém, quando é resfriado, sofre uma transição apresentando uma estrutura na qual a combinação das camadas não apresenta uma sequência estabelecida, mas continua apresentando um empacotamento compacto, entretanto, agora, com um ordenamento cúbico. A Tabela 1.2 mostra as estruturas cristalinas dos metais sob condições normais. É possível notar que grande parte delas é derivada de um empacotamento compacto.

Tabela 1.2 | As estruturas cristalinas adotadas pelos metais sob condições normais

Estrutura cristalina	Elementos
Empacotamento compacto hexagonal (ech)	Be, Cd, Co, Mg, Ti e Zn
Empacotamento compacto cúbico (ecc)	Ag, Al, Au, Ca, Cu, Ni, Pb, Pt
Cúbica de corpo centrado (ccc)	Ba, Cr, Fe, W e metais alcalinos
Cúbica primitiva (cúbica P)	Po

Fonte: Atkins e Shriver (2008, p. 100).

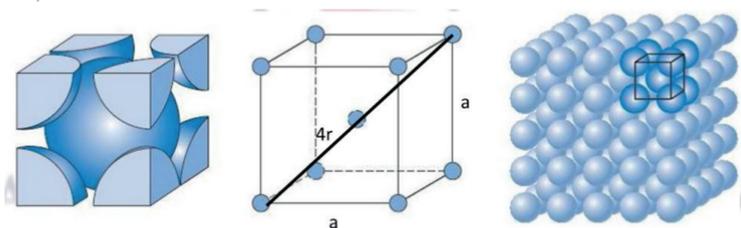
Alguns outros padrões de empacotamento usam o espaço da célula unitária de forma quase tão eficiente como uma estrutura de empacotamento compacto. Mesmo os metais que são de empacotamento compacto podem sofrer uma transição de fases quando são aquecidos, devido às vibrações de grande amplitude que ocorrem na estrutura. O resultado disso é a diminuição do grau de empacotamento, que cai de 74% para 68%, gerando um arranjo do tipo **cúbico de corpo centrado**. A estrutura metálica menos comum é a estrutura cúbica primitiva, observada apenas no elemento polônio.



Exemplificando

Vamos exemplificar agora como é determinado o grau de empacotamento das estruturas cristalinas. Para isso, vamos considerar uma estrutura cúbica de corpo centrado, sobre a qual sabemos que o grau de empacotamento é de 68%. Vamos calcular e mostrar como é possível obter esse valor. Para isso, observe as imagens presentes na Figura 1.15.

Figura 1.15 | Diferentes representações de uma célula unitária cúbica de corpo centrado



Fonte: adaptada de <<http://slideplayer.com.br/slide/9498722/>>. Acesso em: 11 set. 2017.

Nosso primeiro passo é determinar o número de esferas presentes na célula unitária. Para isso, vamos observar a representação da esquerda presente na Figura 1.15. Temos oito vértices na célula unitária. A porção de cada esfera que está realmente dentro da célula unitária corresponde a $1/8$ da esfera como um todo. Como temos oito vértices, somando todas as porções das esferas que compõem os vértices, teremos ao todo uma esfera ($8 \times 1/8$). Não podemos esquecer que dentro do cubo há uma esfera inteira, portanto, temos, ao todo, duas esferas na célula unitária. Como cada esfera apresenta um volume igual a $v = \frac{4\pi}{3} r^3$, o volume ocupado pelas esferas na célula unitária cúbica de corpo centrado será o dobro desse valor, portanto, $v = \frac{8\pi}{3} r^3$. Lembrando que r é o raio da esfera. Três esferas estão em contato ao longo da diagonal que atravessa a célula unitária de um vértice até outro, com um comprimento total de $4r$. O comprimento da diagonal de um cubo de lado a é dado por $\sqrt{3}a$. Assim, podemos obter uma relação entre a aresta do cubo e o raio da esfera, cuja qual será $a = \frac{4r}{\sqrt{3}}$. Como o volume de um cubo é determinado pelo valor de sua aresta ao cubo, podemos dizer que o volume total do cubo será $v = \left(\frac{4r}{\sqrt{3}}\right)^3$. Para determinar o grau de empacotamento, basta dividir o volume ocupado pelas esferas pelo volume total do cubo, logo:

$$\frac{\frac{8\pi}{3} r^3}{\left(\frac{4r}{\sqrt{3}}\right)^3} = 0,68 \text{ ou } 68\%$$

Você pode usar o mesmo raciocínio para determinar o grau de empacotamento das estruturas cúbicas primitiva e de face centrada.

Na Seção 1 desta unidade, falamos brevemente sobre as propriedades dos compostos iônicos (quebradiços, alto ponto de fusão e geram soluções condutoras quando dissolvidos em água) e explicamos essas propriedades em função da maneira como as espécies químicas estão ligadas, considerando as forças de atração e de repulsão existentes. Agora, daremos continuidade a esse estudo, abordando as estruturas dos compostos iônicos, ou seja, vamos entender como os cátions e ânions estão agrupados para formar uma estrutura iônica. Como agora temos espécies carregadas, temos que considerar a existência de forças de atração e repulsão, ou seja, as esferas devem estar empacotadas de modo a maximizar as forças de atração e minimizar as forças de repulsão (minimizando o contato de íons de carga com mesmo sinal).

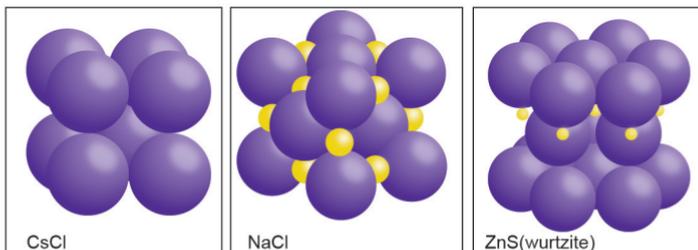
Normalmente, como os ânions estão com elétrons excedentes, eles são maiores do que os cátions. Os **ânions são esferas grandes**, então, podem se agrupar, formando uma estrutura de empacotamento compacto (semelhante aos metais), porém essa estrutura sofre expansão devido às forças de repulsão. Os **cátions, que normalmente são menores**, ocupam os interstícios (espaços vazios) da estrutura formada pelo agrupamento dos ânions. Como os ânions se agrupam em um sistema expandido, os interstícios são maiores. Devido às forças de repulsão, nas estruturas iônicas, os interstícios representam "buracos aumentados".

A Figura 1.16 mostra as representações de algumas estruturas iônicas. No caso, a espécie química de maior tamanho, geralmente o ânion, perfaz a estrutura principal de empacotamento, enquanto a espécie química menor ocupará os interstícios da estrutura (espaços vazios).

Vamos explicar uma estrutura cristalina bastante interessante, que é a estrutura do cloreto de cézio (CsCl). Observe a Figura 1.17. Ela é uma representação com maiores detalhes do CsCl presente na Figura 1.6. Possivelmente, você deve ter observado a figura e ter dito que se trata de uma estrutura cúbica de corpo centrado, certo? Realmente, essa confusão ocorre, mas não podemos esquecer do que foi dito anteriormente: a estrutura é formada pelo arranjo da espécie química maior, enquanto a espécie menor ocupa os interstícios. Assim, nesse exemplo, a estrutura principal é constituída pelos ânions cloreto, sendo um em cada vértice do cubo. A esfera que está no centro é referente

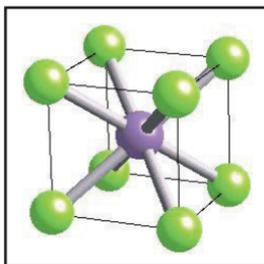
ao céσιο na forma catiônica, que está ocupando um interstício. Sendo assim, temos uma estrutura cúbica primitiva formada pelos ânions, e não uma estrutura cúbica de corpo centrado.

Figura 1.16 | Representação de células unitárias iônicas com a espécie química menor ocupando os interstícios



Fonte: adaptada de Constantino e Silva (2011, p. 10).

Figura 1.17 | Representação da célula unitária do cloreto de céσιο (CsCl)



Fonte: adaptada de Constantino e Silva (2011, p. 10).



Assimile

As estruturas dos compostos metálicos e iônicos são formadas considerando o modelo de empacotamento de esferas. A diferença principal entre as estruturas de ambos os materiais é que nos compostos iônicos temos a expansão da célula unitária devido às forças de repulsão existentes entre esferas de mesma carga. A determinação da estrutura base é definida pelo empacotamento das esferas maiores, que geralmente são os ânions. As esferas menores se alocam nos espaços vazios existentes, ou seja, nos interstícios.



Hoje, por meio do avanço da ciência, conhecemos uma infinidade de estruturas cristalinas. Você já parou para pensar como elas foram determinadas experimentalmente? Como conhecemos e sabemos identificar essas estruturas? Como a cristalografia contribuiu para o entendimento e a determinação das células unitárias?

Lei de Bragg e difração de raio X

Prezado aluno, você já imaginou como ondas poderiam revelar a estrutura atômica de cristais? Para entender isso melhor, vamos apresentar a você a **Equação de Bragg**. Essa equação surgiu com o objetivo de explicar porque as faces clivadas de cristais refletem feixes de raio X a certos ângulos de incidência, denominado como ângulo teta (θ). A equação é dependente de uma variável d que define a distância entre as camadas atômicas de um cristal, assim como de uma variável lambda (λ) que representa o comprimento de onda do feixe de raio X incidente e também de um número inteiro representado por n , que apresenta o número de planos de átomos presentes na estrutura do material, também denominado por ordem de difração ($n= 1,2,3$).

$$\text{Equação de Bragg: } n\lambda = 2d\text{sen}\theta$$

Os raios X compreendem um tipo de radiação eletromagnética que apresenta comprimento de onda que varia de 0,01 a 10 nm. Eles são produzidos a partir de transições eletrônicas dos elétrons presentes na camada K do átomo.

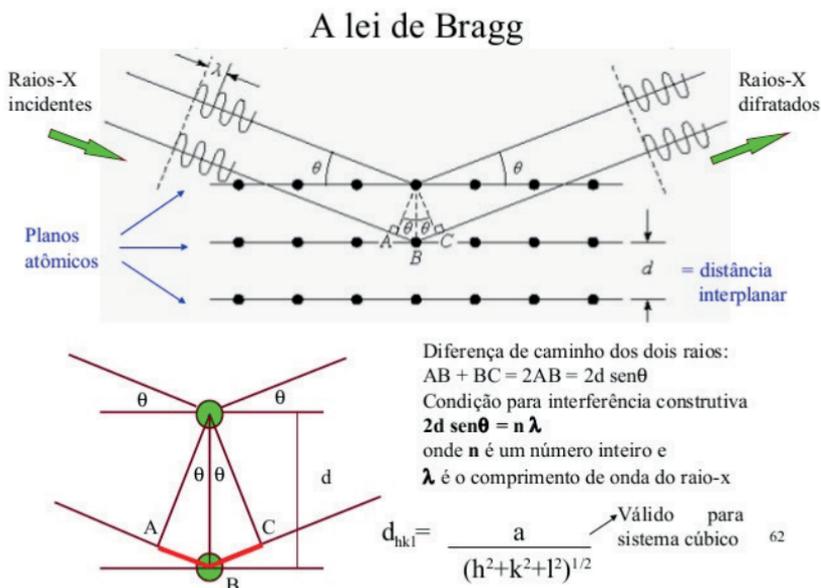
A técnica de difração de raio X representa um dos métodos mais importantes para a determinação estrutural de compostos inorgânicos. O método permite a determinação inequívoca das posições dos átomos e íons que constituem um composto e, assim, permite a descrição da estrutura, fornecendo detalhes sobre o comprimento da ligação, ângulos e posições relativas aos íons nas células unitárias. Os dados estruturais obtidos são interpretados em termos de raios atômicos ou iônicos, permitindo realizar uma previsão das estruturas e, assim, explicar as tendências e diversas propriedades atribuídas ao material.

O espalhamento da radiação com comprimento de onda próximo a 100 pm pelos cristais origina a difração. A interpretação dos padrões de difração permite a extração de informações estruturais, podendo permitir a determinação da estrutura completa do material. Trata-se de uma técnica muito empregada em mineralogia, pois permite a distinção de materiais que apresentam a mesma composição química, mas fórmula estrutural diferente.

Vamos entender o que é **difração**! Na realidade, é a interferência entre ondas, o que ocorre como resultado da presença de um objeto no caminho dessas ondas. Os raios X são espalhados pelos elétrons dos átomos que compõem o material e a difração pode ocorrer considerando um arranjo periódico de centros espalhadores separados por distâncias semelhantes às do comprimento de onda da radiação, tais como os que existem nos cristais.

Se considerarmos que o espalhamento é equivalente à reflexão por dois planos paralelos separados por uma distância d , conforme ilustrado na Figura 1.18, então o ângulo para o qual a interferência construtiva pode ocorrer entre é determinado pela **Equação de Bragg**.

Figura 1.18 | Representação do fenômeno de difração de raio x

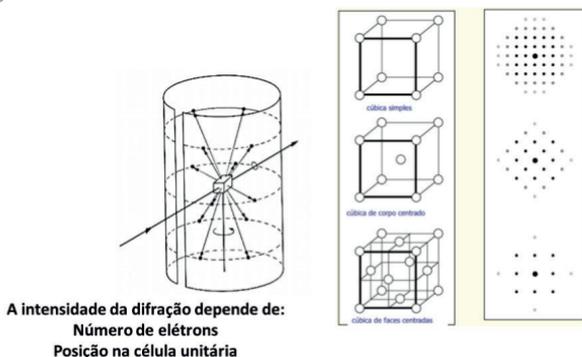


Fonte: <<https://pt.slideshare.net/guilhermecuzzuol9/estrutura-cristalina-37503063>>. Acesso em: 11 set. 2017.

A intensidade da difração depende de detalhes da estrutura do cristal, assim como da natureza química dos átomos. A facilidade de os átomos espalharem raio X é dependente da quantidade de elétrons que o elemento possui e também das posições desses átomos na célula unitária. A medida dos ângulos de difração e das intensidades de radiação que sofreram difração permite que se obtenham conclusões sobre a célula unitária do material em questão.

A Figura 1.19 representa os cones de difração de raio X obtidos por sistemas cristalinos diferentes (cúbico primitivo, cúbico de face centrada e cúbico de corpo centrado). É possível observar nitidamente as diferenças obtidas por meio da radiação difratada.

Figura 1.19 | Representação dos cones de difração obtidos por meio de materiais com diferentes arranjos cristalinos



Fonte: adaptada de Constantino e Silva (2011).

Pesquise mais

Prezado aluno, para que você entenda um pouco mais sobre difração de raio X e também como as estruturas cristalinas podem ser determinadas e interpretadas, acesse o site do Laboratório Nacional de Luz Síncroton. Nele, você encontrará vídeos e artigos que mostram as principais aplicações da radiação eletromagnética e também inovações e pesquisas dentro da área de cristalografia.

Disponível em: <<http://lnls.cnpem.br/>>. Acesso em: 14 nov. 2017.

Encerramos aqui os conceitos-chave apresentados nesta unidade. Estudamos os fundamentos básicos de mineralogia e cristalografia, enfatizando as principais diferenças relacionadas à natureza química do mineral (metálico, iônico e covalente) e também como as diferenças atribuídas à estrutura cristalina do mineral podem refletir em suas propriedades. Os conhecimentos adquiridos sobre difratometria de raio X poderão ajudá-lo também a melhor caracterizar os minerais do ponto de vista estrutural. Os conhecimentos básicos de cristalografia serão muito importantes em atuação profissional, pois contribuirá para auxiliá-lo a caracterizar os diferentes materiais sólidos e, assim, destinar esses materiais a diversas aplicações tecnológicas em função de suas propriedades.

Sem medo de errar

Caro aluno, você se lembra da situação-problema que foi proposta no início desta seção? Vamos retomá-la! Você é o responsável em um laboratório de caracterizações de materiais. Lembra-se? E recebeu uma amostra de um mineral de uma indústria química para análise. A mesma indústria que abordamos no item “Convite ao Estudo”, logo no início desta unidade. Lembra-se dela também? Essa empresa já havia feito alguns estudos do material a ser analisado e concluiu que se tratava de um material metálico. Possivelmente, ela chegou a essa conclusão por meio de uma análise macroscópica e também das propriedades físicas do material, lembrando que metais apresentam brilho, são maleáveis, dúcteis e conduzem eletricidade. A empresa solicitou informações a respeito da estrutura cristalina deste material ao laboratório que você é responsável.

Para isso, você realizou a técnica de difratometria de raio x, pois, como responsável, você sabe que o espalhamento da radiação em questão pode trazer informações conclusivas a respeito da célula unitária do material.

Por meio das informações obtidas, você também determinou a densidade do metal, considerando a estrutura de empacotamento da célula unitária, o que corroborou os dados experimentais que a indústria já havia realizado. A densidade do material foi determinada por meio de medidas de massa e volume da amostra fornecida.

Conhecendo a célula unitária e os parâmetros de rede, você também conseguiu fornecer a massa atômica do metal e, conseqüentemente, concluir seu trabalho caracterizando o material tanto do ponto de vista de composição química quanto do ponto de vista de informações estruturais.

Você saberia detalhar como a conclusão desse trabalho foi possível? Como vimos nesta seção, a difratometria de raio X permite determinar a célula unitária e os parâmetros de rede. Vamos pontuar alguns itens para que você reflita sobre as informações complementares que esse ensaio pode fornecer:

- Se você conhece a célula unitária, é possível determinar o volume ocupado por ela. Discutimos isso no item *Exemplificando*.
- Se você conhece a célula unitária, é possível calcular o número de átomos existentes nela.
- Sabemos que 1 mol de átomos corresponde a 6×10^{23} átomos, portanto, conhecendo o número de átomos existentes na célula unitária, você pode calcular o volume ocupado por 1 mol de átomos.

Analisando essas informações e tendo em mãos a densidade do metal que você determinou experimentalmente, você relacionou o volume de um mol com a densidade e determinou a massa correspondente. Essa massa é a massa atômica e, por meio da consulta em uma tabela periódica, você conseguiu identificar a qual metal essa massa corresponde.

Agora, ao final do estudo das três seções desta unidade, você deve consolidar e apresentar os resultados na forma de um relatório que contenha todas as etapas realizadas. São elas:

- Etapa 1: Determinação da natureza química do mineral: iônico ou metálico.
- Etapa 2: Determinação da estrutura cristalina e das dimensões da célula unitária.
- Etapa 3: Determinação da densidade.

Mãos à obra e bom trabalho!

Avançando na prática

Aplicando a cristalografia na descoberta de novos materiais

Descrição da situação-problema

Você trabalha no setor de pesquisa e desenvolvimento de uma empresa que produz novos materiais. Visando a uma determinada aplicação em especial, você modificou as condições experimentais envolvidas na síntese de um óxido metálico, que é produzido a partir de um mineral. Após as novas condições de síntese, você observou algumas mudanças na aparência e nas propriedades físicas do óxido metálico, entretanto, você necessita realizar uma caracterização completa do material, incluindo a determinação da estrutura cristalina. Como seria possível a determinação da célula unitária? De que maneira as informações estruturais poderiam contribuir a respeito da aplicação do novo material sintetizado?

Resolução da situação-problema

No laboratório em que você trabalha, há um difratômetro de raio X para auxiliar na caracterização dos materiais. Assim, você utilizou essa técnica para obter informações sobre a estrutura cristalina, conseguindo dados sobre os parâmetros de rede presentes na célula unitária do óxido metálico. Você sabe que o conhecimento sobre as informações estruturais é muito importante para compreender as propriedades do sólido, portanto, esse ensaio permitiu auxiliar você quanto à aplicação industrial e tecnológica que esse material poderá ser submetido na sua empresa.

Faça valer a pena

1. Grande parte dos metais apresenta seus átomos organizados em um empacotamento compacto, o que reflete em suas propriedades, principalmente na densidade que normalmente é elevada.

Quando um metal que apresenta um empacotamento compacto é aquecido, seus átomos apresentam vibrações, e a consequência disso é a diminuição do grau de empacotamento, gerando uma estrutura:

- a) Hexagonal.
- b) Cúbica primitiva.
- c) Cúbica de corpo centrado.
- d) Cúbica de face centrada.
- e) Romboédrica.

2. O modelo de empacotamento de esferas é utilizado para explicar como ocorre a estruturação dos elementos (átomos ou íons) que compõem um sistema iônico ou metálico.

As substâncias iônicas apresentam células unitárias _____, pois é necessário _____ as forças de _____ existentes entre as espécies de carga de mesmo sinal.

Assinale a alternativa que melhor completa a frase acima.

- a) expandidas, minimizar, repulsão.
- b) reduzidas, minimizar, repulsão.
- c) expandidas, intensificar, repulsão.
- d) reduzidas, intensificar, atração.
- e) expandidas, minimizar, atração.

3. Por volta de 1912, Max von Laue concebeu a possibilidade de realizar difração de raios X utilizando uma estrutura cristalina como rede de difração tridimensional. As primeiras experiências foram realizadas por dois alunos de Laue, Walter Friedrich e Paul Knipping. Logo depois, William Henry Bragg e seu filho, William Lawrence Bragg, demonstraram a relação, que passou a ser conhecida como Lei de Bragg, fundamental para o estudo de estruturas cristalinas com o uso da difração de raios X.

(Fonte: <https://www.if.ufrgs.br/tex/fis142/fismod/mod05/m_s03.html>. Acesso em: 11 set. 2017.)

A difração de raio X é uma técnica que contribuiu muito para o avanço da cristalografia e da química do estado sólido, pois:

- a) Permite a distinção da composição química de um sólido.
- b) Permite distinguir se um sólido é iônico ou metálico, não relacionando essas informações com a célula unitária do material.
- c) Permite determinar com precisão o número de elétrons de um átomo.
- d) Permite obter informações sobre a célula unitária dos sólidos.
- e) Permite, exclusivamente, distinguir um sólido amorfo de um sólido cristalino.

Referências

ATKINS, A.; SHRIVER, D. **Química Inorgânica**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2008.

ATKINS, P.; JONES, L. **Princípios de Química**: questionando a vida moderna e o meio ambiente. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2011.

ÁVILA, S. G. **Estruturas e propriedades dos sólidos iônicos e moleculares**. Química Inorgânica, 2016.

CONSTANTINO, V. R.; SILVA, D. O. **Introdução à Química dos Materiais Inorgânicos**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2011.

SCHNEEGANS, S. **Cristalografia e Aplicações**: no íntimo da matéria. Disponível em: <http://www.iycr2014.org/___data/assets/pdf_file/0011/98309/Cristalografia-e-aplicacoes_no-intimo-da-materia_final-2.pdf>. Acesso em: 27 ago. 2017.

Fundamentos de mineralogia

Convite ao estudo

Caro aluno! Nesta unidade, aprofundaremos nosso estudo sobre os minerais que estão presentes em muitos aspectos do nosso cotidiano, sendo importantes tanto para termos a tecnologia atual quanto para a fabricação de medicamentos.

Ao final desta unidade, você terá conhecido as propriedades e a classificação dos minerais (que dependem de sua composição química), de maneira que possa planejar análises e caracterizar os diferentes minerais. Sendo assim, imagine que você tenha sido recentemente contratado por um laboratório, o qual, dentre outros serviços, analisa minerais industriais. Uma indústria solicitou ao laboratório quais análises são necessárias para a caracterização de minerais, como hematita (Fe_2O_3), fluorita (CaF_2) e talco ($\text{Mg}_6(\text{Si}_8\text{O}_{20})(\text{OH})_4$). Portanto, você deve conhecer as propriedades e a classificação dos minerais, além de como eles devem ser caracterizados e analisados. Para isto, o seu estudo será dividido em três etapas, as quais serão trabalhadas a cada seção da seguinte forma: Etapa 1 – conhecimento sobre as propriedades dos minerais; Etapa 2 – classificação dos minerais em grupos; Etapa 3 – indicação de ensaios e/ou análises para a caracterização dos minerais.

Sendo assim, ao término desta unidade, você estará apto para informar à indústria, por meio de um relatório, quais são as análises que poderão ser utilizadas para a caracterização de tais minerais. Além disso, com o conhecimento adquirido nesta unidade, você será capaz de responder a perguntas, como: o que são minerais? Como podemos identificá-los e diferenciá-los? Quais são as principais características dos diferentes grupos minerais? De que maneira podemos caracterizá-los física e quimicamente?

Para uma melhor concepção e construção do conhecimento, esta unidade está dividida em três seções. Na primeira seção,

abordaremos sobre a ocorrência mineral, suas propriedades e classificação de acordo com a composição química. Desta maneira, na Seção 2, conseguiremos detalhar os diferentes grupos minerais, como os silicatos, carbonatos e sulfatos. Por fim, estudaremos de que maneira os minerais podem ser caracterizados macroscópica e microscopicamente, além de apresentarmos alguns ensaios possíveis para uma completa caracterização mineral.

Seção 2.1

Origem e propriedades dos minerais

Diálogo aberto

Caro aluno, nesta seção continuaremos nosso estudo sobre os minerais. Você já viu anteriormente sobre a organização cristalina, não é mesmo? Veremos, aqui, que muitas propriedades físicas dos minerais estão intimamente relacionadas a este arranjo interno. Além disto, aprenderemos que a composição química também pode interferir nessas propriedades, e ainda serve para classificar os minerais em grupos. Para que o estudo seja ainda mais completo, iremos conhecer qual a origem desses materiais que são tão importantes no nosso dia a dia.

Neste momento, é conveniente lembrarmos o nosso contexto de aprendizagem, apresentado no Convite ao Estudo da unidade. Vimos que você é um dos responsáveis por um laboratório de análise mineral. Sabendo da importância das propriedades para análise mineral, você, como profissional responsável recém-contratado, decide, em sua primeira etapa do trabalho, realizar uma revisão sobre as principais propriedades e a composição química dos minerais. Desta forma, deve se questionar sobre, por exemplo: quais são os hábitos cristalinos mais comuns? Todos os minerais, quando finamente laminados, são translúcidos? Quais elementos químicos colaboram para a absorção seletiva da luz?

De que maneira você responderia a essas questões? Para auxiliá-lo neste desafio, abordaremos, ao longo desta seção, diversos conceitos relacionados com as propriedades mineralógicas, e também exemplificaremos muitas delas. Sendo assim, você deve ficar atento aos assuntos abordados para que seu entendimento seja pleno. Bom estudo!

Não pode faltar

Prezado aluno, você já sabe sobre cristalografia e elementos cristalográficos. Portanto, agora, é hora de darmos início ao estudo da mineralogia, no qual buscaremos aprender mais sobre os minerais e

suas classificações, além de melhor compreendermos a importância que o arranjo cristalino tem em suas propriedades.

Os minerais, que são constituintes de todas as rochas, são a base de muitos produtos que utilizamos e fornecem elementos para a nossa vida na Terra. A ida do homem à Lua teve uma forte influência do conhecimento sobre propriedades mineralógicas, por exemplo. Além disso, muitos dos recursos que utilizamos diariamente vêm dos minerais.



Pesquise mais

Recomendamos que você leia o artigo *A história humana e os minerais*, constante no box Conexões Culturais, do Capítulo 3, do livro *Fundamentos de Geologia*. Esse livro pode ser encontrado na Biblioteca Virtual, a qual pode ser acessada pelo link <<https://biblioteca-virtual.com>>. Acesso em: 29 nov. 2017.

WICANDER, R.; MONROE, J. S. **Fundamentos de Geologia**. São Paulo: Cengage Learning Edições, 2009. 508p.

Mas, afinal, qual é a definição de mineral? Apesar de diferentes conceitos, comumente, mineral é definido como uma substância sólida de ocorrência natural, inorgânica, que possui uma composição química específica e estrutura interna ordenada. Algumas substâncias têm sua origem relacionada a processos orgânicos, como pérola e âmbar, sendo estes, então, denominados mineraloides. Nesta mesma classificação, são incluídos os materiais amorfos, tais como vidro e carvão. Por outro lado, sólidos que possuem estrutura ordenada, mas que são produzidos sinteticamente, podem ser intitulados como minerais artificiais ou sintéticos. Um exemplo desse caso é o rubi sintético, produzido em laboratório, e que embora tenha um nome equivalente, não é considerado mineral, conforme a definição apresentada.

A origem do mineral está relacionada às condições do seu ambiente de formação. Desta maneira, minerais que se formam no interior do nosso planeta são diferentes dos que são formados na superfície terrestre, e estes, por sua vez, são diferentes dos minerais constituintes de corpos extraterrestres. Você deve se lembrar que os minerais são

ordenados de acordo com um arranjo tridimensional organizado, não é mesmo? Sendo assim, eles são formados pelo processo de cristalização, que nada mais é do que o crescimento de um sólido. Esse crescimento pode ocorrer a partir de um gás ou de um líquido, em que os átomos são agrupados de acordo com proporções químicas e arranjos cristalinos adequados.

No início do processo, ocorre a formação de cristais microscópicos, em que o arranjo tridimensional ordenado de átomos repete-se em todas as direções. As faces cristalinas, que são a expressão externa desse arranjo, são superfícies planas que limitam os cristais. As faces bem definidas em cristais têm sua origem atrelada a um crescimento lento e estável. Além disso, é necessário que o crescimento ocorra sem interferência, isto é, quando há espaço adequado. Porém, geologicamente falando, geralmente, os espaços entre os cristais que se encontram em crescimento já estão previamente preenchidos, ou então a cristalização ocorre com muita rapidez.

A cristalização é decorrente, sobretudo, da solidificação e da precipitação. Através da solidificação de um magma (rocha líquida quente), diferentes fases minerais são cristalizadas com o decréscimo da temperatura. Já a precipitação ocorre quando os líquidos (solvente) de uma solução evaporam, fazendo com que a concentração de soluto se torne saturada e inicie a precipitação na forma de fases minerais.



Exemplificando

Estes minerais originados pela evaporação são conhecidos como evaporíticos, sendo um exemplo clássico o sal de cozinha (cloreto de sódio).



Assimile

São considerados minerais apenas os sólidos de ocorrência natural e inorgânica e que possuem estruturas cristalinas específicas e composições químicas características. Aos demais materiais, nomeia-se mineraloides, ou minerais artificiais.

A *International Mineralogical Association* (em tradução livre, Associação Mineralógica Internacional) possui, atualmente, mais de 5.000 espécies minerais descritas ao redor do mundo. Como podemos observar, são muitos os minerais existentes. Mas então, como podemos diferenciá-los? Cada mineral é único, possuindo composição química e propriedades físicas bem definidas, sendo que a partir dessas características podemos diferenciá-los. As propriedades comumente utilizadas são: hábito, cor, traço, brilho, dureza, densidade, fratura e clivagem.

Hábito cristalino e **clivagem** são propriedades físicas que afirmam o ordenamento da estrutura interna dos minerais. O **hábito** é a forma geométrica externa exibida pelo mineral, sendo observado, principalmente, quando o crescimento ocorre em condições propícias. Muitos são os hábitos conhecidos (Figura 2.1), como cúbico, octaédrico, dentrítico, radiado, botrioidal etc., entretanto, os mais comuns são o laminar, prismático, fibroso, acicular, granular e equidimensional. Essas formas, além de dependerem da estrutura cristalina, também são indicativas da velocidade e direção de crescimento do cristal.

Figura 2.1 | Exemplos de hábito cristalino



Maciço e granular, como no mármore



Lamelar, foliado, micácio, como nas micas



Laminar, como na estibita



Fibroso, como no crisotilo



Acicular e radiado, como na millerita



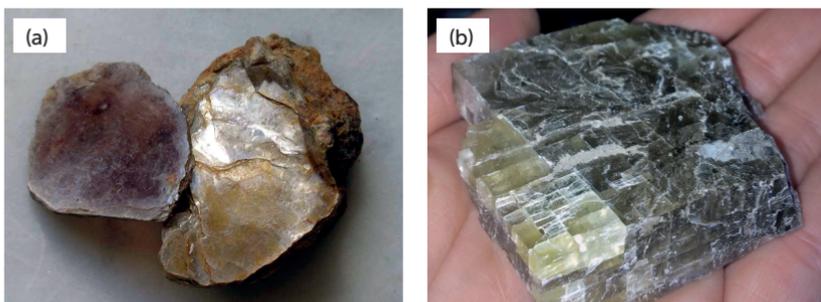
Radiado e globular, como na wavelita

Fonte: Klein e Dutrow (2012, p. 47).

Por outro lado, a **clivagem** é a tendência que o mineral possui em partir-se em planos paralelos, podendo ser classificada em perfeita, boa ou imperfeita. Essa propriedade é uma consequência da estrutura de cada cristal, uma vez que ocorre entre os planos que possuem ligações/interações fracas entre si. O número de planos e padrões de clivagem

é uma característica diagnóstica de vários minerais, como a moscovita ($KAl_2Si_3AlO_{10}(OH,F)_2$), que tem somente um plano de clivagem, e a calcita ($CaCO_3$), que possui três direções (Figura 2.2). Diferentemente, denomina-se **fratura** quando os cristais se quebram em superfícies irregulares, sendo essa uma propriedade que está relacionada à maneira como as forças de ligação/interação estão distribuídas em direções transversais aos planos cristalinos.

Figura 2.2 | Exemplo de clivagem em minerais. a) Clivagem em moscovita, sendo caracterizada por somente um plano (produzindo lascas); b) Clivagem em calcita, sendo caracterizada ao longo de três planos (produzindo cubos)



Fonte: (a) <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/19/Mineral_Mica_moscovita_GDFL107.jpg>; (b) <https://c1.staticflickr.com/6/5458/30466234330_c20ed08f86_b.jpg>. Acesso em: 30 set. 2017.



Refleta

Considerando que a perfeição das clivagens varia inversamente com a força das ligações, as ligações covalentes produzem, geralmente, qual tipo de clivagem? E as ligações iônicas?

A **dureza** é a resistência que um mineral apresenta ao ser riscado, sendo esta uma propriedade que também está relacionada com as ligações químicas existentes. Isto é, quanto mais fortes forem as ligações no mineral, mais duro ele será. Para a identificação dessa propriedade, utilizamos a Escala de Mohs (Quadro 2.1), que foi construída baseada na facilidade com que um mineral ou material risca os demais. Nesta escala, percebemos que a fluorita (CaF_2) possui dureza 4, enquanto que o talco ($Mg_6(Si_8O_{20})(OH)_4$) é o mineral mais mole, com dureza 1.

Quadro 2.1 | Escala de Mohs

Mineral	Dureza	Materiais comuns
Talco	1	
Gipsita	2	Unha
Calcita	3	
Fluorita	4	
Apatita	5	Lâmina de faca
Ortoclásio	6	Vidro de janela
Quartzo	7	
Topázio	8	
Corindon	9	
Diamante	10	

Fonte: adaptado de Press et al. (2006, p. 89).

A densidade, que é a massa por unidade de volume (gramas por centímetro cúbico g/cm^3 , por exemplo), é uma propriedade na qual a maioria dos minerais formadores de rocha é muito similar. Portanto, a **gravidade ou densidade relativa** é muito mais utilizada, pois é o peso do mineral no ar dividido pelo peso de um volume igual de água pura a 4 °C. Desta forma, um mineral com densidade relativa de 3 é três vezes mais pesado que a água. Essa é uma propriedade que depende tanto da composição quanto da estrutura de um mineral. Aqui, podemos citar como exemplo o ouro (Au) e a magnetita (Fe_3O_4) cujas densidades relativas são de 19,3 e 5,1, respectivamente.

Dentre as propriedades físicas, há também aquelas relacionadas com a interação luminosa, como a transparência, o brilho, a cor e o traço. A **transparência** é uma propriedade considerada relativa, pois pode depender da espessura do mineral analisado. Minerais transparentes não absorvem ou absorvem pouco a luz, enquanto que os translúcidos absorvem consideravelmente. Porém, um mineral translúcido pode apresentar-se como transparente caso seja analisado em lâminas muito finas. Por outro lado, minerais opacos, como óxidos e sulfetos, absorvem totalmente a luz sem depender da espessura do mineral.

O **brilho** é uma propriedade característica, pois é a aparência resultante do mineral quando submetido à incidência de luz, ou seja, é a quantidade de luz que é refletida pela superfície mineral. Os tipos de brilho e suas características podem ser consultados no Quadro 2.2. O

modo como a luz é incidida ou refletida através do mineral é controlado pelos tipos de átomos e suas ligações. Sendo assim, ligações iônicas tendem a gerar brilho vítreo, enquanto que ligações covalentes podem caracterizar o brilho adamantino. É importante sabermos que, apesar de o brilho metálico ser facilmente identificado, alguns minerais, como a pirita (FeS_2), podem sofrer oxidação superficial, resultando na perda parcial dessa característica.

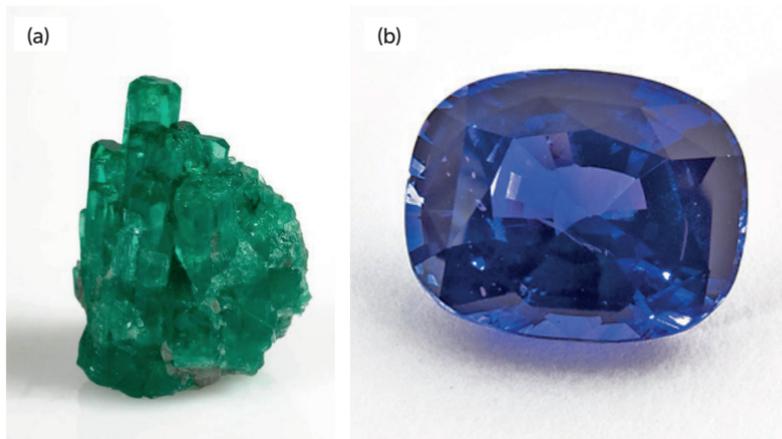
Quadro 2.2 | Tipos de brilho e suas características

Brilho	Características
Metálico	Reflexões fortes produzidas por substâncias opacas
Vítreo	Brilhante como o do vidro
Resinoso	Característico das resinas (exemplo: âmbar)
Graxo	Como se estivesse recoberto por substância oleosa
Nacarado	É a iridescência esbranquiçada de materiais (exemplo: pérola)
Sedoso	Lustro de materiais fibrosos (exemplo: seda)
Adamantino	Brilho intenso de diamante e minerais similares

Fonte: adaptado de Press et al. (2006, p. 93).

A **cor** de um mineral é resultante da absorção seletiva da luz. A absorção seletiva varia conforme a composição química do mineral, sendo que é favorecida pela presença de elementos químicos de transição, como ferro, cobre, níquel, cromo, vanádio, terras raras etc. Além disso, elementos-traço de impurezas também podem conferir diferentes colorações a um mesmo mineral. Esse é o caso das gemas esmeralda e safira, cujas cores são consequência da presença de cromo (cor verde) e ferro e titânio (cor azul), respectivamente. Outro exemplo são as variedades de quartzo (SiO_2) devido às impurezas existentes: o citrino contém impurezas férricas, enquanto que o rosa deve-se à presença de titânio. Por outro lado, a cor que o mineral deixa ao riscar uma porcelana branca é chamada de **traço**. A hematita (Fe_2O_3) e a magnetita podem ser diferenciadas por essa propriedade, sendo que apresentam traço avermelhado e preto, respectivamente.

Figura 2.3 | Exemplos de minerais com diferentes cores: a) Esmeralda, cuja cor é devido ao cromo; b) Safira, cuja cor é devido à presença de ferro e titânio



Fonte: a) <<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/6d/Esmeralda-1-.jpg>>; b) <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/90/Sapphire_cushion_4.20cts.jpg>. Acesso em: 30 set. 2017.

Não podemos deixar de citar também as propriedades elétricas. Minerais que são excelentes condutores, como os metais ouro, prata (Ag) e cobre (Cu), devem essa característica à presença de ligações atômicas metálicas. Por outro lado, minerais não condutores são a maioria, e geralmente possuem ligações iônicas e covalentes. Temos a piezoelectricidade quando um mineral é capaz de transformar pressão mecânica em carga elétrica, sendo esta uma propriedade que faz o quartzo ser muito utilizado pela indústria eletroeletrônica. Cargas positivas e negativas surgem quando o quartzo for cortado e pressionado.

Além das propriedades físicas já aprendidas, as propriedades químicas também são importantes no estudo da mineralogia, pois auxiliam na identificação e caracterização de alguns minerais. A **solubilidade** é uma propriedade significativa, tendo em vista que alguns minerais apresentam reação química com ácidos. A calcita, por exemplo, efervesce ao entrar em contato com o ácido clorídrico, liberando o gás dióxido de carbono conforme a reação $\text{CaCO}_3 + 2\text{HCl} = \text{CaCl}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$. A composição química também permite identificar o **odor** e **sabor** de alguns minerais. O cheiro de ovo podre, por exemplo, é característico do enxofre (S), enquanto que a halita (NaCl) tem o gosto salgado, sendo utilizada, inclusive, como nosso sal de cozinha.

Não podemos deixar de mencionar sobre aqueles minerais que possuem a mesma composição química, mas estruturas cristalinas diferentes, o que reflete tanto em suas propriedades físicas quanto morfológicas. Esses minerais são conhecidos como polimorfos (*poli* = muitos e *morfos* = forma). Um exemplo bastante comum, além do diamante e do carbono, já visto em seção anterior, é o da calcita e aragonita, que são polimorfos de CaCO_3 . A calcita se cristaliza no sistema trigonal, enquanto que a aragonita no sistema ortorrômbico.

Agora que já aprendemos sobre as propriedades dos minerais, vamos discutir sobre a classificação. Os critérios mais conhecidos para a classificação dos minerais são o sistema de cristalização (minerais monoclinicos, cúbicos etc.), os usos desses materiais (minerais formadores de rocha, gemas e minérios) e a composição química. A classificação dos minerais de acordo com seu radical aniônico tem as vantagens de que as propriedades físicas e morfológicas são mais semelhantes entre si. Além disso, os minerais com o mesmo radical aniônico, geralmente, formam-se por processos semelhantes e ocorrem associados na natureza. Então, através da composição química, os minerais são divididos em diferentes grupos, sendo eles: silicatos, elementos nativos, sulfetos, óxidos, haloides, carbonatos, sulfatos e fosfatos. Embora existam milhares de minerais, chamamos de minerais formadores de rochas para aqueles que são os principais constituintes das rochas. São eles:

- a) Silicatos: correspondem, aproximadamente, em torno de 97% dos constituintes da crosta terrestre, sendo formados pela combinação de oxigênio (O) e silício (Si) com cátions de outros elementos.
- b) Carbonatos: são constituídos por carbono (C) e oxigênio na forma do ânion carbonato (CO_3^{2-}), combinado com cálcio (Ca) e magnésio (Mg).
- c) Óxidos: são compostos pelo ânion oxigênio (O^{2-}) e cátions metálicos.
- d) Sulfetos: são compostos pelo ânion sulfeto (S^{2-}) e cátions metálicos.
- e) Sulfatos: são constituídos pelo ânion sulfato (SO_4^{2-}) e cátions metálicos.

As outras classes químicas não são tão comuns quanto estes minerais formadores de rocha. São elas:

- a) Elementos nativos: não possuem íons carregados, sendo elementos que ocorrem no estado nativo.
- b) Haloides ou haletos: possuem como ânions principais os íons halogênicos como F^- , Cl^- , Br^- e I^- .
- c) Fosfatos, arseniados e vanadatos: é uma classe que apresenta o ânion $(XO_4)^{n-}$, onde o X pode ser P, As ou V e n é 3.
- d) Boratos: são gerados a partir do ácido bórico ou polibórico.
- e) Nitratos: são caracterizados pelo grupo aniônico $(NO_3)^-$.
- f) Tungstatos e molibdatos: caracterizam-se pelas unidades estruturais WO_4 e MoO_4 .



Pesquise mais

Para que você possa entender melhor e perceber as propriedades dos minerais de maneira mais ilustrada, sugerimos assistir ao vídeo a seguir (do início até 12min35s). Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=2DDwI9L1OE>>. Acesso em: 29 nov. 2017.

Sem medo de errar

Agora é o momento de relembrarmos a situação apresentada no início desta seção, na qual você é responsável por um laboratório de análise mineral. Como você deverá apresentar um relatório à indústria referente às análises dos minerais hematita, fluorita e talco, realizou uma revisão sobre o tema de mineralogia, incluindo os aspectos sobre as propriedades e a composição mineral.

As propriedades dos minerais são comumente utilizadas para que seja possível a diferenciação das espécies, já que existem milhares delas ao redor do mundo. Essas propriedades, podendo ser citados o hábito cristalino e a clivagem, muitas vezes, são um reflexo da estrutura cristalina. Como vimos, diversos são os tipos de hábitos cristalinos conhecidos, porém os mais comuns em minerais são os tipos laminar, prismático, fibroso, acicular, granular e equidimensional.

Por outro lado, existem propriedades que, além de dependerem do arranjo interno, também são uma consequência da composição mineral. Neste caso, podemos considerar as propriedades que estão

relacionadas com a interação luminosa do mineral. Os minerais que absorvem pouco ou nada a luz são ditos transparentes, mas os translúcidos absorvem. Porém, cabe salientar que mesmo minerais originalmente translúcidos podem ser transparentes, caso sejam analisados em finas camadas.

A absorção seletiva da luz revela que a cor do mineral é favorecida por elementos químicos de transição, tais como o ferro, o cobre, o níquel etc. Vale lembrarmos que a presença de impurezas também pode interferir na coloração dos minerais.

Mesmo sendo citadas essas propriedades, você percebe que o assunto é bem mais abrangente, não é mesmo? Por esse motivo, a revisão de todas as propriedades características é tão importante para que você seja capaz de caracterizar e analisar os minerais que chegam ao laboratório em que trabalha. Não deixe de registrar todas as informações na primeira etapa do relatório que deverá entregar à indústria!

Avançando na prática

Museu de Mineralogia

Descrição da situação-problema

Você, como professor de Química, sabe que as atividades educativas extraclasse são importantes e, por vezes, são capazes de fazer os alunos se aprofundarem em um tema específico. Neste sentido, você decidiu levá-los para conhecer um Museu de Mineralogia. Esse tipo de museu, geralmente, está locado em universidades ou até mesmo em cidades onde a indústria mineral é bem desenvolvida. Normalmente, ele é popularmente conhecido devido à beleza do material exposto, ainda mais quando existem minerais raros ou de valor excepcional, como as gemas.

Logo no início da visita guiada por você, os alunos já demonstraram encantamento pela atividade do dia, uma vez que observavam atentamente os diversos minerais que estavam sendo exibidos. Além disso, muitos dos alunos estavam interessados em compreender

o que eram e como esses materiais foram originados, então faziam perguntas, como: o que é um mineral? Como ele foi formado?

Outros alunos, ao perceberem a grande variabilidade dos minerais (desde a cor até os hábitos), demonstraram interesse em compreender como é possível identificar tantos minerais que ocorrem em nosso mundo. Estes lhe perguntaram: professor, como é possível diferenciar um mineral do outro?

Resolução da situação-problema

Para que você possa responder adequadamente às indagações de seus alunos, é preciso recordar os conceitos e as propriedades relacionados aos minerais que você aprendeu nesta seção. Lembre-se de que um mineral é um sólido inorgânico e que possui uma origem natural, isto é, não pode ter sua origem em laboratório. Desta forma, os minerais têm sua origem relacionada ao processo de cristalização, no qual ocorre a união de átomos constituintes, conforme proporções químicas e estruturas químicas adequadas. Consequentemente, para ser considerado um mineral, ele deve apresentar estrutura cristalina específica e composição química definida.

Para que o aluno entenda como é possível diferenciar os minerais, é importante que ele compreenda que propriedades físicas e químicas permitem não só a classificação mas também a identificação desses materiais. Como vocês estão observando minerais em um museu, é importante destacar as propriedades visuais que são facilmente detectáveis, como o hábito, a cor e o brilho.

Faça valer a pena

1. Os minerais são materiais essenciais em nosso cotidiano e é a partir deles que podemos usufruir, nos dias atuais, de celulares, computadores, carros, entre outros. Sua origem está relacionada aos processos geológicos em diferentes ambientes, tanto no interior quanto na superfície da Terra.

A respeito dos minerais, podemos afirmar que:

- a) Minerais são substâncias sólidas de origem orgânica ou inorgânica.
- b) Possuem composição química específica e estrutura interna ordenada.
- c) São exemplos de minerais: o diamante, o carvão e a halita.

- d) A origem dos minerais não está relacionada ao seu ambiente de formação.
- e) A única classificação possível para os minerais é a que se baseia na composição química.

2. As propriedades dos minerais são úteis para que eles possam ser diferenciados. A este respeito, foram feitas as seguintes afirmações:

I. O hábito cristalino não apresenta relação com a estrutura cristalina e podem ser citados os tipos equidimensional e laminar.

II. A dureza e a clivagem não são propriedades utilizadas no reconhecimento dos minerais.

III. A cor e o brilho que os minerais apresentam são propriedades decorrentes da interação luminosa do mineral.

Assinale a alternativa que apresenta a(s) afirmação(ões) correta(s):

- a) I, apenas.
- b) I e II, apenas.
- c) II e III, apenas.
- d) III, apenas.
- e) I, II e III.

3. Os minerais são divididos em grupos de acordo com a sua composição química. Mesmo que a composição possa ser mais complexa (com a presença de cátions, por exemplo), a maioria dos grupos minerais é classificada de acordo com os ânions existentes.

Selecione o grupo, dentre os listados a seguir, no qual a maioria dos constituintes minerais da crosta terrestre se encontra:

- a) Carbonatos.
- b) Sulfetos.
- c) Sulfatos.
- d) Fosfatos.
- e) Silicatos.

Seção 2.2

Grupos minerais

Diálogo aberto

Prezado aluno, após introduzirmos o tema sobre a mineralogia, é o momento de focarmos nos diferentes grupos minerais. Cada grupo, além de possuir composição química distinta, apresenta características e aplicações diferentes, apresentando diversos minerais que são economicamente muito importantes. Desta maneira, o conhecimento sobre os grupos minerais pode auxiliar você a melhor entender sobre as propriedades deles.

Com a finalidade de compreender esta importância, vamos considerar que você foi contratado por um laboratório de análise mineral. Dentre suas atividades nesse laboratório, você precisará apontar quais análises são necessárias para a caracterização dos minerais hematita, fluorita e talco.

Você já deve saber que a classificação dos minerais se inclui em sua caracterização, não é mesmo? Considerando que a indústria está interessada nesses três minerais específicos, é relevante que sejam conhecidos e explorados os grupos minerais aos quais eles pertencem. Por isso, você deverá apresentar um estudo que contemple a classificação dos minerais solicitados em grupos, buscando informações referentes às características de cada um desses grupos minerais.

Adicionalmente, você também deve se perguntar e buscar exemplos de outros minerais que pertencem aos mesmos grupos. É importante responder aos seguintes questionamentos: todos os minerais (hematita, fluorita e talco) pertencem ao mesmo grupo mineral? Considerando a classificação química, quais são as diferenças composicionais entre eles?

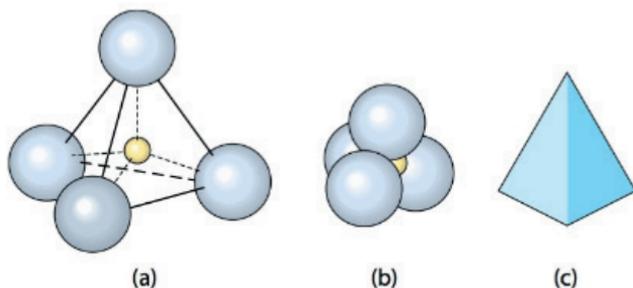
Para que você seja capaz de realizar este trabalho, ao longo desta seção, abordaremos e exemplificaremos minerais de diferentes grupos. Primeiramente, você conhecerá o grupo dos silicatos, que é o mais importante, considerando os minerais constituintes da crosta terrestre, e que é dividido em subclasses. Em seguida, serão apresentados os demais grupos minerais (não-silicatos), os quais, embora ocorram em menores proporções, são muito importantes devido às suas aplicações em nosso dia a dia.

Não pode faltar

Apesar de existir mais de uma classificação mineral, a que é feita através da composição química é, comumente, a mais utilizada por especialistas do assunto. Como vimos na seção anterior, este agrupamento considera o radical aniônico e, desta forma, congrega os minerais que possuem propriedades físicas e morfológicas semelhantes em detrimento daqueles minerais que possuem o mesmo cátion. Como exemplo, podemos citar a siderita ($FeCO_3$), que embora tenha o mesmo cátion que a pirita (FeS_2) e a hematita (Fe_2O_3), tem maior relação com minerais, como a calcita ($CaCO_3$) e a magnesita ($MgCO_3$), que são do grupo mineral dos carbonatos.

Dentre todos os grupos minerais conhecidos, o mais importante é o dos **silicatos**. Esse grupo é constituído pelo íon silicato (também conhecido como sílica), que nada mais é do que um composto de silício (Si^{4+}) circundado por quatro átomos de oxigênio (O^{2-}), obtendo-se a fórmula geral SiO_4^{4-} . Os minerais de sílica compreendem, aproximadamente, um terço de todos os minerais conhecidos, porém, quando consideramos somente a crosta terrestre, esses minerais constituem, aproximadamente, 95% do volume. A estrutura básica desses minerais é o tetraedro de sílica, o qual, devido ao seu arranjo, forma uma estrutura com quatro faces (Figura 2.4).

Figura 2.4 | Diferentes representações do tetraedro de sílica, com os átomos de oxigênio nas porções externas e o átomo de silício no centro. a) Visão ampliada; b) Representação real, com os átomos de oxigênio se tocando; c) Representação do tetraedro em diagrama



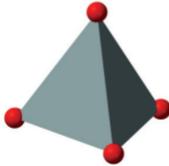
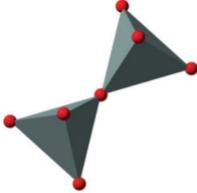
Fonte: Wicander e Monroe (2009, p. 62).

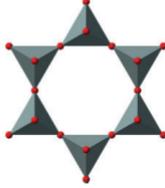
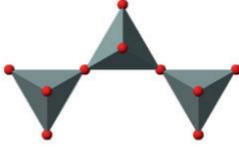
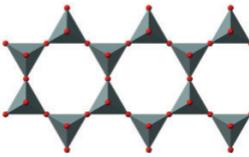
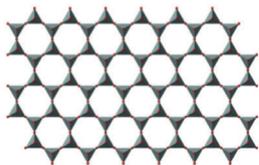
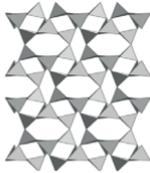


Considerando que os silicatos são os minerais mais abundantes da crosta terrestre, reflita se existe alguma relação entre a composição química desses minerais e os elementos químicos de maior ocorrência na crosta.

O silicato possui uma carga total negativa de 4, pois o silício tem valência 4 e cada um dos quatro átomos de oxigênio tem valência 2. Por possuir carga negativa, frequentemente, esse tetraedro não ocorre como um grupo de íons isolado, desta maneira, liga-se a cátions para formar minerais eletronicamente neutros. Sódio (Na^+), potássio (K^+), cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}) e ferro (Fe^{2+}) são exemplos de cátions que tipicamente ocorrem com o íon silicato. Esse tipo de arranjo é conhecido como tetraedro isolado, tendo um coeficiente de silício:oxigênio de 1:4. Ao subgrupo dos silicatos, cuja estrutura é de tetraedros isolados, classifica-se como **nesossilicatos** (Figura 2.5a). A olivina ($(Mg,Fe)_2SiO_4$) é um exemplo dessa configuração, pois para compensar a carga de -4 do íon silicato pode utilizar dois íons de magnésio, originando o mineral forsterita, ou dois de ferro, originando o faialita. Ambos os minerais são membros extremos da série da olivina e se formam em rochas ígneas de altas temperaturas, como veremos nas próximas seções. Outros exemplos de minerais conhecidos desse grupo são topázio, zircão e granada.

Figura 2.5 | Na coluna da esquerda, encontram-se representadas as estruturas dos tetraedros de sílica de cada subclasse, enquanto que, na coluna da direita, são ilustrados exemplos de minerais de cada subclasse dos silicatos

a) Nesossilicato – forsterita		
b) Sorosilicato – epidoto		

c) Ciclossilicato – berilo		
d) Inossilicato de cadeia simples – enstatita		
e) Inossilicato de cadeia dupla – riebeckita		
f) Filossilicato – talco		
g) Tectossilicato – anortoclásio		

Fonte: elaborada pela autora.

O tetraedro de sílica, devido à sua carga negativa, pode ainda compartilhar seus átomos de oxigênio com outros tetraedros de sílica. Desta forma, o grupo dos silicatos possui subdivisões de acordo com as diferentes estruturas, uma vez que os tetraedros podem se ligar, formando anéis, cadeias simples ou duplas, folhas ou redes. Os **sorossilicatos** são caracterizados por tetraedros duplos e isolados. Neste caso, os tetraedros de sílica são unidos por um oxigênio comum a dois tetraedros (Figura 2.5b). O mineral

mais conhecido desta subclasse é o epidoto. Os **ciclossilicatos** possuem os tetraedros de maneira polimerizada, formando uma cadeia fechada em forma de anéis. A polimerização pode ocorrer de três maneiras distintas: formação de um anel com três tetraedros (Si_3O_9)⁶⁻, sendo um exemplo o mineral benitoíta; formação de um anel com quatro tetraedros (Si_4O_{12})⁸⁻, dando origem ao mineral axinita; e formação de um anel com seis tetraedros (Si_6O_{18})¹²⁻ (Figura 2.5c). Este último tipo é a estrutura dos minerais mais importantes e comuns dentre os ciclossilicatos, podendo ser citados o berilo, a turmalina e a cordierita.

Os **inossilicatos** são uma das subclasses mais importantes dentro dos silicatos, sendo que sua estrutura resulta da polimerização dos tetraedros, formando cadeias unidimensionais simples ou duas cadeias unidimensionais. No caso em que os arranjos ocorrem em cadeias simples, obtém-se uma cadeia de extremidade aberta, na qual os dois átomos de oxigênio de cada tetraedro ligam-se a tetraedros adjacentes (Figura 2.5d), possuindo a fórmula geral $B_nC_oSi_2O_6$. As posições "B" e "C" são ocupadas por cátions, sendo que, na primeira, pode ser Ca e Na, e na última, Mg, Fe, Fe^{3+} , Mn, Al, Mn^{3+} , Li e Ti, e "n" e "o" correspondem ao número de elementos da fórmula química. Os inossilicatos de cadeia simples podem ocorrer em três variedades diferentes dependendo do sistema em que foi cristalizado. Os que possuem sistema ortorrômbico são chamados de ortopiroxênios, sendo um exemplo o mineral enstatita. São denominados como clinopiroxênios aqueles que se cristalizam no sistema monoclinico, como a augita e diopsídio. Por fim, os piroxenoides são aqueles que possuem o sistema triclinico, podendo ser citado o mineral wollastonita como exemplo.

Ainda nos inossilicatos, duas cadeias simples podem se juntar para formar cadeias duplas, as quais são ligadas umas às outras através de íons de oxigênio compartilhados (Figura 2.5e), e neste caso tem-se, geralmente, a fórmula geral $X_{2-3}Y_5Z_8O_{22}(OH)_2$. A posição "X" é ocupada por cátions, como Ca^{2+} e Na^+ , e raramente K^+ ; a posição "Y" por cátions, como Mg, Fe^{2+} , Fe^{3+} , Al, Mn, Ti, Li, Mn^{3+} , Cr, entre outros; e a posição "Z" por cátions em coordenação tetraédrica com o oxigênio. Assim como os inossilicatos de cadeia simples, os de cadeia dupla também podem ser cristalizados em três diferentes sistemas, sendo eles: sistema ortorrômbico, originando os ortoanfibólios, como o mineral antofilita; os clinoanfibólios

cristalizam-se no sistema monoclinico, sendo exemplos os minerais actinolita e hornblenda; e anfíboloides, que se cristalizam no sistema triclinico, podendo ser citada a astrofilita como exemplo.



Pesquise mais

Você percebeu que há diferença nas fórmulas químicas dos inossilicatos de cadeia simples e de cadeia dupla? O íon OH^- é presente no grupo de cadeia dupla, o que indica que esses minerais são hidratados. O anfíbio é um exemplo dele.

Os **filossilicatos** apresentam estrutura do tipo folha, na qual três íons oxigênio de cada tetraedro são compartilhados com outros tetraedros, gerando um empilhamento de folhas (Figura 2.5f). Cátions podem ocorrer entre as folhas através de uma ligação fraca, garantindo a minerais deste grupo hábito lamelar ou foliado e clivagem característica. Podem ser citados como exemplos de minerais desta subclasse o talco e a clorita, além do grupo das micas (biotita e muscovita), serpentinas e argilas (caulinita, montmorillonita, vermiculita etc.). Por fim, a subclasse dos **tectossilicatos** é a mais complexa dentre os silicatos, pois é formada por uma rede tridimensional, na qual cada tetraedro compartilha todos os seus íons de oxigênio com os outros tetraedros (Figura 2.5g). Além disso, é considerada a subclasse mais importante, pois possui, aproximadamente, 75% dos minerais da crosta terrestre. Por ser uma classe muito ampla, é subdividida nos seguintes grupos:

- Grupo da sílica: apresenta minerais compostos, basicamente, por SiO_2 , que possuem como unidades estruturais somente o tetraedro. Sendo assim, são conhecidos alguns polimorfos, dentre os quais podem ser citados o quartzo, a calcedônia, a opala e a tridimita
- Grupo dos feldspatos: este grupo resulta da substituição parcial do Si pelo Al, originando os feldspatos potássicos (como sanidina e microclínio) e plagioclásios, entre tantos outros.
- Grupo dos feldspatóides: possuem menores proporções de sílica do que os feldspatos. São exemplos de minerais desse grupo a leucita e noseana.

d) Grupo da escapolita: forma uma solução sólida entre os termos sódicos e cálcicos.

e) Grupo das zeólitas: é um grupo mineral muito abrangente, podendo ser citados os minerais analcima, escolecita e estilbita.

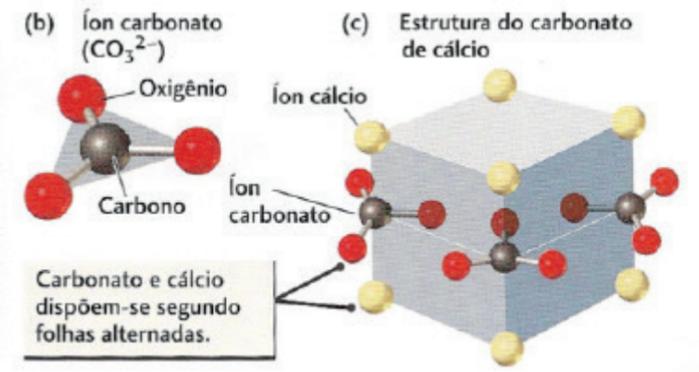


Exemplificando

Os filossilicatos são um grupo de minerais com bastante importância para a indústria. Dentre os principais usos, destacam-se argamassas para revestimentos, produção de tintas, fabricação de vidro e papel, cerâmicas, isolante térmico e elétrico, refratários, entre outros. Além disso, os minerais lepidolita e zinwaldita são exemplos de fontes de lítio (Li).

Os minerais não-silicatos não ocupam tamanho ou volume na crosta terrestre, porém formam grupos muito importantes para a indústria, tendo em vista seus usos e aplicações. O grupo dos **carbonatos** tem como constituinte básico o íon carbonato (CO_3^{2-}), sendo o íon carbono circundado por três íons de oxigênio (Figura 2.6a). Os íons carbonatos são ordenados em folhas e ligados por camadas de cátions (Figura 2.6b). No caso do mineral calcita – carbonato de cálcio (CaCO_3), as folhas são separadas por cálcio, enquanto que, na dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), as folhas de carbonato são separadas por camadas alternadas de cálcio e magnésio.

Figura 2.6 | (a) Constituinte básico dos minerais do grupo do carbonato; (b) Camadas alternadas dos íons cálcio e carbonato no mineral calcita (carbonato de cálcio)



Fonte: adaptado de Press et al (2006)

Os minerais do grupo dos **óxidos** caracterizam-se por terem em sua composição o íon O^{2-} , normalmente ligado a íons metálicos, como o ferro, sendo que a maioria possui ligações iônicas. Esse é um grupo de minerais que, embora corresponda a somente quase 4% do volume da crosta, é de grande importância econômica, uma vez que engloba minérios da maioria dos metais usados na indústria. A hematita (Fe_2O_3), por exemplo, é um minério de ferro utilizado na fabricação de pigmentos e ferramentas, além de ser transformado em aço. A ilmenita ($FeTiO_2$) é um óxido de ferro e titânio, sendo fonte de ambos os elementos.



Assimile

Minério é um mineral ou ainda uma associação de minerais que podem ser explorados economicamente. Por ser altamente dependente do mercado, um mineral pode ser considerado minério por um período de tempo e, posteriormente, perder sua importância econômica.

Os **sulfetos** são formados por compostos do íon sulfeto (S^{2-}) com cátions metálicos, fazendo com que muitos minerais desse grupo se pareçam metais e sejam opacos. A pirita (FeS_2) é o sulfeto mais comum, porém os principais minérios de cobre, zinco e níquel também são desse grupo. Por outro lado, o grupo dos **sulfatos** tem como unidade básica o íon sulfato (SO_4^{2-}), apresentando minerais que podem ser anidros ou hidratados. Dentre os anidros, os minerais mais comuns são a anidrita ($CaSO_4$) e a barita ($BaSO_4$). Já a gipsita ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) é o mais importante e comum mineral dos sulfatos hidratados, mas que, quando perde moléculas de água, a estrutura original entra em colapso, adquirindo a configuração da anidrita.

Outro grupo mineralógico é o dos **elementos nativos**. Cerca de 24 elementos químicos de ocorrência nativa podem estar presentes na crosta terrestre formando minerais. Porém, a variedade de minerais formada por esses elementos é muito superior. Os minerais comumente mais conhecidos desse grupo são diamante (estudado com mais detalhes na Unidade 1), ouro, prata, cobre, chumbo, mercúrio e enxofre. O grupo dos **haloides** são caracterizados pela combinação dos íons halogênicos, como Cl^- , B^- , F^- e I^- , com metais ou metaloides, originando minerais importantes para o nosso dia a dia, como a halita

(NaCl), fluorita (CaF_2) e silvita (KCl) (Figura 2.7). Muitos minerais desse grupo apresentam ligação iônica, o que lhes garante propriedades de serem excelentes condutores de eletricidade no estado de fusão.

Figura 2.7 | Exemplos de minerais do grupo dos haloides: a) Halita; b) Fluorita e c) Silvita



Fonte: a) <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/87/Sal_de_roca%2C_mina_de_sal_de_Wieliczka_%28Pol%C3%B2nia%29%2C_exposici%C3%B3_EL_Regne_de_la_Sal.JPG>; b) <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/66/Mineral_Fluorita_GDFL102.jpg>; c) <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/e0/Museo_de_La_Plata_-_Silvita.jp>. Acesso em: 8 out. 2017.

São considerados **fosfatos**, **arseniatos** e **vanadatos** aqueles minerais cujos compostos derivam dos elementos fósforo (P), arsênio (As) e vanádio (V), respectivamente. Esses elementos são ligeiramente maiores que o enxofre, resultando em um grupo iônico semelhante ao do sulfato e exibindo propriedades similares. Os fosfatos são particularmente muito importantes, uma vez que são usados como fertilizantes, sendo o mineral apatita ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{OH}, \text{Cl})$) o mais importante e comum. A adamita $\text{Zn}_2(\text{AsO}_4)(\text{OH})$ e vanadita ($\text{Pb}_5(\text{VO}_4)_3\text{Cl}$) são exemplos de minerais arseniatos e vanadatos.

O grupo dos **boratos** é constituído por sais gerados a partir do ácido bórico, podendo conter cátions, como Al^{3+} , Fe^{3+} e Mn^{3+} . Os boratos, quando em baixa temperatura, possuem a tendência de serem substituídos por carbonatos. A boracita ($\text{Mg}_3\text{B}_7\text{O}_{13}\text{Cl}$) é um exemplo de mineral desse grupo.

Já no grupo dos **nitratos** estão contemplados aqueles sais formados pelo ácido nítrico (HNO_3), cuja origem está relacionada a reações de oxidação que, geralmente, devem-se à ação de nitrobactérias. O nitrato de potássio (KNO_3) é um exemplo de mineral desse grupo. Cabe mencionar que os nitratos são facilmente solúveis em água, existindo somente em formações geológicas recentes, portanto são dificilmente encontrados.

Por fim, os minerais do grupo dos **tungstatos** e **molibdatos** possuem em sua composição o WO_4 e MoO_4 , sendo que as

soluções sólidas entre Mo e W são raras na natureza. Os minerais são distribuídos, principalmente, entre o grupo da volframita ($(Fe,Mn)WO_4$) e da scheelita ($CaWO_4$).



Pesquise mais

Prezado aluno, os grupos minerais abrangem milhares de minerais, cada um com suas características, composições e usos. No link relacionado, a seguir, que pertence ao Museu de Minerais e Rochas "Heinz Ebert", você poderá pesquisar sobre as particularidades de cada um desses grupos, além de visualizar exemplos de minerais.

Disponível em: <<http://www.rc.unesp.br/museudpm/banco/grm.html>>.

Acesso em: 9 dez. 2017.

Boa pesquisa!

Sem medo de errar

Caro aluno, nesta seção, foi abordada a classificação dos minerais em grupos, conforme a composição química que eles apresentam. Desta forma, os minerais do grupo dos silicatos são constituídos, basicamente, pelo íon silicato. Similarmente, os íons carbonato e sulfeto são as unidades básicas dos grupos minerais dos carbonatos e sulfetos.

Sendo assim, vamos relembrar a situação que lhe foi proposta no início desta seção: você deveria conhecer e classificar, de acordo com seus grupos, os minerais fluorita, talco e hematita, certo? Após conhecer os grupos nos quais cada um dos minerais é constituinte e as características deles, também foi solicitado que você se aprofundasse no tema e buscasse saber outros exemplos de minerais que, conforme a classificação, pertencessem aos mesmos grupos.

A fluorita é um mineral do grupo dos haloides, no qual também são encontrados outros minerais, como halita e silvita. Esse grupo é caracterizado pela combinação dos íons halogênicos (Cl^- , B^- , F^- e I^-) com metais ou metaloides. Já o talco faz parte do grupo mais importante de todos, ou seja, o dos silicatos, sendo os minerais constituídos pelo íon silicato. Como sabemos, os silicatos possuem subclasses, sendo que o talco integra a dos filossilicatos, na qual

também são encontrados a clorita e os minerais dos grupos da mica, serpentina e argila. Por sua vez, a hematita é componente do grupo dos óxidos junto à ilmenita. O grupo dos óxidos caracteriza-se por ter em sua composição o íon O^{2-} , ligado, normalmente, a íons metálicos, como o ferro. Demais exemplos de minerais dos grupos podem ser encontrados no link que lhe foi sugerido no "Pesquise mais".

Você deve ter percebido que a classificação dos minerais em grupos é um assunto bem abrangente, não é mesmo? Afinal, já sabemos que existem milhares de minerais. Portanto, conhecer as características básicas de cada grupo, bem como quais são os principais minerais encontrados em cada um deles, é uma tarefa muito importante para você que trabalha em um laboratório de análise mineral. A partir do seu conhecimento sobre o assunto, será possível que planeje análises futuras, sempre buscando a caracterização dos diversos tipos de minerais.

Avançando na prática

Composição química dos minerais

Descrição da situação-problema

Você é professor de Química em uma escola e, muitas vezes, os alunos têm dificuldade de entender a importância da composição química em nosso cotidiano. Neste sentido, você resolveu diversificar sua aula, expondo minerais de diferentes grupos com a explicação da composição química deles.

Por ser um assunto bastante abrangente, você decidiu iniciar sua aula com os minerais quartzo, calcita, gipsita e pirita. Por estarem iniciando os estudos sobre esse assunto, primeiramente, os alunos pensaram que as amostras apresentadas de quartzo, calcita e gipsita, na realidade, tratavam-se do mesmo mineral, pois todas eram esbranquiçadas e com brilho vítreo. Ao observarem a pirita, tiveram a certeza de que estavam estudando o ouro. Como professor, de qual forma você explicaria aos seus alunos que as amostras são de diferentes minerais? Ainda, é possível que uma amostra muito semelhante ao ouro, em termos

visuais, tenha outra composição química? Esses são questionamentos possíveis e que instigarão os alunos a conhecerem mais sobre a composição química de todos esses minerais.

Resolução da situação-problema

Para facilitar a explicação sobre a composição química, você pode iniciar com a apresentação do quartzo, uma vez que este apresenta uma composição relativamente simples. Esse mineral é um composto de silício e oxigênio, tendo como fórmula química SiO_2 . A calcita pertence ao grupo dos carbonatos, portanto, tem em sua composição o íon carbonato. Além disso, possui o cátion cálcio, resultando na fórmula CaCO_3 . Apresente aos alunos a composição da gipsita, que é um mineral hidratado e possui a fórmula $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Por fim, você não deve se esquecer de apresentar a composição química da pirita (FeS_2), sendo esta bem diferente da composição do ouro (Au), que é um elemento nativo.

Desta forma, com esta explicação e também podendo visualizarem as amostras, os alunos poderão compreender e discutir ainda mais sobre a importância da composição química.

Faça valer a pena

1. Os silicatos são os minerais mais abundantes da crosta terrestre, sendo constituídos por oxigênio e silício (tetraedro de sílica) com cátions de outros elementos. De acordo com sua estrutura, os silicatos são divididos em classes: nesossilicatos, sorossilicatos, ciclossilicatos, inossilicatos, filossilicatos e tectossilicatos.

Com relação às subclasses dos silicatos, é correto afirmar:

- Nenhuma das subclasses dos silicatos é formada por tetraedros isolados.
- Os sorossilicatos são caracterizados por possuírem os tetraedros na forma de anéis.
- Os inossilicatos possuem tetraedros em cadeias simples ou duplas.
- Os filossilicatos possuem tetraedros, cujas estruturas formam folhas, sendo esta uma característica importante do quartzo.
- Os tectossilicatos possuem a estrutura mais simples dentre as subclasses do grupo dos silicatos.

2. Cada grupo mineral, além de possuir composição química diferenciada, é conhecido por apresentar características e propriedades distintas. Consequentemente, os usos e as aplicações industriais dos minerais de cada grupo são diversos.

Com relação às características, às propriedades e aos usos dos diferentes grupos minerais, é correto afirmar que:

- a) Os óxidos caracterizam-se por possuírem em sua composição o oxigênio, normalmente ligado a íons não-metálicos.
- b) Todos os minerais do grupo dos sulfatos são anidros.
- c) Os haloides, geralmente, são maus condutores de eletricidade.
- d) A maioria dos minerais do grupo dos sulfetos é transparente.
- e) Os fosfatos são usados como fertilizantes.

3. Considerando que os minerais pertencem a grupos conforme sua composição química, a seguir, estão listados exemplos de cinco minerais e cinco grupos, os quais devem ser correlacionados.

Minerais:

- 1. Pirita
- 2. Silvita
- 3. Clorita
- 4. Apatita
- 5. Ilmenita

Grupos:

- a. Fosfato
- b. Haloides
- c. Óxido
- d. Silicato
- e. Sulfeto

Assinale a alternativa que apresenta a correta correlação entre os minerais e seus respectivos grupos.

- a) 1a – 2b – 3d – 4c – 5a.
- b) 1e – 2b – 3d – 4a – 5c.
- c) 1d – 2c – 3a – 4e – 5b.
- d) 1e – 2b – 3a – 4c – 5d.
- e) 1e – 2a – 3c – 4b – 5d.

Seção 2.3

Caracterização dos minerais

Diálogo aberto

Caro aluno, anteriormente, foram apresentadas a você as principais propriedades e a classificação dos minerais em diferentes grupos. Provavelmente, você percebeu como são numerosas as quantidades de minerais já descritas ao redor do mundo. Esses minerais são diferenciados uns dos outros de acordo com as características que apresentam, sejam elas físicas ou químicas. Mas então, quais análises e técnicas podem ser utilizadas para a caracterização dos diferentes minerais existentes? Sendo assim, nesta última seção da segunda unidade, estudaremos sobre a caracterização mineral, destacando análises macroscópicas (as quais, geralmente, são mais simples) e microscópicas, além de também serem apresentadas técnicas que permitam análises quantitativas e qualitativas do material que se deseja caracterizar.

De maneira que você entenda sobre a caracterização dos minerais, vamos recordar que você trabalha em um laboratório que analisa minerais industriais. Como responsável do laboratório, você deve buscar conhecer sobre as diferentes técnicas e análises minerais para identificar quais são as que devem ser utilizadas para caracterizar os minerais hematita, fluorita e talco. Quais análises são possíveis de serem feitas nos minerais solicitados pela indústria? Existem análises complementares que podem ser realizadas de maneira a deixar a caracterização mais acurada?

De qual maneira você responderia a essas questões? A compreensão e resolução desses questionamentos farão com que você realize a terceira etapa da atividade que lhe foi proposta. Você deve se recordar que essa atividade foi dividida em três etapas, as quais envolviam a compreensão das propriedades físicas e químicas minerais, a classificação dos minerais em diferentes grupos de acordo com a composição química e a determinação de possíveis análises e técnicas a serem utilizadas na caracterização mineral.

Vamos finalizar?

Não pode faltar

Os minerais, dependendo de diversas propriedades e da composição química, apresentam variações de complexidade quando de sua análise. Por esse motivo, os métodos e ensaios para a caracterização e identificação mineral são diversos, inclusive variando desde análises macro até microscópicas.

Por ser, geralmente, o primeiro passo de uma análise, abordaremos, inicialmente, sobre a **análise macroscópica** dos minerais, ou seja, o estudo realizado em amostras de mão. Essa caracterização é conhecida por ser simples, uma vez que não utiliza equipamentos sofisticados ou complexas etapas de preparação das amostras. Para ser realizada, os laboratórios de análise mineral utilizam materiais ou utensílios básicos, tais como:

1. **Canivete ou lâmina de aço:** esse material possui dureza de 5 e, portanto, é utilizado para auxiliar na descrição da dureza do mineral, que é analisado baseando-se na Escala de Mohs, já apresentada no início desta unidade. Para realizar a caracterização utilizando esse material, deve ser escolhida uma superfície fresca do mineral, isto é, uma face que não esteja alterada. Após, deve ser realizado um risco, friccionando o material (canivete ou lâmina) contra o mineral e, se for constatado que o mineral foi efetivamente riscado, será conhecido que a dureza dele é menor que 5. É importante também que sejam utilizados materiais com outras durezas nesta caracterização (podendo, inclusive, ser minerais com dureza já conhecida). Por exemplo, se um mineral for riscado pelo canivete (dureza 5), mas não for pela unha (dureza 2), a conclusão é que ele apresenta uma dureza intermediária entre esses valores.
2. **Porcelana branca:** para a identificação do traço do mineral, pode ser utilizada uma pequena placa de porcelana branca não esmaltada.
3. **Ímã:** é importante para identificar se um mineral é magnético ou não.
4. **Ácido clorídrico diluído:** é utilizado na realização do teste de solubilidade, já que existem minerais (principalmente, carbonáticos e fosfáticos) que, devido à ação do ácido clorídrico, geram efervescência. É o caso da calcita, como já estudamos anteriormente, a qual, em contato com o ácido, libera o dióxido de carbono.

As demais propriedades utilizadas na caracterização mineral, normalmente, podem ser diagnosticadas sem o auxílio de equipamentos ou

materiais. É o caso da descrição da cor, brilho, hábito e clivagem. Entretanto, quando se tem um mineral, cujo tamanho é pequeno ou cujos detalhes passam despercebidos, é importante utilizar uma lupa com aumento de 10 vezes, o que permite observar o mineral de maneira mais acurada.

Já para a determinação da densidade relativa, os laboratórios utilizam a Balança de Joly, que possui um sistema de pratos suspensos em uma mola de aço que se deforma de maneira proporcional ao peso dos minerais que são analisados. O ensaio de chama também pode ser utilizado na identificação de minerais e é realizado com o auxílio do calor. Através desse ensaio ocorrem interações atômicas através dos níveis e subníveis de energia quantizada, desta forma, o ensaio baseia-se na coloração da chama quando o material é aquecido pelo calor da chama. Cada substância possui uma cor característica: a cor amarelo-alaranjado é obtida pelo ensaio quando da presença de sódio, violeta-pálido por potássio, vermelho-alaranjado por cálcio e vermelho-sangue por estrôncio. Como exemplo, podemos citar a chama de coloração verde na queima de CuSO_4 , a qual indica a presença de cobre.



Exemplificando

Para facilitar a análise do mineral, pode ser utilizado um quadro descritivo, no qual as principais características identificadas encontram-se resumidas. A seguir, no Quadro 2.3, temos um exemplo que pode ser utilizado para minerais com brilho metálico de cor cinza ou branco-cinza.

Quadro 2.3 | Modelo de quadro descritivo para análise de minerais

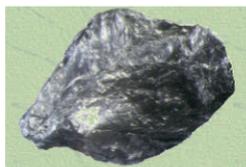
Mineral (composição química)	Dureza/ Densidade relativa	Cor	Brilho/ Traço	Clivagem	Hábito
Molibdenita (MoS_2)	1,0-1,5/ 4,62-4,73	Cinza- chumbo	Metálico/ Preto- cinzento	Perfeita	Lamelar, foliado, maciço, prismático, placóide
Galena (PbS)	2,5/ 7,4-7,6	Cinza- chumbo	Metálico/ Cinza- chumbo	Perfeita	Hexaédrico, octaédrico, rombododecaédrico
Calcocita (Cu_2S)	2,5-3,0/ 5,5-5,8	Cinza- chumbo	Metálico/ Preto- cinzento	Imperfeita	Tabular, maciço, estriado

Fonte: adaptado de Neves, Schenato e Bachi (2008, p. 67).

Agora, observe a seguir as figuras destes minerais, cujas características foram apresentadas no quadro anterior.

Figura 2.8 | Amostras dos minerais a) molibdenita; b) galena; c) calcocita

a) molibdenita



b) galena



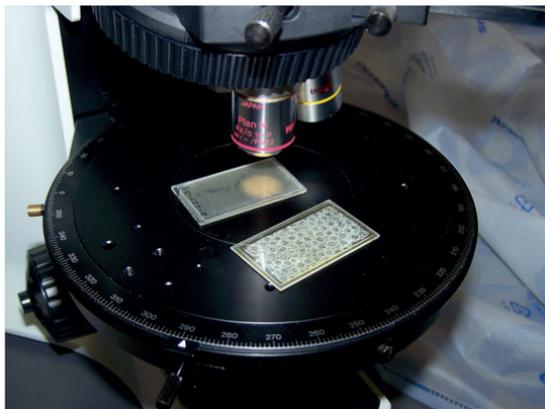
c) calcocita



Fonte: (a) <<http://www.rc.unesp.br/museudpm/banco/sulfetos/molibdenita.gif>>; (b) <<http://www.rc.unesp.br/museudpm/banco/sulfetos/galena.gif>>; (c) <<http://www.rc.unesp.br/museudpm/banco/sulfetos/calcocita.gif>>. Acesso em: 12 out. 2017.

Agora, daremos ênfase aos métodos de caracterização que previamente necessitam de preparo das amostras. O primeiro deles é a **microscopia óptica**, uma vez que as propriedades ópticas dos minerais são diagnósticas e sua avaliação permite a identificação da substância que está em análise. Esse estudo é realizado utilizando o conhecido microscópio petrográfico ou de polarização (Figura 2.9). Nele, embora seja possível analisar pequenos fragmentos, geralmente, são analisadas lâminas delgadas. As lâminas ou seções delgadas são preparações laboratoriais de minerais ou rochas, nas quais as amostras são montadas em lâmina de vidro e, posteriormente, são polidas até a espessura de 0,03 mm. A partir das lâminas, diversas propriedades ópticas podem ser observadas e a maioria dos minerais formadores de minérios pode ser facilmente identificada.

Figura 2.9 | Lâminas delgadas utilizadas para a identificação de minerais em microscópio petrográfico



Fonte: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/e/e9/Thin_sections.JPG/1280px-Thin_sections.JPG>. Acesso em: 12 out. 2017.

Através da análise em lâminas ao microscópio de luz polarizada são determinadas as propriedades morfológicas e ópticas dos minerais transparentes e também a relação textural entre eles, que é importante no estudo das rochas, como veremos adiante.



Pesquise mais

O Guia para microscopia de minerais em lâminas delgadas é um material que foi traduzido por professoras brasileiras e que tem acesso público através do link: <www.ufrgs.br/igeo/ig/arquivo/Guia_microscopia_print_resolution_compressed.pdf>. Nele você poderá consultar informações importantes sobre o microscópio petrográfico, além de características minerais que podem ser obtidas (por exemplo, entre as páginas 18-21, 39-45 e 67-75).

Para a determinação das propriedades ópticas, é fundamental conhecermos sobre o polarizador e analisador do microscópio óptico. O polarizador é um filtro que reduz as ondas de luz que vibram aleatoriamente, deixando passar somente aquelas que vibram em uma única direção (por exemplo, E-W), conhecida como plano de polarização. Desta forma, nomeamos de ondas polarizadas aquelas que passam no polarizador. Essas ondas podem sofrer com as modificações de refração, absorção e birrefringência ao atravessarem uma lâmina delgada. Quando somente o polarizador está sendo utilizado na análise, denominamos que estamos a "nicóis paralelos ou descruzados", enquanto que o nome de "nicóis cruzados" refere-se ao uso do analisador, outro filtro do microscópio.

Agora, vamos conhecer quais são as características ópticas que são utilizadas na identificação dos minerais. Na nicóis paralelos, as principais características que podem ser observadas são a cor, o pleocroísmo, o relevo, a clivagem e fratura, o hábito e a forma cristalina. Na nicóis cruzados, observam-se a isotropia e anisotropia, cor de polarização ou interferência, extinção e maclas.

Conforme já vimos em seção anterior, o hábito pode ser de diversos tipos, tais como maciço, lamelar, fibroso etc. Dependendo da combinação das faces cristalinas, os minerais podem exibir diferentes formas cristalinas, sendo elas: cristais euédricos ou formas anédricas e subédricas. Os cristais euédricos são caracterizados por serem limitados por faces cristalinas perfeitas, refletindo um crescimento

sem obstruções (Figura 2.10a). Por outro lado, as formas subédricas e anédricas são observadas quando a forma característica do mineral é desenvolvida apenas parcialmente (2.10b e c).

Figura 2.10 | Fotomicrografias de minerais. a) Cristal euédrico de granada. b) Forma subédrica em olivina. c) Forma anédrica em quartzo



Fonte: (a) <<http://www.rc.unesp.br/museudpm/banco/sulfetos/molibdenita.gif>>; (b) <<http://www.rc.unesp.br/museudpm/banco/sulfetos/galena.gif>>; (c) <<http://www.rc.unesp.br/museudpm/banco/sulfetos/calcocita.gif>>. Acesso em: 12 out. 2017.

A clivagem, como já sabemos, é uma propriedade importante para a identificação do mineral. No caso da análise microscópica, ela é reconhecida pelo traçado retilíneo de planos que seccionam o mineral, aparecendo como linhas escuras e finas (Figura 2.11a). As fraturas em minerais (Figura 2.11b) ocorrem devido à exposição a esforços mecânicos ou resfriamento rápido. Outra caracterização importante é a observação de maclas, que podem ser diagnósticas de muitas espécies minerais, como o plagioclásio (Figura 2.11c). As maclas ocorrem pelo intercrescimento de dois ou mais segmentos de cristal, sendo controlado pela estrutura cristalina.

Figura 2.11 | Fotomicrografias de minerais: a) Clivagem em biotita; b) Fratura em olivina; c) Macla em plagioclásio



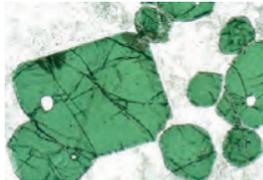
Fonte: adaptado de Raith, Raase e Reinhardt (2014, p. 39-48).

Em lâminas, a composição espectral da luz branca original muda ao atravessar os minerais, gerando os efeitos de cor. Isso pode ocorrer pela atenuação de comprimentos de onda (absorção) ou ainda como resultado da refração ou difração da luz. É importante compreender

que a amplitude da onda de luz é o que irá determinar a intensidade da luz de uma cor específica. Além da descrição da coloração em si que o mineral apresenta, a descrição da cor também identifica se o mineral é isotrópico (absorção de luz idêntica em todas as direções – Figura 2.12a) ou anisotrópico (absorção de luz é uma propriedade direcional – Figura 2.12b). Neste caso, os cristais de uma mesma espécie mineral podem exibir cores diferentes conforme a orientação em relação às direções de vibração da luz, propriedade nomeada de pleocroísmo. A maioria dos minerais exibe fraco ou nenhum pleocroísmo, porém, no caso de biotitas ricas em Fe-Ti, o pleocroísmo é intenso.

Figura 2.12 | Fotomicrografias de minerais: a) Exemplo de mineral isotrópico: espinélio; b) Exemplo de mineral anisotrópico: biotita

a) Exemplo de mineral isotrópico: espinélio;



b) Exemplo de mineral anisotrópico: biotita



Fonte: adaptado de Raith, Raase e Reinhardt (2014, p. 67-69).

Em cristais opticamente anisotrópicos, dois conjuntos de ondas de luz se propagam em todas as direções. Desta forma, haverá diferentes índices de refração, uma vez que as duas ondas de luz possuem velocidades diferentes. Chama-se birrefringência a diferença entre esses índices de refração. O comportamento da extinção ocorre quando um mineral birrefringente, em nicóis cruzados, ao ser rotacionado, exibe mudança periódica entre uma imagem iluminada (posição de não-extinção - Figura 2.13a) e imagem escura (posição de extinção - Figura 2.13b).

Figura 2.13 | Fotomicrografias de minerais evidenciando a propriedade de extinção em mineral biotita: a) Posição de não-extinção e b) Posição de extinção

a) Posição de não-extinção



b) Posição de extinção



Fonte: a) <<http://www.rc.unesp.br/igce/petrologia/nardy/biotitae1.jpg>>; b) <<http://www.rc.unesp.br/igce/petrologia/nardy/biotitae2.jpg>>. Acesso em: 12 out. 2017.

Por fim, é importante salientar que, nos casos de minerais opacos, é utilizado um microscópio de luz refletida, permitindo que sejam analisados os minerais de acordo com a refletividade da luz que incide neles.



Pesquise mais

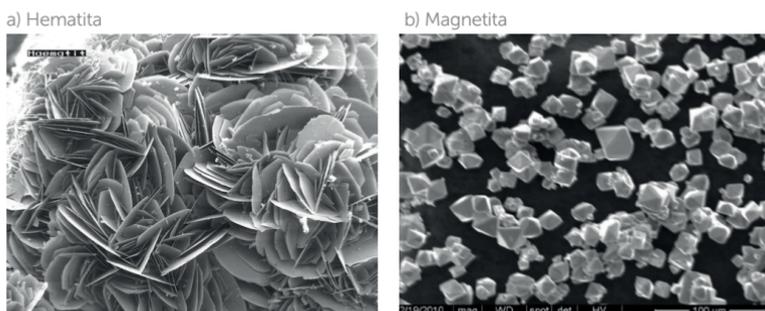
De maneira a ilustrar as propriedades que podem ser obtidas pelo microscópio óptico, você pode consultar o vídeo Guia de *Minerografia*, o qual apresenta, sucintamente, sobre a caracterização. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=7fyb0b8qJC8>>. Acesso em: 14 dez. 2017.

No mesmo link, você poderá baixar arquivos, como Guia de Minerais Transparentes e Guia de Minerais de Minério. Esses materiais foram produzidos pelo professor Heinrich Frank, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Ele também produz vídeos apresentando características específicas de minerais, como o talco (<https://www.youtube.com/watch?v=_KQuHgt5T7k>. Acesso em: 14 dez. 2017.), a fluorita (<<https://www.youtube.com/watch?v=8H-bNXgJjs0>>. Acesso em: 14 dez. 2017.) e a hematita (<<https://www.youtube.com/watch?v=5kgUaksxBSA>>. Acesso em: 14 dez. 2017.).

A **fluorescência por raios X (XRF)** é uma técnica que permite a realização de análises qualitativas e quantitativas do material. Deste modo, indica a presença de elementos químicos presentes no mineral e também a quantidade exata de cada um desses elementos. Os elétrons das camadas internas dos átomos presentes na amostra, ao serem irradiados por raios X, ficam altamente excitados e são ejetados. Assim, criam-se vacâncias (orbitais vazios) que são imediatamente preenchidas por elétrons mais externos e energéticos, de maneira a ser mantida uma menor instabilidade do átomo. Conjuntamente, ocorre a emissão de raios X, cuja energia é equivalente à diferença entre as energias dos níveis e subníveis das transições eletrônicas. Como a intensidade de dado comprimento de onda é proporcional à concentração do elemento na amostra, obtém-se a caracterização quantitativa dele, o que permite obter a composição química do mineral que está sob análise. As principais vantagens dessa técnica são sua precisão e tempo de análise rápido, sendo importante destacar que é um método sensível para determinação precisa de elementos traço (por exemplo, Y, Zr, Sr, Rb etc.).

O **microscópio eletrônico de varredura** (MEV) fornece imagens de alta resolução e ampliação, pois pode alcançar aumentos de até 300.000 vezes, revelando detalhes que, em microscópios convencionais, não poderiam ser vistos. A chamada imagem eletrônica de varredura é originada pela incidência de um feixe de elétrons no mineral que promove a emissão de elétrons secundários e retroespalhados. Os elétrons retroespalhados são os responsáveis pela demonstração das diferenças composicionais na região estudada do mineral. A obtenção de informações sobre feições morfológicas superficiais dos minerais é uma das principais utilidades dessa técnica. Ainda, o EDS (*Energy Dispersive System*) pode ser acoplado ao MEV e com ele pode ser realizada uma análise de zonação. Em outras palavras, permite a obtenção de um mapa de distribuição dos elementos dentro da seção mineral que está sendo caracterizada. No caso do estudo de gemas, por exemplo, pode ser obtida a variação da composição da gema ao longo do cristal (borda-núcleo-borda).

Figura 2.14 | Imagens obtida por MEV:



Fonte: a) <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/99/Hematite_in_Scanning_Electron_Microscope%2C_magnification_100x.JPG>; b) <https://www.researchgate.net/profile/Chirita_Marius/publication/254323126/figure/fig6/AS:323152203796485@1454056897667/Figure-6-SEM-image-of-38-h-magnetite-microcrystals-monodispersive-microcrystal-100-m-m.png>. Acesso em: 15 out. 2017.



Assimile

O MEV tem muitas aplicações na mineralogia e, se usado com o EDS, permite a obtenção de informações cristalográficas e composicionais, sendo estas alcançadas simultaneamente.



Considerando a caracterização de um mineral, como o talco, reflita sobre as diferenças entre as análises obtidas pelas técnicas de Fluorescência de Raios X e Microscopia Eletrônica de Varredura para esse mineral.

Além destas, outras técnicas podem ser utilizadas na caracterização mineral, tais como o uso do **microscópio eletrônico de transmissão, microsonda eletrônica, espectrometria de massas por íons secundários e difração de raios X**. Esta última já foi estudada anteriormente e, nesta seção, é importante sabermos que a caracterização por difração de raios X é feita através da comparação do difratograma obtido com padrões de referência, tais como os disponibilizados pelo *International Centre for Diffraction Data* (Centro Internacional para Dados Difratados, em tradução livre).

Sem medo de errar

Prezado aluno, você percebeu que diversas são as análises possíveis para se obter a caracterização mineral, não é mesmo? Porém, cada uma destas possíveis análises ou técnicas apresenta suas particularidades: algumas são mais simples e básicas, outras são mais complexas, com a utilização de técnicas mais robustas e que necessitam de uma etapa prévia de preparo das amostras.

Você se lembra da situação-problema que lhe foi proposta no início desta seção? Você, como responsável por um laboratório de análise mineral, deveria conhecer sobre as diferentes técnicas e análises minerais. Mais especificamente, quais poderiam ser úteis para a caracterização dos minerais hematita, fluorita e talco, pois estes são de interesse para a indústria que solicitou informações ao laboratório em que trabalha.

Portanto, com base nos conhecimentos que você adquiriu nesta seção, a primeira análise que pode ser realizada nesses minerais é a macroscópica. Esta é a mais simples, pois além de não precisar da preparação da amostra, utiliza materiais/utensílios básicos. Porém, lembre-se de que, se você previamente sabe o grupo mineral ao qual pertence o mineral, certos testes não necessitam ser feitos.

Por exemplo, o talco é um silicato, logo não irá reagir com o ácido clorídrico no teste da solubilidade. Em seguida, a microscopia óptica é uma técnica que pode ser utilizada, pois diversas propriedades morfológicas e ópticas podem ser observadas através dela e servir de diagnóstico para a identificação e caracterização mineral.

Além dessas análises, existem outras mais acuradas ou de maior detalhe. É o caso da microscopia eletrônica de varredura, que permite um aumento de 300.000 vezes para observar o mineral, e ainda possibilita um mapeamento da distribuição de elementos no local sob análise.

Agora é a hora de você, como técnico do laboratório, informar à indústria sobre essas análises. É importante também que ela seja informada que a escolha da análise a ser realizada depende ainda do grau de informação necessária, ou seja, não é necessário fazer um ensaio de difratômetro de raios X se somente se deseja saber sobre a dureza do mineral, e não sobre a estrutura.

Sendo assim, presente, na forma de um relatório, os estudos que realizou. Nesse relatório, além do que você já descreveu em seções anteriores, deverá conter a descrição de análises e técnicas apresentadas nesta seção. Portanto, leia este material didático e extraia tantas informações quanto desejar. Bom trabalho!

Avançando na prática

Projeto “Mineralogia na Escola”

Descrição da situação-problema

Você é professor de uma escola e, após uma visita ao Museu de Mineralogia com seus alunos, eles se mostraram muito interessados em mineralogia. Sendo assim, você planejou um projeto intitulado “Mineralogia na Escola”, de maneira a instigar os alunos a buscarem a caracterização de diferentes minerais. Com esse projeto, você conseguiu algumas doações, como: porcelana, ácido clorídrico diluído e amostras de quartzo, calcita, fluorita e piritita. Porém, como será possível para os alunos realizarem a caracterização de minerais somente com esses materiais?

Resolução da situação-problema

Lembre-se de que a análise macroscópica de minerais é realizada em amostras de mão com o uso de utensílios básicos. Portanto, com os materiais que você obteve, é possível realizar, junto aos seus alunos, uma caracterização inicial, pois você está de posse das amostras (diferentes minerais) e dos utensílios (porcelana e ácido clorídrico diluído). A porcelana será utilizada para se obter a cor do traço dos minerais, enquanto que o ácido poderá ser realizado no teste da solubilidade. Ainda, dentre as amostras que você possui, três delas (quartzo, calcita e fluorita) têm dureza conhecida na Escala de Mohs. Portanto, com o auxílio dessas três amostras, pode-se buscar conhecer a dureza da pirita também.

Faça valer a pena

1. Chama-se de análise macroscópica aquela cuja investigação é realizada em amostras de mão. Geralmente, para tal análise, são utilizados materiais ou utensílios de fácil acesso e manuseio, sendo indispensáveis para laboratórios de análise mineral.

Assinale a alternativa que apresenta a correta relação entre o nome e a característica do material.

- a) Ímã: não possui importância na análise mineral.
- b) Ácido clorídrico: é utilizado para conhecer a dureza do mineral.
- c) Porcelana branca: é utilizada no teste da chama.
- d) Lupa: é útil quando todas as características das amostras de mãos não podem ser totalmente identificadas a olho nu.
- e) Canivete: utilizado porque possui dureza 2 na Escala de Mohs.

2. A microscopia óptica é uma das técnicas mais utilizadas na identificação mineral. Para isto, é necessário o uso de um microscópio petrográfico e de lâminas, sendo que estas podem ser de somente um mineral ou de um aglomerado mineral (rocha).

Considerando que diferentes características podem ser analisadas, assinale a alternativa que apresenta aquelas que dependem do uso do analisador do microscópio:

- a) Hábito e forma cristalina.
- b) Cor e pleocroísmo.
- c) Anisotropia e extinção.
- d) Clivagem e maclas.
- e) Nenhuma das alternativas.

3. Os minerais são de importância única em nosso cotidiano e, por esse motivo, sua correta identificação é fundamental. Diversas são as análises possíveis para esse tipo de identificação, podendo um mineral ser caracterizado em escala macro ou maior.

A respeito da caracterização mineral, assinale a alternativa correta:

- a) A análise macroscópica, por ser a olho nu, não utiliza nenhum material ou utensílio.
- b) O teste da solubilidade é utilizado, principalmente, para a identificação de minerais do grupo dos sulfetos.
- c) O microscópio de luz polarizada e o microscópio de luz refletida são utilizados para a identificação de minerais opacos.
- d) A fluorescência de raios X permite somente a análise mineral quantitativa.
- e) São utilizados padrões de referência para comparação quando da análise por difratômetro de raios X.

Referências

KLEIN, C.; DUTROW, B. **Manual de Ciência dos Minerais**. 23. ed. Porto Alegre: Bookman, 2012.

NEVES, P. C. P.; SCHENATO, F.; BACHI, F. A. **Introdução à Mineralogia Prática**. 2. ed. Porto Alegre: Ulbra, 2008. 336 p. il.

PRESS, F. et al. **Para Entender a Terra**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

RAITH, M. M.; RAASE, P.; REINHARDT, J. **Guia para microscopia de minerais em lâminas delgadas**. 2014. Disponível em <www.ufrgs.br/igeo/ig/arquivo/Guia_microscopia_print_resolution_compressed.pdf>. Acesso em: 13 dez. 2017.

TEIXEIRA, W. et al. **Decifrando a Terra**. São Paulo: Oficina de Textos, 2000. p. 167-180.

WICANDER, R.; MONROE, J. S. **Fundamentos de Geologia**. São Paulo: Cengage Learning Edições, 2009. 508p.

Rochas: origem, composição e classificação

Convite ao estudo

Prezado aluno, nas unidades anteriores, estudamos sobre a estrutura interna dos minerais, bem como a classificação deles em grupos e suas principais características. Nesta terceira unidade, daremos início ao estudo das rochas, abordando, primeiramente, sobre assuntos essenciais para a compreensão da origem, classificação e composição desses materiais constituintes de nosso planeta. Em seguida, aprofundaremos o conhecimento sobre as rochas ígneas com a apresentação das principais ocorrências e características desse tipo rochoso, que pode ser tanto intrusivo quanto extrusivo. Para finalizar, abordaremos sobre os processos e ambientes envolvidos na formação de rochas sedimentares, bem como os diferentes tipos de metamorfismo e de rochas formadas por esse importante processo geológico. A intenção é que seja compreendida a importância desses materiais, bem como quais são as principais composições mineralógicas encontradas nos diferentes tipos rochosos.

Para que você entenda a aplicabilidade desses conteúdos, vamos considerar a seguinte situação: você faz parte de uma equipe de trabalho multidisciplinar de uma empresa nacional que atua em exploração e beneficiamento mineral. Recentemente, durante a etapa de pesquisa mineral, essa empresa encontrou um grande afloramento de mármore com intrusões graníticas em uma área ainda não explorada. Os minerais calcita e quartzo já foram previamente identificados e são importantes para a indústria, pois podem ser utilizados, respectivamente, na fabricação de cimentos e vidros. Agora, a empresa necessita saber outros possíveis minerais que

também podem ser encontrados nessas litologias. Para isso, você e toda a equipe deverão realizar estudos que, ao final, guiarão a confecção de um relatório a ser apresentado para os diretores da empresa, o qual detalhará a possível composição mineralógica dessas rochas.

Sendo assim, imagine que você iniciou seu estudo considerando, por exemplo, os seguintes questionamentos: é possível que essas rochas sejam formadas por um único mineral? Essas rochas se formam no interior ou na superfície terrestre? Quais são os minerais formadores e os possíveis minerais acessórios do granito e do mármore?

Ao final desta unidade, você deverá estruturar um relatório que contemple as informações mais importantes obtidas durante seu estudo e apresentá-lo à empresa. Sendo assim, leia com atenção esta unidade de ensino e bons estudos!

Seção 3.1

Introdução ao estudo das rochas: origem, classificação e composição

Diálogo aberto

Caro aluno, agora que você já sabe sobre os minerais e sua estruturação interna, é hora de conhecer sobre as rochas. Talvez, durante uma viagem ou até mesmo em seu dia a dia, você observou a paisagem e percebeu que existem rochas de diferentes colorações e até mesmo diferentes características. Será que todas elas apresentam a mesma origem e possuem a mesma classificação? A composição mineralógica é, basicamente, a mesma ou diferencia-se? Sendo assim, nesta seção, abordaremos sobre o ciclo das rochas, bem como a origem, a classificação e a composição desses materiais.

Antes de iniciarmos nossos estudos, convém lembrarmos rapidamente sobre o contexto de aprendizagem. Nele destacamos que você é integrante de uma equipe multidisciplinar, atuando nas áreas de exploração e beneficiamento mineral de uma empresa. Durante a pesquisa mineral, foi encontrada uma área inexplorada que apresenta mármore com intrusões graníticas. Além dos minerais calcita e quartzo encontrados nessas litologias, a empresa está buscando saber quais outros minerais podem ser encontrados ali. Portanto, primeiramente, devem ser conhecidos maiores detalhes sobre esses materiais geológicos.

Sendo assim, para desenvolver a primeira etapa de sua atividade, imagine que foi realizada uma reunião com a equipe multidisciplinar de maneira a realizar o planejamento do trabalho. Foi determinado que, em primeiro lugar, deveriam ser pensados nos seguintes questionamentos: o mármore e o granito possuem a mesma origem e classificação? Considerando somente a informação de que a área é constituída por mármore com intrusões graníticas, é possível inferir qual dos tipos de rocha é o mais antigo?

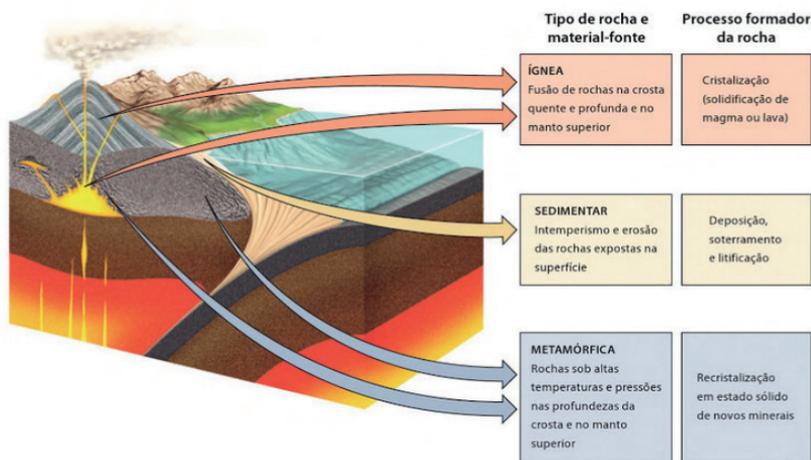
De que maneira você responderia a essas questões? Para esclarecer tais questionamentos, é importante que você entenda

sobre as condições que essas rochas foram originadas e, também, de que maneira a presença de intrusões pode elucidar sobre a relação de idades entre litologias. Portanto, atente-se ao conteúdo abordado nesta seção e faça bom proveito!

Não pode faltar

A litosfera é a camada superficial e sólida da Terra e, como consequência do caráter dinâmico da superfície (onde ocorrem processos, como tectonismo, intemperismo e erosão), nesta camada, existe uma grande abundância de tipos de rochas. Mas, o que são **rochas**? As rochas são agregados naturais constituídos de um ou mais minerais, sendo que os minerais se unem de maneira a preservar suas características individuais. A mineralogia e a textura (características que serão aprofundadas mais adiante) determinam a aparência e caracterizam as rochas, sendo propriedades determinadas pela origem geológica dela, ou seja, onde e como ela foi formada (Figura 3.1).

Figura 3.1 | Três tipos de rocha, sua formação em diferentes ambientes do planeta e processos formadores



Fonte: adaptada de Grotzinger e Jordan (2013, p. 76).

Assim, as rochas podem ser classificadas de acordo com sua gênese em três grupos ou famílias: magmáticas ou ígneas,

sedimentares e metamórficas (Figura 3.2). As nomeadas **rochas ígneas** têm sua origem pela solidificação de magma ou lava, que pode ocorrer tanto no interior da Terra (rochas plutônicas ou intrusivas, por exemplo, o granito) quanto em sua superfície (rochas vulcânicas ou extrusivas, sendo um exemplo o basalto). As **rochas sedimentares**, como conglomerados e calcários, são aquelas formadas pela deposição, pelo soterramento e pela litificação de sedimentos, cuja origem está relacionada ao intemperismo e à erosão de rochas expostas na superfície terrestre. A deposição dos sedimentos pode ocorrer em diferentes ambientes geológicos, tais como lacustre, fluvial e marinho. Diferentemente, as **rochas metamórficas** são aquelas formadas pela transformação de rochas preexistentes, podendo ser citados como exemplo o gnaiss e o mármore, sendo este último constituído por calcita comumente. Essa transformação (metamorfismo) ocorre na mineralogia e na textura originais devido à influência de pressão e temperatura, ocorrendo a recristalização de minerais.



Vocabulário

Lava: magma que atinge e extravasa na superfície terrestre, tanto em ambientes subaéreos quanto em subaquáticos.

Litificação: processo de transformação de material inconsolidado, como os sedimentos, em rocha maciça.

Figura 3.2 | Três tipos de rocha, sua formação em diferentes ambientes do planeta e processos formadores



Fonte: adaptada de Grotzinger e Jordan (2013, p. 76).

Qualquer tipo de rocha pode sofrer metamorfismo em ambientes com altas pressões (P) e temperatura (T) adequadas, com a geração de estruturas, como dobras e foliações e recristalização mineral. De maneira similar, todos os tipos de rocha podem ser conduzidos a ambientes de P e T ainda mais elevadas do que o metamórfico. Sendo assim, a fusão parcial pode ocorrer, gerando o magma novamente.

Onde essas rochas se encontram em nosso planeta? A **crosta terrestre**, que é dividida em crosta continental (áreas continentais) e crosta oceânica (assoalho oceânico), possui diferentes distribuições desses três tipos de rocha. Cerca de 95% do volume da crosta continental corresponde a rochas ígneas e metamórficas (também conhecidas como rochas cristalinas). Porém, quando se considera somente a área de cobertura rochosa superficial, as rochas sedimentares chegam a 75% (TEIXEIRA et al., 2003). Já a crosta oceânica é constituída, essencialmente, por basaltos.

Mas, afinal, como é que esses três grupos de rochas estão relacionados? As observações de cientistas ao longo dos anos originaram o conceito de **ciclo das rochas**. Esse ciclo resulta da interação entre dois dos geossistemas globais: o sistema da tectônica de placas e o sistema do clima. Com relação à tectônica de placas, atuante no interior terrestre, é importante a compreensão de que as rochas não constituem massas estáticas: nosso planeta está, desde a sua origem, há mais de 4 bilhões de anos, em constante modificação através de uma dinâmica que envolve processos de abalos sísmicos, atividades vulcânicas, movimentação tectônica, etc.



Pesquise mais

Para entender sobre a tectônica de placas, recomendamos a leitura do Capítulo 2, do livro *Fundamentos de Geologia*. Essa obra está disponível em sua biblioteca virtual.

WICANDER, R.; MONROE, J. S. Tectônica de Placas: uma teoria unificadora. In: _____. **Fundamentos de Geologia**. São Paulo: Cengage Learning Edições, 2009. 508p. Disponível em: <<https://biblioteca-virtual.com>>. Acesso em: 8 nov. 2017.

Porém, cabe também destacar o papel fundamental das atividades intempérica e erosiva. Estas, através de agentes, como o sol, as precipitações e os ventos, causam alterações quando atuantes sobre as rochas. Desta forma, continuamente, materiais e energia são permutados entre o interior terrestre, a superfície e a atmosfera.



Reflita

O ciclo das rochas que ocorre em nosso planeta, dependente da tectônica e do clima, é o mesmo que ocorre em outros planetas? Este ciclo existe em planetas que não possuem hidrosfera e atmosfera?

De maneira a contextualizar a interação entre os geossistemas, vamos considerar o seguinte exemplo: temos a ação do sistema de tectônica de placas quando ocorre a subducção e a consequente geração de magma. Este magma pode esfriar lentamente sob a superfície terrestre ou esfriar na superfície. Neste último caso, matéria e energia são transferidas para a superfície terrestre, onde a rocha torna-se passível à ação do intemperismo pelo sistema do clima. Além disso, o extravasamento de magma na superfície, geralmente, injeta cinzas vulcânicas (material piroclástico) e gás dióxido de carbono (CO_2) nas porções superiores da atmosfera.



Exemplificando

O conhecido “ano sem verão” ocorreu em 1816, quando condições climáticas destruíram lavouras na Europa e na América do Norte. Especialistas afirmam que o evento ocorreu devido à erupção do Tambora, em 1815, que lançou, aproximadamente, dois bilhões de toneladas de aerossol sulfúrico. Essas partículas espalharam-se pelo globo terrestre, bloqueando a luz solar e gerando um resfriamento planetário que durou três anos. Consequentemente, houve queda na temperatura de, aproximadamente, 3 °C, além de nevascas mais intensas no inverno. Autoridades no assunto acreditam ainda que, além de ter causado a perda de colheitas e posterior geração de fome, este evento vulcânico também foi responsável pela pandemia de cólera que ocorreu em 1817.

Agora, considerando a Figura 3.3, vamos exemplificar o ciclo das rochas considerando diferentes ambientes geológicos. O ciclo inicia-se com o rifteamento de um continente (Figura 3.3a). No interior continental, ocorre erosão, e sedimentos são depositados e, posteriormente, soterrados, formando as rochas sedimentares. Com a continuidade do rifteamento e a expansão (Figura 3.3b), há o desenvolvimento de uma bacia oceânica, com a ascensão de magma, originando a crosta oceânica composta por basalto (como exemplo, cadeia meso-oceânica do Oceano Atlântico). Posteriormente, inicia-se a subsidência (afundamento) das margens, acarretando no acúmulo de sedimentos e na formação de rocha sedimentar (Figura 3.3c). Com a continuação da subsidência, a crosta oceânica vai sendo consumida sob um continente (Figura 3.3d), ocasionando o soerguimento de uma cadeia de montanhas vulcânicas (por exemplo, a Cordilheira dos Andes). Com a subducção, ocorre a fusão das rochas que mergulham, originando não só as rochas vulcânicas mas também as plutônicas (como os granitos). Quando ocorre o fechamento total da bacia oceânica, há a colisão continental (Figura 3.3e), com rochas sendo soterradas e modificadas por calor e pressão, dando origem a cadeias de montanhas altas com rochas metamórficas (Cordilheira dos Himalaias). Com o soerguimento, há interferência na precipitação, pois as montanhas forçam o ar a ascender, esfriar e liberar sua umidade. Conseqüentemente, há a ação do intemperismo, originando sedimentos. Os sedimentos são transportados até os oceanos, onde são depositados em camadas (Figura 3.3f). Essas camadas são soterradas e sofrem litificação, tornando-se rochas sedimentares. E, assim, reinicia-se o ciclo.

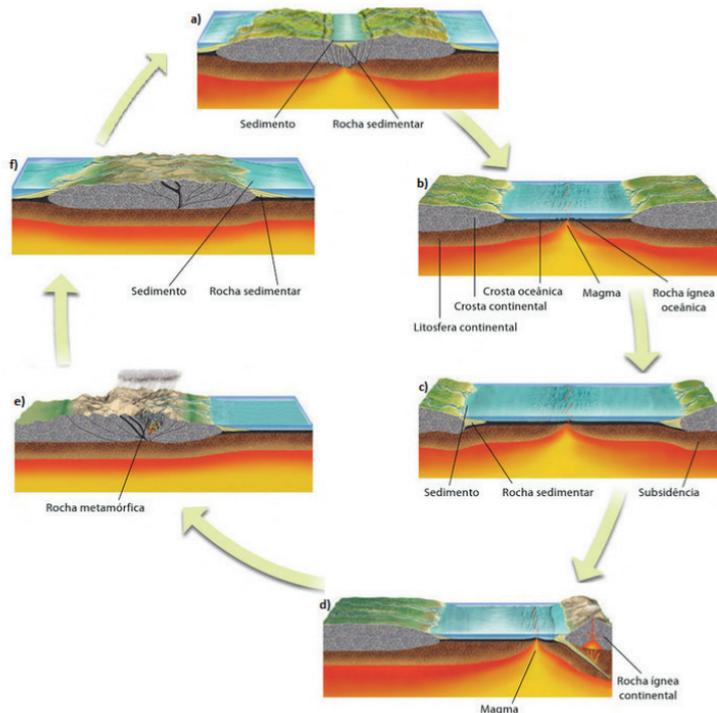


Vocabulário

Rifte: estrutura de bacia originada por tectônica extensional, desenvolvendo, nos continentes, grandes vales (*rift valley*), ou com sua evolução, oceanos.

Subducção: processo de descida da placa tectônica mais pesada sob a mais leve, podendo alcançar profundidades de, aproximadamente, 700 km.

Figura 3.3 | Ciclo das rochas



Fonte: adaptada de Grotzinger e Jordan (2013, p. 80).



Assimile

Convém, aqui, assimilar que o ciclo das rochas não tem fim. Ele ocorre em diferentes estágios ao redor do planeta Terra: em um lugar, pode formar montanhas, enquanto que, em outro, erodir; em um lugar, depositar sedimentos, enquanto que, em outro, soterrar; e assim sucessivamente.

Para que você entenda sobre o que diferencia um tipo de rocha do outro, vamos discutir sobre algumas características que elas apresentam. Você se lembra que, inicialmente, comentamos sobre a mineralogia e a textura? Ambas são determinadas pelas condições geológicas sob as quais as rochas foram formadas: no interior da Terra, as condições são de alta temperatura e pressão, enquanto que, na superfície, as temperaturas e as pressões são baixas. A textura é o modo como os minerais ou os grãos (constituintes das rochas) estão agrupados, contemplando os tamanhos e as formas deles. Quando

a rocha se forma em maiores profundidades, os constituintes têm tempo e espaço para se desenvolverem lentamente, gerando uma textura de minerais grossos (um exemplo é o granito, conforme Figura 3.2a). Entretanto, ao se formar na superfície ou próxima a ela, a rocha desenvolve-se em um tempo geológico mais curto, originando minerais finos que, inclusive, podem não ser vistos a olho nu (por exemplo, o basalto, ilustrado na Figura 3.2b).

As condições geológicas de origem interferem na composição química, a qual, por sua vez, determina a **mineralogia** (tipos e proporções dos minerais constituintes) das rochas. No Quadro 3.1, encontramos os minerais mais comuns existentes nas rochas. Como podemos perceber, a maioria dos minerais de ambos os tipos rochosos pertence ao grupo dos silicatos. Mas, afinal, por que isso ocorre? No caso das rochas ígneas, isto se deve ao fato de o silício ser muito abundante na crosta terrestre e, também, porque vários minerais do grupo dos silicatos fundem-se nas altas temperaturas e nas pressões, gerando o magma. Já a abundância desses minerais nas rochas sedimentares e metamórficas ocorre porque eles predominam, respectivamente, nas rochas que são alteradas para formar os sedimentos e nas rochas preexistentes do processo de metamorfismo. Dentre a composição mineralógica, são reconhecidos minerais essenciais e acessórios. Em uma determinada rocha, os minerais essenciais são os mais abundantes e estão sempre presentes. Inclusive, sua abundância determina o nome dado à rocha quando de sua classificação. Diferentemente, os minerais acessórios não alteram a classificação das rochas, sendo que a sua presença pode ou não ocorrer.

Quadro 3.1 | Minerais comuns dos diferentes tipos de rochas

Rochas ígneas	Rochas sedimentares	Rochas metamórficas
Quartzo	Quartzo	Quartzo
Feldspato	Argilominerais	Feldspato
Mica	Feldspato	Mica
Piroxênio	Calcita	Granada
Anfibólio	Dolomita	Piroxênio
Olivina	Gipsita	Estaurolita
	Halita	Cianita

Fonte: adaptado de Press et al. (2006, p. 106).

A estrutura de uma rocha é o seu aspecto geral externo, sendo analisada a olho nu. Em rochas ígneas extrusivas, uma das estruturas mais comuns é a vesicular, cuja origem está relacionada ao escape de gases quando da formação da rocha (Figura 3.4a). Em rochas sedimentares, chama-se de estruturas estratificadas (Figura 3.4b) aquelas que são originadas pela deposição de camadas de sedimentos umas sobre as outras. Temos, ainda, a xistosidade (Figura 3.4c), que é uma foliação desenvolvida durante o metamorfismo, na qual minerais tabulares alinham-se em uma determinada direção.

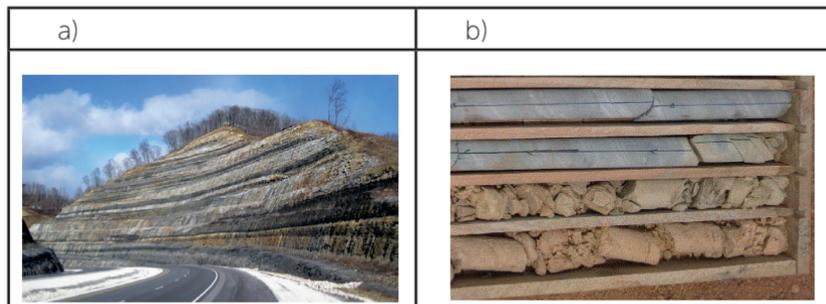
Figura 3.4 | Estruturas comuns em rochas



Fonte: a) <https://www.hq.nasa.gov/alsj/a11/a11-10072_80crp.jpg>; b) <https://c1.staticflickr.com/1/6/10199206_9471ae3c88_b.jpg>; c) <https://c1.staticflickr.com/1/434/31511141474_864a5f4192_b.jpg>. Acesso em: 9 nov. 2017.

Afinal, onde podemos encontrar as rochas para estudo? As rochas, frequentemente, são estudadas em afloramentos, que são locais onde elas se encontram expostas. Exemplos de afloramentos comuns são cortes de estradas (Figura 3.5a) ou minas a céu aberto, onde se encontram as rochas em superfície. Nestes locais, geralmente, podem ser observadas as estruturas das rochas e até mesmo o contato entre diferentes litologias, além de que podem ser facilmente coletadas amostras para análises necessárias. As sondagens e perfurações, que normalmente ocorrem nos continentes em busca de óleo, água ou recursos naturais, permitem o estudo das rochas em subsuperfície. Esses trabalhos podem apresentar como resultados os testemunhos de sondagem (Figura 3.5b), nos quais, além da litologia, muitas vezes, também é possível descrever a estrutura rochosa.

Figura 3.5 | Exposição de rochas a) em afloramento e b) em testemunhos de sondagem



Fonte: a) <https://c1.staticflickr.com/8/7650/16969464916_7531b5171d_b.jpg>; b) <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/81/Weathered_limestone_cores.jpg>. Acesso em: 9 nov. 2017.

Em uma análise de afloramento, caso seja observado o contato entre diferentes rochas, pode-se inferir sobre qual das duas litologias é a mais antiga e qual é a mais recente. Essa análise é feita pelo uso do Princípio das Relações de Interseção, o qual sustenta que qualquer rocha que foi cortada por um corpo intrusivo ígneo é mais antiga que esse corpo (Figura 3.6). Por exemplo, se um arenito é cortado por uma intrusão de basalto, o arenito é mais antigo, pois ele já existia quando foi cortado pelo basalto.

Figura 3.6 | Princípio das relações de interseção: a rocha cinza é mais antiga do que a preta (que é uma intrusão ígnea)



Fonte: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a3/Geological_Dike_Cross-Island_Trail_Alaska.jpg>. Acesso em: 9 nov. 2017.

Com esta introdução sobre as rochas, estaremos aptos a, nas próximas seções, nos aprofundarmos no estudo das rochas ígneas, sedimentares e metamórficas.

Sem medo de errar

Prezado aluno, nesta seção, foram apresentados conceitos e exemplos para auxiliar seu entendimento sobre a origem, a classificação e a composição das rochas, bem como lhe foi exposto sobre o ciclo das rochas. Agora é o momento de resolvermos os questionamentos apresentados no “Diálogo aberto”, por isso vamos relembrar nossa situação lançada no início desta seção: você, como integrante de uma equipe multidisciplinar, está realizando o planejamento de um estudo, pois a empresa na qual trabalha encontrou uma área inexplorada que contém mármore com intrusões graníticas. Sendo assim, a empresa está buscando saber que outros minerais, além de calcita e quartzo, podem ser encontrados nessas litologias. Portanto, primeiramente, maiores detalhes sobre esses materiais geológicos devem ser compreendidos e, para isso, os seguintes questionamentos devem ser respondidos: o mármore e o granito possuem a mesma origem e classificação? Considerando somente a informação de que a área é constituída por mármore com intrusões graníticas, é possível inferir qual dos tipos de rocha é o mais antigo?

Sendo assim, para responder ao primeiro questionamento, lembre-se de que, dependendo da gênese, as rochas podem ser divididas em três tipos, sendo elas rochas ígneas, sedimentares e metamórficas. A formação das rochas ígneas pode ocorrer tanto no interior terrestre quanto em sua superfície pela solidificação de magma. O granito é um exemplo de rocha, cuja origem ocorre no interior e, portanto, apresenta minerais mais grossos. Já o mármore é uma rocha metamórfica, ou seja, sua origem está relacionada à transformação de rochas preexistentes pela ação de pressão e temperatura.

Por fim, considerando de que se trata de uma área de mármore com intrusão de granito (que é uma rocha ígnea), é possível que seja indicada quais das duas litologias é a mais antiga. Essa indicação se embasa no Princípio das Relações de Interseção, que sustenta que uma rocha que é cortada por uma intrusão ígnea é mais antiga

que a intrusão. Logo, no caso da área encontrada pela empresa, o mármore é mais antigo que a intrusão granítica.

Desta forma, você conclui a primeira etapa de sua atividade. Lembre-se de que você já pode iniciar a elaboração do relatório que contempla as informações mais importantes obtidas durante seu estudo, pois, ao final de sua atividade, você deverá apresentá-lo à empresa.

Avançando na prática

Feira escolar

Descrição da situação-problema

Anualmente, ocorre uma feira de ciências na escola em que você leciona. O tema central deste ano é "O Planeta Terra", o qual deverá ser discutido entre alunos e professores de diversas áreas de ensino. Por sorteio, sua turma de alunos da disciplina de Química, junto aos alunos da disciplina de Geografia, deverão montar uma apresentação ou um vídeo expondo sobre os constituintes do nosso planeta: as rochas. Portanto, para iniciar a preparação desta apresentação, primeiramente, seus alunos necessitam ter acesso a informações sobre o assunto, tais como os tipos de rochas e como são formadas.

Ao saberem sobre a atividade que deveriam desenvolver, os alunos, de imediato, ficaram interessados sobre a temática. Entretanto, começaram a questionar: professor, como as rochas são formadas? Qual é a composição mineralógica destas rochas? De que maneira os diferentes tipos de rochas estão relacionados uns com os outros?

Resolução da situação-problema

Para responder aos questionamentos de seus alunos e, assim, iniciar a atividade que lhe foi solicitada, primeiramente, é necessário que você relembre o que aprendeu nesta seção. Inicie sua explicação aos alunos expondo o que são rochas, pois esta é uma boa maneira de introduzir a apresentação que eles deverão realizar. Relembre

que rochas são agregados naturais constituídos de um ou mais minerais, e elas são divididas em três grupos, dependendo da sua gênese, sendo eles: rochas ígneas ou magmáticas, sedimentares e metamórficas, sendo que cada um desses tipos possui mineralogia e textura características. Explique aos seus alunos que as rochas magmáticas, como o próprio nome sugere, são aquelas originadas pelo magma no interior ou na superfície terrestre, sendo constituída, principalmente, por minerais, como quartzo, feldspato, mica, piroxênio, anfibólio e olivina. Já as sedimentares têm sua origem relacionada com a deposição, o soterramento e a litificação de sedimentos, apresentando, em sua composição, quartzo, argilominerais, feldspato, calcita, dolomita, gipsita e halita. Por fim, as rochas metamórficas são formadas pela transformação de rochas preexistentes (podendo ser de qualquer tipo). Os minerais quartzo, feldspato, mica, granada, piroxênio, estauroilita e cianita são comuns nesse tipo de rocha.

Com relação ao segundo questionamento de seus alunos, descreva a eles sobre o ciclo das rochas. Neste momento, é importante a compreensão de que, devido à interação entre a tectônica de placas e o clima, todas as rochas se relacionam através de um ciclo. Você pode, inclusive, citar um exemplo simples: após a erupção de um vulcão, dando origem a uma rocha vulcânica, esta será erodida e acumulará sedimentos. Estes serão soterrados e litificados, com a consequente formação de uma rocha sedimentar. Se esta for soterrada e modificada por calor e pressão, dará origem às rochas metamórficas.

Com essas informações repassadas aos alunos, eles terão condições de iniciar a preparação da apresentação ou do vídeo para a feira escolar.

Faça valer a pena

1. O ciclo das rochas descreve as transformações que ocorrem, através do tempo geológico, entre as rochas ígneas, sedimentares e metamórficas. A existência deste ciclo evidencia que existe dinamicidade no Planeta Terra, sendo fruto da ação de agentes exógenos e endógenos.

Com relação ao ciclo das rochas, é correto afirmar:

- a) O ciclo é independente dos geossistemas.
- b) O sistema da tectônica de placas é um processo externo na Terra, sendo responsável por manter as rochas como massas estáticas.
- c) As atividades intempérica e erosiva têm papel fundamental no ciclo.
- d) Não existem registros de mudanças no clima como consequência de erupções vulcânicas.
- e) Quando ocorre colisão continental, devido ao soterramento e à influência de altas temperaturas e pressões, ocorre a origem de rochas sedimentares.

2. A maioria dos minerais que compõem as rochas ígneas, sedimentares e metamórficas pertence ao grupo dos silicatos. Isso ocorre porque o silício é um elemento muito comum, além de que vários minerais silicatados fundem-se a altas pressões e temperaturas, gerando o magma.

Assinale a alternativa que contém minerais silicatados comuns nos três tipos de rocha.

- a) Quartzo e mica.
- b) Quartzo e feldspato.
- c) Piroxênio e feldspato.
- d) Calcita e granada.
- e) Halita e olivina.

3. As rochas podem ser divididas de acordo com sua gênese em três tipos diferentes, sendo que cada uma delas possui diferentes processos formadores. Assim, cada uma possui características próprias, tais como a composição mineralógica e as texturas.

Sobre os processos e as características das rochas, é correto afirmar que:

- a) As rochas ígneas têm sua origem relacionada somente ao extravasamento de magma na superfície terrestre.
- b) A origem de rochas sedimentares não está relacionada a processos de intemperismo e erosão.
- c) O granito é uma rocha sedimentar.
- d) Rochas ígneas e sedimentares podem sofrer metamorfismo.
- e) Gnaisse e basalto são exemplos de rochas metamórficas.

Seção 3.2

Rochas ígneas

Diálogo aberto

Caro aluno, na seção anterior, introduzimos o estudo sobre as rochas e, dentre outras coisas, aprendemos sobre suas características e seu ciclo. Vimos, muito brevemente, que existem três tipos de rochas na Terra: as ígneas, as sedimentares e as metamórficas. Nesta segunda seção de estudo, estudaremos alguns assuntos fundamentais para o entendimento das rochas ígneas, tais como o que é a fusão parcial e a cristalização fracionada. Veremos, também, sobre a composição química e mineralógica dessas rochas, como o magma se origina e como pode evoluir composicionalmente.

Para dar continuidade ao nosso processo de aprendizagem, vamos lembrar brevemente nosso contexto apresentado no início desta unidade. Você faz parte de uma equipe multidisciplinar de uma empresa de exploração e beneficiamento mineral que, recentemente, encontrou um grande afloramento de mármore com intrusões graníticas. Por ser uma área ainda não explorada, a empresa necessita saber os possíveis minerais que podem ser encontrados nestas litologias. Portanto, você e sua equipe estão envolvidos na realização de estudos que instruirão um relatório no qual detalhará a possível composição dessas rochas.

Dando sequência ao seu trabalho, a equipe de trabalho iniciou a pesquisa sobre as rochas graníticas. Vocês sabem, previamente, que a composição química é uma característica que depende da origem da rocha. Portanto, decidiram que a pesquisa deve se concentrar, principalmente, nas seguintes perguntas: qual é a origem de rochas graníticas? Considerando todos os minerais existentes, quais podem ser encontrados nestas rochas em maiores quantidades? E em menores quantidades?

E agora, como você trataria dessas questões? Para lhe ajudar, vamos ensinar a você sobre os processos que podem originar essas rochas plutônicas e que existem diversos minerais que podem compor as rochas graníticas. Além disso, veremos também sobre quais desses minerais se formam primeiramente devido à

temperatura. Portanto, não perca tempo e comece logo sua leitura. Bons estudos!

Não pode faltar

As rochas ígneas são aquelas cuja formação ocorre a altas temperaturas a partir de matéria mineral fundida a grandes profundidades. A este material fundido denominamos magma, sendo que ele pode deslocar-se no interior da crosta terrestre em direção a regiões com menor pressão, e que, quando se consolida, constitui as rochas ígneas. O magma, cuja temperatura varia entre 700 e 1200 °C, é constituído por: a) porção líquida que corresponde ao material rochoso fundido; b) porção sólida que constitui minerais já cristalizados e fragmentos rochosos que podem ser transportados junto à porção líquida; e c) porção gasosa que corresponde a voláteis, como H_2O , CO_2 , SO_2 e SO_3 , dissolvidos na porção líquida. Essas porções ocorrem em proporções variáveis em função da origem e da evolução do magma.

Já vimos anteriormente que os minerais mais abundantes na crosta terrestre são os silicatos. Geralmente, a fusão de rochas da crosta gera magmas que são ricos em sílica, mas que também contêm diferentes proporções de alumínio (Al), cálcio (Ca), sódio (Na), ferro (Fe), magnésio (Mg), potássio (K), entre outros. Por outro lado, quando se fundem rochas do manto (camada abaixo da crosta terrestre, composta por silicatos ferromagnesianos), o magma terá uma composição com menos sílica e mais Fe e Mg. Desta forma, a sílica é o constituinte principal da maioria dos magmas, mas sua variação é a responsável por dividir e caracterizar os magmas de acordo com sua composição em: ácidos, intermediários, básicos e ultrabásicos. O magma ácido é rico em sílica, com mais de 65% desse composto, e contém também relevantes proporções de Na, K e Al, mas pouco Ca, Fe e Mg. Já o magma básico tem somente entre 45-52% de sílica, contendo mais Ca, Fe e Mg, enquanto que o ultrabásico possui menos de 45% de conteúdo em sílica. O magma intermediário, como o próprio nome sugere, possui uma composição intermediária entre os magmas ácidos e básicos. Cada um desses tipos de magma é responsável pela origem de diferentes tipos de rochas, conforme Tabela 3.1.

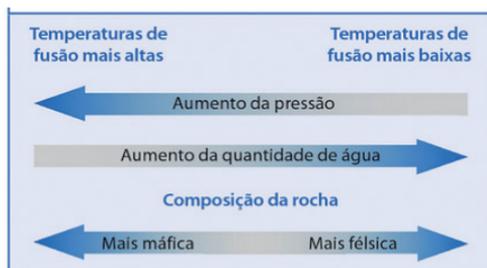
Tabela 3.1 | Tipos mais comuns de magmas, suas características composicionais e tipos de rochas

Tipo de magma	Conteúdo de sílica (%)	Sódio, potássio e alumínio	Cálcio, ferro e magnésio	Tipos de rochas
Ultrabásico	< 45	↓	Aumento	Ultramáficas
Básico	45 – 52		↑	Máficas
Intermediário	53 – 65	Intermediárias		
Ácido	> 65	Aumento		Félsicas

Fonte: Wicander e Monroe (2009, p. 76).

Mas, como se forma o magma? Como dito anteriormente, o magma é um material fundido e, portanto, sua origem está relacionada aos processos de fusão das rochas, que dão origem a este material. O ponto de fusão de uma rocha depende de sua composição, assim como das condições de temperatura (T) e pressão (P). A **fusão parcial**, por exemplo, é um fenômeno que ocorre devido ao fato de que os minerais constituintes das rochas se fundem em diferentes T. O gradiente geotermal é uma taxa de aumento de temperatura conforme há o incremento da profundidade no interior do planeta. Então, devido a este gradiente, conforme ocorre o gradativo aumento da temperatura e dependendo do ponto de fusão, alguns minerais se fundem (e passam a ser nomeados de fusão parcial) e outros permanecem em seu estado sólido. Já a **fusão por decompressão** é um processo no qual a diminuição da pressão pode fundir a rocha (Figura 3.7), desde que a temperatura seja constante e suficientemente alta. A presença de água também é capaz de controlar a fusão (Figura 3.7), pois ela atua como um agente adicional para quebrar as ligações intermoleculares/interpartículas. Desta forma, quanto maior a quantidade de água, menor será o ponto de fusão.

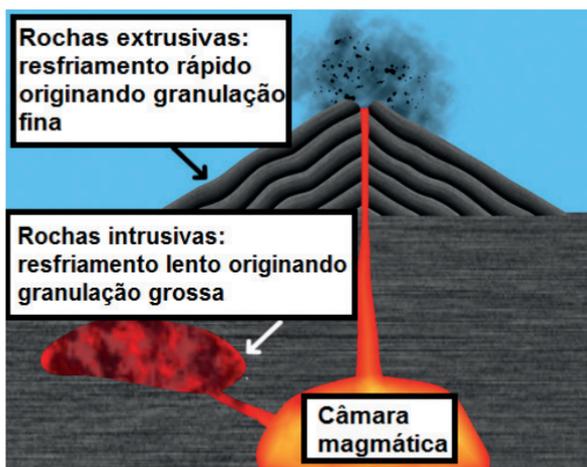
Figura 3.7 | Tipos mais comuns de magmas, suas características composicionais e tipos de rochas



Fonte: Grotzinger e Jordan (2013, p. 99).

Após ter sido gerado, a tendência é que o magma se desloque em direção à superfície, uma vez que possui densidade menor do que as rochas que estão por cima. Ele pode ascender através de falhas geológicas e fraturas, ou ainda formar gigantes bolsões na forma de "gotas invertidas". À medida que este bolsão de magma se move, ele pode fundir as rochas encaixantes (isto é, rochas preexistentes), e assim, dependendo do tipo de rocha, pode implicar a mudança da composição química original do magma. Quando grandes volumes de magma ficam "estacionados" a determinadas profundidades na crosta terrestre, são denominados de **câmaras magmáticas** (Figura 3.8). São estas câmaras que fornecem material para as manifestações vulcânicas, sendo que o magma é conduzido até a superfície através de condutos magmáticos e vulcânicos.

Figura 3.8 | Representação de câmara magmática e origem de rochas intrusivas e extrusivas



Fonte: adaptado de <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a9/Igneous_rock_eng_text.jpg>. Acesso em: 4 dez. 2017.

Dois tipos de magma se destacam por sua abundância na crosta, sendo eles o magma granítico, com mais de 65% de sílica (portanto, magma ácido), e o magma basáltico, com teores de sílica entre 45 e 52% (portanto, magma básico). As características físicas desses magmas, como viscosidade e temperatura, são fortemente relacionadas à composição deles. O magma basáltico possui temperaturas entre 1000 e 1200 °C e a viscosidade é baixa. Por outro

lado, os magmas graníticos são mais viscosos e as temperaturas, geralmente, são entre 700 e 800 °C. Portanto, podemos observar que a viscosidade do magma silicático é maior quando aumenta o teor de sílica e a temperatura é reduzida. O conteúdo de voláteis também é importante, pois quanto menor, maior a viscosidade.



Assimile

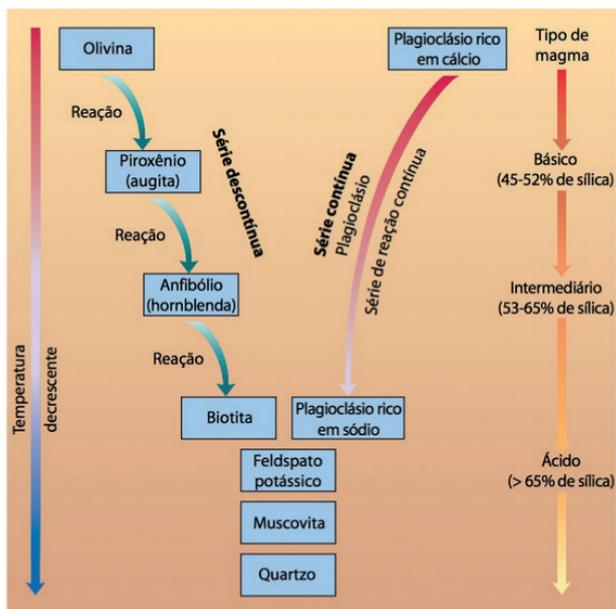
A relação da viscosidade com o teor de sílica pode ser explicada pelo comportamento dos tetraedros de sílica. Para o entendimento, devemos nos lembrar que os tetraedros de sílica são as unidades estruturais dos minerais silicáticos que se formam quando o magma se cristaliza. Esses tetraedros tendem a se polimerizar (unindo-se em estruturas cada vez mais complexas) conforme o magma vai se cristalizando. Em magmas ricos em sílica, como o granítico, a polimerização já ocorre nos primeiros momentos da cristalização e produz grandes cadeias que dificultam o fluxo de magma (portanto, aumentam sua viscosidade). Já em magmas básicos, por possuírem menores teores de sílica, a polimerização só ocorre em etapas avançadas da cristalização do magma. Portanto, não há a formação de grandes cadeias de estruturas polimerizadas que possam dificultar o fluxo de magma e, sendo assim, os magmas basálticos têm viscosidades baixas, principalmente, devido ao seu teor de sílica.

Agora, vamos discutir sobre a variedade composicional dos magmas e, por consequência, também das rochas ígneas. As diferenças composicionais ocorrem devido aos próprios processos geradores de magma, ou seja, dependem do tipo de rocha cuja fusão originará o magma e da taxa de fusão desta rocha original. Cabe mencionar também que a profundidade em que ocorre a fusão pode influenciar a composição dos magmas gerados. De maneira a exemplificar a dependência do tipo de rocha original com a composição do magma, vamos considerar o magma basáltico e o magma granítico. Os basálticos são originados pela fusão de peridotitos mantélicos, que são rochas formadas, basicamente, por minerais ferromagnesianos (como olivina e piroxênios). Por outro lado, o magma granítico é associado à fusão de partes profundas da crosta continental, que é muito rica em sílica.

Os chamados processos modificadores de magmas originais têm sua origem atrelada à fusão parcial. Dentre eles, o mais importante é o

da **cristalização fracionada**. A cristalização é um processo complexo e, quanto em maior profundidade, mais demorado. Quando em altas T, todos os constituintes do magma estão dissolvidos no material fundido e, portanto, ele é líquido. A partir do momento que o magma inicia seu deslocamento para porções mais superficiais, a T vai diminuindo. Ao chegar a uma temperatura específica, a cristalização magmática se inicia com a formação de pequenos núcleos de cristais que crescem para constituir as fases minerais da rocha ígnea. Neste início da cristalização magmática, não ocorre a cristalização concomitante de diferentes fases minerais. Portanto, algumas espécies minerais são originadas primeiramente, fazendo com que o magma remanescente (isto é, o material que ainda não foi cristalizado) tenha sua composição alterada pela ausência destes primeiros minerais. Assim que a T diminuir ainda mais, as demais fases minerais (que se cristalizam em menores temperaturas) irão se agregar com aquelas que já estão em processo de cristalização. Esta sequência de cristalização dos minerais foi estabelecida com base em parâmetros termodinâmicos, para magmas basálticos, em um mecanismo conhecido como **séries de reação de Bowen** (Figura 3.9).

Figura 3.9 | Séries de reações de Bowen



Fonte: Wicander e Monroe (2009, p. 78).

Como pode ser observado na Figura 3.9, este mecanismo é constituído por duas séries de reações, sendo uma contínua e outra descontínua. Desta forma, conforme o magma vai se resfriando, os minerais vão cristalizando simultaneamente de acordo com estas séries. Para melhor entender o mecanismo, vamos considerar, primeiramente, a série descontínua, a qual, conforme a Figura 3.9, contém somente silicatos ferromagnesianos. Como já sabemos, quando a T atinge um determinado limite, um certo mineral começa a se cristalizar. Após sua formação, ele reage com o magma remanescente para formar o próximo mineral da sequência. A olivina, cuja composição é $((Mg, Fe)_2SiO_4)$, é o primeiro dos silicatos ferromagnesianos a se cristalizar. Com a continuação de resfriamento do magma, ele atingirá um limite de temperatura no qual a augita $((Ca, Mg, Al)_2(Si, Al)_2O_6)$, é estável. Desta forma, a olivina reage com o magma remanescente e a augita se cristaliza. Da mesma forma, com o decréscimo de T, a hornblenda $(Ca_2Na(Mg, Fe)_4(Al, Fe, Ti)AlSi_8AlO_{22}(OH, O)_2)$ e a biotita $(K_2(Mg, Fe^{2+})_{4-6}(Fe^{3+}, Al, Ti)_{0-2}Si_{5-6}Al_{2-3}O_{20}(OH, F)_4)$ também irão se cristalizar. Já na série contínua de reação de Bowen estão os plagioclásios, cuja fórmula geral é $(Ca, Na)Al(Al, Si)Si_2O_8$. O primeiro plagioclásio que se cristaliza é o da variedade anortita, que é rico em Ca, e à medida que o magma vai esfriando, plagioclásios mais ricos em Na são cristalizados.

Considerando as duas séries de reações de Bowen, o Fe e o Mg são consumidos quando da cristalização dos silicatos ferromagnesianos, enquanto que o Ca e Na são utilizados nos plagioclásios. Assim, depois de formados esses minerais, o magma residual (ou restante) estará enriquecido em elementos, como K, Al e Si, e desta forma terá continuidade a cristalização dos próximos minerais da série, que são o feldspato potássico (ortoclásio - $KAlSi_3O_8$), a muscovita $(KAl_2Si_3AlO_{10}(OH, F)_2)$ e o quartzo (SiO_2). Então, é importante notar que, com a cristalização fracionada, os magmas vão sendo modificados composicionalmente, variando desde um tipo básico até ácido (Figura 3.9). A cristalização fracionada é apenas um dos mecanismos capazes de modificar composicionalmente um magma original. Outros processos modificadores que podem ocorrer são a mistura de magmas originalmente diferentes, a imiscibilidade de magmas e a assimilação de rochas quando da passagem do magma.

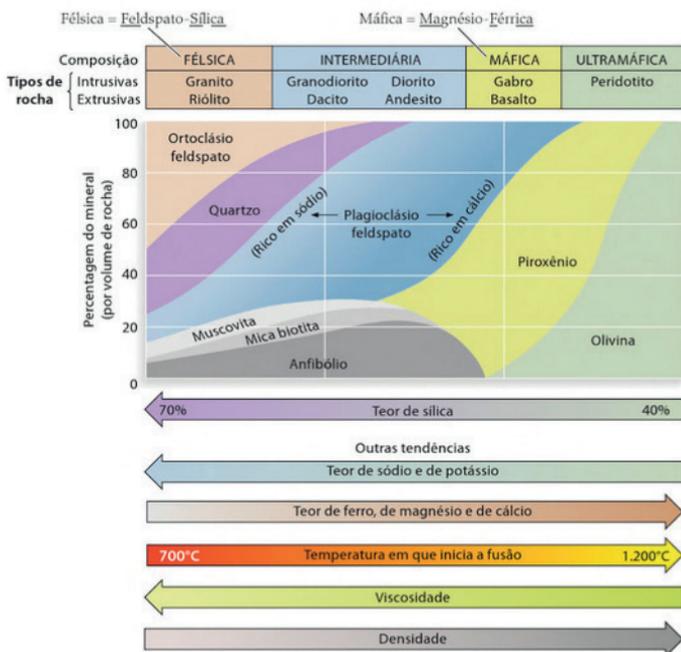


A série de reações de Bowen estabelece qual a ordem de cristalização dos minerais conforme o decréscimo de T. Porém, considerando a explicação sobre a fusão parcial, quais informações podemos obter com esta mesma série? É possível saber qual é a ordem de fusão dos minerais?

Agora que já vimos que os magmas possuem diferenças composicionais, de que maneira essas diferenças se refletem na composição das rochas ígneas? Exemplos de rochas com composições variadas podem ser encontradas em complexos estratiformes, nos quais o magma original era basáltico. Primeiramente, são originados peridotitos, os quais são rochas ricas em olivina e piroxênio, e estes são acumulados nas porções inferiores da câmara magmática. Em seguida, são originados os gabros, que são constituídos por plagioclásio cálcico e piroxênios; por fim, os anortositos, cuja composição é, basicamente, plagioclásio. Desta forma, tem-se um complexo estratiforme, ou seja, com camadas de diferentes composições rochosas.

As rochas ígneas podem ser divididas, de acordo com sua textura, em rochas intrusivas (formadas abaixo da superfície) e extrusivas (formadas na superfície), possuindo granulação fina e grossa, respectivamente (Figura 3.8). Com relação à sua **composição**, as classificações agrupam essas rochas de acordo com as proporções relativas de minerais silicáticos, como quartzo, feldspatos (ortoclásio e plagioclásio), micas (muscovita e biotita), anfibólios, piroxênios e olivina. Algumas rochas intrusivas e extrusivas possuem a mesma composição química e mineralógica, sendo diferenciadas somente no seu aspecto textural, como é o caso do basalto e do gabro, que possuem a mesma composição, mas têm texturas diferentes devido à sua formação na superfície e em profundidade, respectivamente. De igual maneira, podem ser citados o riolito e o granito, sendo o primeiro extrusivo e o segundo intrusivo, mas com a mesma composição. Assim, pode-se dizer que, com relação à composição química e mineralógica, as rochas extrusivas e intrusivas formam dois conjuntos paralelos. A Figura 3.10 evidencia essas relações de composição-textura e, através dela, podemos melhor compreender a composição das rochas ígneas.

Figura 3.10 | Classificação das rochas ígneas, sendo que, no eixo vertical, está expressa a composição mineralógica das rochas e, no eixo horizontal, tem-se a escala de teor de sílica por peso de rocha



Fonte: Grotzinger e Jordan (2013, p. 98).



Exemplificando

Você soube, através de uma análise química, que uma amostra de rocha de granulação grossa tem 70% de sílica. Considerando a Figura 3.10, poderia ser determinada que esta rocha é constituída por, aproximadamente, 6% de anfibólio, 3% de biotita, 5% de muscovita, 14% de plagioclásio, 22% de quartzo e 50% de ortoclásio, sendo classificada como um granito. Não poderia ser um riólito, pois, mesmo possuindo a mesma composição mineralógica, tem a granulação fina (rocha extrusiva).

Ao observar a Figura 3.10, podemos perceber que as **rochas félsicas** são pobres em Fe e Mg e ricas em minerais com altos teores de sílica, como quartzo, feldspato potássico e plagioclásio. Essas rochas, comumente, possuem cores mais claras, como rosadas ou cinzas. O granito, que é uma das rochas intrusivas mais abundantes,

é composto, basicamente, por quartzo e ortoclásio em abundância, além de menores quantidades de plagioclásio. Outros minerais, como micas (biotita e muscovita) e anfibólios, também podem ser encontrados em rochas graníticas.

As **rochas intermediárias** não são nem tão ricas em sílica quanto as félsicas, nem tão pobres quanto as máficas. O granodiorito é semelhante ao granito por também ter quartzo abundante, mas difere-se por possuir mais plagioclásio do que ortoclásio. O diorito é dominado por plagioclásio, com pouco ou nada do mineral quartzo em sua composição. Pode, ainda, ter minerais máficos, como biotita, anfibólio e piroxênio. Os equivalentes extrusivos do granodiorito e do diorito são, respectivamente, o dacito e o andesito, cujo nome se deve à cordilheira de montanhas vulcânicas dos Andes, na América do Sul.

As **rochas máficas** são ricas em piroxênios e olivinas, sendo estes minerais pobres em sílica e com abundância de Mg e Fe. Por este motivo, as rochas máficas apresentam colorações mais escuras. O gabro é um exemplo, sendo composto por piroxênio em abundância e quantidade moderada de plagioclásio cálcico, além de também conter pequena quantidade de olivina. O basalto, que é uma rocha vulcânica, é o equivalente extrusivo do gabro.

As **rochas ultramáficas** são constituídas, basicamente, por minerais máficos, podendo conter menos de 10% de plagioclásio. Um exemplo dessas rochas é o peridotito, o qual é composto por olivina e pequenas quantidades de piroxênio e anfibólio, e constitui uma fonte de rochas basálticas que se formam nas dorsais mesoceânicas.



Pesquise mais

Prezado aluno, existe uma grande quantidade de rochas ígneas descritas, sendo que cada uma possui suas características próprias, como textura e composição. No link a seguir, pertencente ao Museu de Minerais e Rochas "Heinz Ebert", você poderá consultar sobre dezenas de diferentes rochas ígneas intrusivas e extrusivas. Nele, além de visualizar imagens de amostras e fotomicrografias (fotos obtidas com um microscópio) de cada rocha, também poderá buscar informações sobre os minerais principais e acessórios, além de texturas magmáticas e estruturas que são observadas. Boa pesquisa!

Disponível em:

<<http://www.rc.unesp.br/museudpm/rochas/index.html>>. Acesso em:
3 dez. 2017.

Sem medo de errar

Prezado aluno, vamos relembrar brevemente a situação-problema que lhe foi proposta no início desta seção. Você faz parte de uma equipe multidisciplinar de uma empresa que encontrou um grande afloramento de mármore com intrusões graníticas. Então, a empresa necessita saber os possíveis minerais que podem ser encontrados nestas litologias, e você e sua equipe estão envolvidos na realização de estudos para conhecer a possível composição dessas rochas.

Sendo assim, vocês iniciaram a pesquisa pela busca de informações relativas às rochas ígneas. Estas são rochas que são originadas pela consolidação de magma ácido, ou seja, que possui mais de 65% de sílica, sendo que o magma granítico é associado à fusão de partes da crosta continental. Com relação à textura, são intrusivas e possuem granulação grossa, o que significa que sua formação ocorreu no interior do planeta. Quanto à sua composição, as rochas graníticas são classificadas como rochas félsicas, sendo constituídas por minerais, como o quartzo, o ortoclásio e o plagioclásio. Outros minerais que podem ocorrer em rochas desta composição em menores quantidades são as micas (biotita e muscovita) e os anfibólios. Considerando a série de reações de Bowen, pode-se, inclusive, saber quais destes minerais cristalizaram-se primeiramente. No caso da série descontínua, o anfibólio foi o primeiro a se cristalizar, sendo seguido pela biotita, enquanto que na série contínua há a cristalização do plagioclásio. Em seguida, ocorre a cristalização do ortoclásio, muscovita e quartzo, nesta ordem.

Você sabe que este estudo é muito importante para que a empresa possa entender melhor sobre o material que encontrou na área ainda não explorada. Por este motivo, você deve apresentar os resultados deste estudo à empresa na forma de um relatório, o qual lhes auxiliará a conhecer os possíveis minerais que compõem a intrusão granítica.

Composição do magma

Descrição da situação-problema

Você é professor de Química em uma escola na qual, todos os anos, se realiza uma atividade em conjunto entre duas disciplinas diferentes. Neste ano, você e o professor de Geografia devem planejar sobre a abordagem de um conteúdo que se encaixe no contexto de ambas as disciplinas. Para envolver e chamar a atenção dos alunos, vocês decidiram levá-los a uma excursão que incluía visitação em uma marmoraria. Neste local, vocês direcionaram os alunos para observar diferentes tipos de rochas ígneas que são utilizadas como pedras ornamentais. Previamente, os alunos já sabiam que os diferentes tipos de rochas ígneas são provenientes de magmas com distintas composições e, por isso, ao perceberem rochas com colorações diversas, eles lhe faziam perguntas, como: quais elementos químicos um magma contém? Como é possível que as rochas ígneas apresentem diferentes cores?

Resolução da situação-problema

Para que os alunos possam compreender melhor a diversidade das rochas observadas, você decide iniciar sua explicação falando justamente sobre os elementos químicos que compõem o magma. Sendo assim, você explica que a sílica é muito comum nos magmas, sendo que os magmas gerados por fusão da crosta terrestre são ricos neste composto químico. Estes magmas também contêm diferentes proporções de elementos, como alumínio, cálcio, sódio, ferro (Fe), magnésio (Mg) e potássio. Diferentemente, quando o magma é originado por fusão de rochas do manto terrestre, sua composição é com menos sílica e mais ferro e magnésio. Você pode continuar sua explicação comentando que, com base no teor de sílica, os magmas podem ser divididos em diferentes tipos, os quais são ácidos, intermediários, básicos e ultrabásicos. Destes, os ácidos são os que contêm maiores teores de sílica, com mais de 65%, enquanto que os ultrabásicos têm menos de 45%.

Com relação à coloração das rochas, você pode explicar que as félsicas (como o granito) são pobres em Fe e Mg e ricas em minerais com altos teores de sílica, como quartzo, feldspato potássico e plagioclásio, fazendo com que a rocha apresente cores mais claras, como rosadas ou cinzas. Diferentemente, as rochas máficas (como o basalto) são ricas em minerais, como piroxênios e olivinas, abundantes em elementos como o Mg e Fe. Por este motivo, as rochas máficas apresentam colorações mais escuras.

Faça valer a pena

1. As rochas ígneas são formadas a altas temperaturas a partir da consolidação do magma. O magma, que é um material fundido, pode deslocar-se no interior da crosta terrestre em direção a regiões com menor pressão e possuir diferentes composições, originando rochas com diferentes composições também.

Com relação ao magma, é correto afirmar:

- a) A temperatura não ultrapassa 500 °C.
- b) É constituído somente por porção líquida.
- c) De acordo com o conteúdo de sílica, pode ser dividido em ácidos, intermediários, básicos e ultrabásicos.
- d) O magma granítico é pobre em sílica.
- e) O magma basáltico é altamente viscoso.

2. A série de reações de Bowen é um mecanismo que estabelece a sequência de cristalização dos minerais para um magma originalmente basáltico. Este mecanismo possui duas séries, uma nomeada contínua e outra descontínua, sendo que os minerais de cada uma podem cristalizar simultaneamente.

Considerando a série de reações de Bowen, assinale a alternativa com a única possível sequência de cristalização.

- a) Olivina – quartzo – biotita.
- b) Quartzo – plagioclásio – muscovita.
- c) Plagioclásio – feldspato potássico – quartzo.
- d) Feldspato potássico – plagioclásio – piroxênio.
- e) Anfibólio – muscovita – biotita.

3. As rochas ígneas podem ser divididas, de acordo com sua textura, em rochas intrusivas e extrusivas, além de que podem ser dos tipos félsica, intermediária, máfica ou ultramáfica, de acordo com sua composição. Cada uma dessas características permite a descrição de diferentes tipos de rochas, cada uma com sua nomenclatura.

Assinale a alternativa que apresenta a correta relação entre a textura, a composição e o nome da rocha.

- a) Intrusiva – félsica – gabro.
- b) Intrusiva – intermediária – granito.
- c) Intrusiva – intermediária – dacito.
- d) Extrusiva – máfica – basalto.
- e) Extrusiva – félsica – granito.

Seção 3.3

Rochas sedimentares e metamórficas

Diálogo aberto

Caro aluno, nas seções anteriores, introduzimos o estudo das rochas e aprofundamos o tema sobre as rochas ígneas ou metamórficas. Nesta seção, abordaremos sobre os outros dois tipos de rochas, as sedimentares e as metamórficas, e desta forma concluiremos o estudo sobre o ciclo das rochas. Assim, estudaremos sobre os processos sedimentares e a composição mineralógica das sedimentares, bem como sobre os fatores controladores do metamorfismo e exemplos de rochas formadas.

Para que você possa melhor compreender os assuntos desta seção e dar continuidade ao nosso processo de aprendizagem, vamos relembrar o contexto apresentado no “Convite ao estudo” desta unidade. Você compõe uma equipe de trabalho multidisciplinar de uma empresa que atua no ramo de exploração mineral. Esta empresa encontrou grande quantidade de mármore com intrusões graníticas, sendo que os minerais calcita e quartzo já foram identificados. Agora, a empresa necessita ainda saber quais outros minerais também podem ser encontrados nessas litologias.

Você e sua equipe já sabem que o mineral calcita possui ampla aplicação na indústria, e os mármore são compostos, basicamente, por este tipo de mineral, sendo, portanto, importante. Porém, vocês estão se questionando: quais outros minerais, geralmente, ocorrem associados em mármore? Pode-se conhecer, com base nas informações fornecidas, qual é a composição da rocha preexistente do mármore?

Você saberia responder a essas questões? Para lhe auxiliar, abordaremos, nesta seção, sobre os diferentes tipos de sedimentos e as rochas formadas, bem como exemplificaremos sobre a composição mineralógica das rochas.

Portanto, este é o momento de você se dedicar em compreender este assunto. Afinal, você e toda a equipe deverão realizar estudos e confeccionar um relatório a ser apresentado para os diretores da empresa, o qual detalhará características sobre estas rochas. Bons estudos!

Rochas sedimentares

As rochas sedimentares são aquelas constituídas por sedimentos, sendo que estes são partículas sólidas originadas pelo intemperismo mecânico e químico, além de minerais precipitados por processos químicos através de soluções e minerais, cuja origem está relacionada com a secreção de organismos para originar seus esqueletos. Desta forma, os sedimentos e as rochas sedimentares formadas a partir deles têm sua origem atrelada aos estágios do ciclo das rochas que ocorrem em superfície. Ou seja, ambos os materiais se formam depois da exposição das rochas em superfície devido à tectônica e antes de sofrerem soterramentos e voltar a níveis mais profundos. Durante a transformação do sedimento em rochas sedimentares, ocorrem diversos estágios sedimentares, compreendendo os seguintes processos (Figura 3.11):

Figura 3.11 | Processos sedimentares que ocorrem dentro do ciclo das rochas



Fonte: adaptada de <<http://slideplayer.com/slide/4149925/13/images/8/Surface+Processes+and+the+Rock+Cycle.jpg>>. Acesso em: 8 mar. 2018.

a) **Intemperismo**: desintegração, degradação e decomposição de rochas causados por agentes na superfície terrestre. Os tipos mais comuns são o físico ou mecânico e o químico: o físico desagrega as rochas devido a variações de temperatura ou à ação do gelo, por exemplo; o químico transforma minerais e rochas em sólidos alterados, soluções e precipitados. Sendo assim, o intemperismo químico ocorre através de reações químicas e envolvem variáveis, tais como dissolução, hidratação, hidrólise e oxidação (PRESS et al., 2006; WICANDER; MONROE, 2009). A hidrólise é uma reação entre íons de hidrogênio (H^+) e de hidroxila (OH^-), presentes na água, e íons de minerais, sendo um exemplo a alteração química de feldspatos, que produz compostos em solução e minerais argilosos da seguinte maneira:



Como se pode perceber, os íons de hidrogênio reagem com os íons do mineral ortoclásio, sendo que alguns íons liberados são incorporados ao mineral argiloso que está se formando e outros ficam em solução. Os íons ou moléculas ficam em solução nas águas de rios, lagos e mares.

Outra maneira de ocorrer o intemperismo químico é através de reação química que forma substâncias solúveis. A maioria dos minerais é pouco solúvel em água pura pelo fato de que as forças de atração das moléculas de água não são suficientes em relação às forças de atração entre as partículas dos minerais. É o caso, por exemplo, da calcita ($CaCO_3$), principal constituinte do calcário (rocha sedimentar) e do mármore (rocha metamórfica), que é praticamente insolúvel em água pura. Porém, o CO_2 (dióxido de carbono) pode combinar com a água e reagir para formar soluções ácidas, que em contato com a calcita reage como segue:



Desta maneira, ocorre a dissolução do mineral calcita (WICANDER; MONROE, 2009).



A dissolução da calcita em calcários e mármore pode ter grandes efeitos, desde a criação de pequenas cavidades a grandes cavernas. Como exemplo, podem ser citadas as cavernas americanas de Mammoth e Carlsbad, além das brasileiras de Maquiné e Lapinha.

b) **Erosão:** este processo é responsável pela mobilização das partículas produzidas pelo intemperismo. Os produtos do intemperismo são agrupados, de acordo com sua origem, em **sedimentos clásticos, químicos e bioquímicos**. Os clásticos são partículas de rocha que foram originados pelo intemperismo de rochas preexistentes e, posteriormente, foram fisicamente transportados. Essas partículas, que dependendo do tamanho podem variar entre cascalho, areia e argila, também são conhecidas como sedimentos siliciclásticos, pois as rochas preexistentes são compostas, predominantemente, por silicatos. O quartzo é um exemplo de mineral muito resistente ao intemperismo, sendo encontrado praticamente inalterado nos sedimentos. Por outro lado, minerais de sedimentos clásticos podem ser neoformados, como é o caso dos argilominerais.

As substâncias dissolvidas pela ação do intemperismo são precipitadas de acordo com reações químicas e bioquímicas. Desta forma, os sedimentos químicos formam-se próximos ou já em seu local de deposição. A evaporação da água do mar, geralmente, induz a cristalização de minerais, como gipsita e halita em camadas (PRESS et al., 2006). Entretanto, essa precipitação ocorre em condições específicas: o clima, geralmente, é árido e o mar deve ser parcialmente ou totalmente isolado, de maneira a permitir que a evaporação possa concentrar os elementos químicos que estão dissolvidos na água até se alcançar o ponto de precipitação. Já os sedimentos bioquímicos são aqueles constituídos de minerais não-dissolvidos de restos de organismos e minerais precipitados por processos biológicos. Esses sedimentos, normalmente, ocorrem em ambientes marinhos rasos e compreendem, por exemplo, camadas de conchas inteiras ou

quebradas. Caso as conchas sejam transportadas, quebradas e depositadas, passam a ser denominadas como sedimentos bioclásticos. Esses sedimentos são, predominantemente, os minerais calcita e aragonita, compostos por carbonato de cálcio.

c) **Transporte:** é o deslocamento das partículas para novos lugares, topograficamente inferiores, tais como morro abaixo ou a jusante. O transporte pode ocorrer devido à ação de correntes de vento e água, além do deslocamento de geleiras.

d) **Deposição ou sedimentação:** quando ocorre a paralisação dos ventos, quando diminui a velocidade da água ou quando bordas de geleiras derretem, é momento propício para que as partículas sedimentares que estavam sendo transportadas sejam agora depositadas. Desta forma, as partículas dão origem a camadas de sedimentos em diferentes ambientes de sedimentação. Em ambientes marinhos rasos e aquáticos continentais, também pode ocorrer a formação de precipitados químicos ou, ainda, a quebra de conchas e organismos mortos, sendo ambos os materiais também depositados.



Vocabulário

Ambientes de sedimentação: áreas da superfície terrestre que apresentam propriedades físicas, químicas e biológicas definidas e diferentes das apresentadas em porções geográficas adjacentes.

e) **Soterramento:** conforme ocorre o acúmulo de camadas de sedimentos, a pilha sedimentar formada vai sendo compactada e soterrada na crosta terrestre.

f) **Diagênese:** são processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem em baixa temperatura após a deposição dos sedimentos, ocasionando a litificação e dando origem às rochas sedimentares. Dentre os processos que podem ocorrer, estão a desidratação, a cimentação (fechamento de poros através da precipitação ou cristalização de minerais), a compactação, a dissolução e as reações minerais. Convém salientar que processos de intemperismo e metamorfismo não são considerados como diagênese.

Os sedimentos e as **rochas sedimentares clásticas**, também conhecidos como detríticas, constituem mais de três quartos da massa de sedimentos e rochas sedimentares presentes na crosta terrestre (PRESS et al., 2006), sendo classificados de acordo com o tamanho dos grãos constituintes, conforme a Tabela 3.2.

Tabela 3.2 | Classificação das rochas sedimentares

ROCHAS SEDIMENTARES DETRÍTICAS		
Nome e tamanho do sedimento	Descrição	Nome da rocha
Cascalho (> 2mm)	Partículas arredondadas de cascalho	Conglomerado
	Partículas angulares de cascalho	Brecha sedimentar
Areia (1/16 – 2mm)	Principalmente areia de quartzo	Arenito de quartzo
	Quartzo com > 25% de feldspato	Arcóσιο
Lama (< 1/16mm)	Principalmente silte	Siltito
	Silte e argila	Lamito*
	Principalmente argila	Argilito*
		Lutitos
ROCHAS SEDIMENTARES QUÍMICAS		
Textura	Composição	Nome da rocha
Variada	Calcita (CaCO ₃)	Calcário
Variada	Dolomita [CaMg(CO ₃) ₂]	Dolomito
Cristalina	Gipsita (CaSO ₄ ·2H ₂ O)	Gesso
Cristalina	Halita (NaCl)	Halita
		Carbonatos
		Evaporitos
ROCHAS SEDIMENTARES QUÍMICAS		
Textura	Composição	Nome da rocha
Variada	Calcita (CaCO ₃)	Calcário
Variada	Dolomita [CaMg(CO ₃) ₂]	Dolomito
Cristalina	Gipsita (CaSO ₄ ·2H ₂ O)	Gesso
Cristalina	Halita (NaCl)	Halita
		Carbonatos
		Evaporitos
ROCHAS SEDIMENTARES BIOQUÍMICAS		
Textura	Composição	Nome da rocha
Clástica	Conchas de carbonato de cálcio (CaCO ₃)	Calcário (de vários tipos, tais como o giz e coquina)
Normalmente cristalina	Conchas microscopicamente alteradas de dióxido de silício (SiO ₂)	Sílex
—	Principalmente carbono de restos de plantas alterados	Carvão

*Lamitos e argilitos que se rompem ao longo de planos rigorosamente espaçados são comumente conhecidos como folhelhos.

Fonte: Wicander e Monroe (2009, p. 148).

Dentre todos estes tipos, os clásticos de grãos finos contêm maiores quantidades de argilominerais e são mais abundantes que os clásticos mais grossos. Isso se deve ao fato de que grandes quantidades de feldspato e outros silicatos são alterados quimicamente para argilominerais. As rochas detríticas podem ser

divididas, ainda, de acordo com sua composição mineralógica: o arenito de quartzo é constituído, praticamente, só por quartzo, enquanto que o arcósio é um arenito que contém mais de 25% de feldspato (Tabela 3.2).

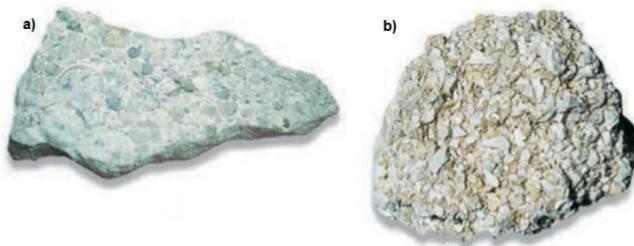


Refleta

Considerando que o intemperismo é um dos processos que ocorrem durante a transformação de sedimentos em rochas sedimentares, qual é a relação dos diferentes tipos de arenitos com o grau de intemperismo? Qual tipo de intemperismo, químico ou físico, é mais atuante na formação de um arcósio?

Dentre as **rochas sedimentares químicas e bioquímicas** (Tabela 3.2), as mais abundantes são as originadas em ambientes de sedimentação carbonáticos. São, portanto, conhecidas como rochas carbonáticas, por exemplo, o calcário e o dolomito. O calcário é constituído, basicamente, por calcita (CaCO_3), cuja formação ocorre pela precipitação a partir de uma solução aquosa, enquanto que o dolomito apresenta em sua composição a dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$). Conforme vimos anteriormente, a calcita é dissolvida rapidamente em meio ácido, porém essa reação química é reversível, fazendo com que, em condições propícias, a calcita seja precipitada a partir de uma solução aquosa. Têm-se, assim, os calcários originados pela precipitação química inorgânica. Entretanto, a maior parte dos calcários são bioquímicos, tendo sua origem através de organismos, como é o caso dos calcários dos recifes de corais e do calcário constituído por conchas do mar (Figura 3.12a). Quando um calcário é constituído quase que totalmente de conchas, ele é denominado de coquina (Figura 3.12b).

Figura 3.12 | Tipos de calcário: a) calcário fossilífero, constituído por conchas marinhas e b) coquina



Fonte: Wicander e Monroe (2009, p. 151).

Convém ser citado também que algumas substâncias dissolvidas durante o intemperismo químico são cristalizadas, dando origem a rochas sedimentares do tipo evaporitos. Dentre eles, os mais comuns são aqueles compostos de halita (NaCl) e gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).



Pesquise mais

Para aprofundar ainda mais seus conhecimentos sobre rochas sedimentares, recomendamos a leitura do Capítulo 7, do livro *Fundamentos de Geologia*. Este livro está disponível em sua biblioteca virtual.

WICANDER, R.; MONROE, J. S. Sedimentos e Rochas Sedimentares. In: ----- . **Fundamentos de Geologia**. São Paulo: Cengage Learning Edições, 2009. 508p. Disponível em: <<https://biblioteca-virtual.com>>. Acesso em: 29 nov. 2017.

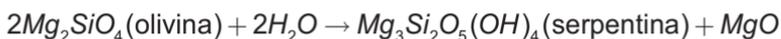
Rochas metamórficas

As rochas metamórficas são aquelas resultantes da transformação de outras rochas (sejam elas ígneas, sedimentares e até mesmo metamórficas) através de processos metamórficos que ocorrem sob a superfície terrestre. Durante esse processo de transformação, chamado de metamorfismo (do grego *meta*, "mudança", e *morfo*, "formato"), as rochas preexistentes são modificadas em sua composição mineral e/ou sua textura, originando uma nova rocha. Essa mudança composicional e textural das rochas acontece em estado sólido, sob condições controladas por três fatores, conhecidos como agentes do metamorfismo. O primeiro desses agentes é o **calor**, responsável pelo aumento da velocidade das reações químicas que podem originar minerais diferentes daqueles constituintes da rocha original, acarretando na transformação composicional da rocha. Esse fator pode ser causado, por exemplo, pela intrusão de um corpo ígneo ou pela subducção de uma placa tectônica. No caso da intrusão, o maior aquecimento ocorre adjacente ao corpo magmático, decrescendo quanto maior for a distância da intrusão.

O segundo agente é a **pressão**, pois conforme as rochas vão sendo soterradas, aumenta-se a pressão litostática atuante, que é resultante do peso das rochas sobrepostas. Desta forma, os minerais tornam-se mais compactados, podendo ocorrer, então,

a recristalização do mineral com a modificação de sua estrutura (minerais menores e mais densos).

O último agente é a **atividade de fluidos**, que contém íons em solução, os quais se mobilizam mais rapidamente, incrementando a velocidade das reações químicas responsáveis pela formação de novos minerais. Um exemplo é a água percolando por uma rocha basáltica, conforme a reação:



Sendo assim, a olivina que é constituinte do basalto, é transformada em serpentina, que é um mineral metamórfico. Esses fluidos quimicamente ativos têm origem em três fontes: a água presente nos poros da rocha, os fluidos que se encontram no magma e os fluidos gerados pela desidratação de minerais que carregam água em sua estrutura, como a gipsita.



Assimile

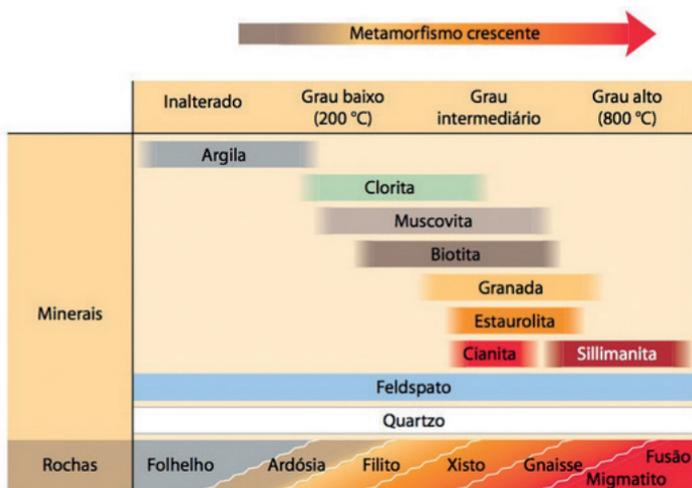
Os componentes químicos presentes na rocha preexistente podem ser removidos ou adicionados durante o processo de metamorfismo, geralmente pela influência de fluidos.

Existem diversos tipos de metamorfismo, tais como o metamorfismo de soterramento, hidrotermal, de fundo oceânico e de impacto, porém os que mais ocorrem são o metamorfismo de contato, o metamorfismo dinâmico e o metamorfismo regional. Em todos esses tipos, a composição mineralógica da rocha resultante da ação do processo de transformação será influenciada pela natureza da rocha preexistente, ou seja, a rocha que deu origem à nova rocha metamórfica. Desta forma, rochas como um arenito quartzoso (formado, basicamente, por quartzo) e calcário (constituído por calcita), por exemplo, darão origem, respectivamente, ao quartzito e ao mármore. A dolomita também pode fazer parte da mineralogia principal do mármore, além de que minerais, como quartzo, pirita, anfíbios e diopsídio, são constituintes que ocorrem em menores proporções. Já as rochas de origem sedimentar formadas por grãos finos, como os lutitos, possuem, em sua composição, argilominerais e filossilicatos aluminosos que, ao sofrerem metamorfismo, dão

origem aos minerais metamórficos pirofilita, clorita, granada, estauroлита, andaluzita, cianita, sillimanita e cordierita.

Os **minerais-índice** são conhecidos por terem origem dentro de um intervalo específico de temperatura e pressão, ou seja, revelam as condições metamórficas de baixo, médio e alto grau. A Figura 3.13 ilustra o intervalo de ocorrência de minerais-índice provenientes da transformação da rocha sedimentar folhelho.

Figura 3.13 | Mudanças mineralógicas e tipos de rochas metamórficas originadas pelo crescente metamorfismo de um folhelho



Fonte: Wicander e Monroe (2009, p. 174).

Dentre as rochas metamórficas originadas em baixo grau metamórfico, pode-se ser citada a ardósia, sendo constituída tipicamente por minerais, como argila, micas e clorita. Já o anfibolito (composto por hornblenda e plagioclásio) e o quartzito são de grau metamórfico médio a alto.



Pesquise mais

Para conhecer mais sobre o metamorfismo e as rochas originadas por esse processo, recomendamos a leitura do Capítulo 8, do livro **Fundamentos de Geologia**. Este livro está disponível em sua biblioteca virtual.

WICANDER, R., MONROE, J. S. Metamorfismo e Rochas Metamórficas.

In: ————. **Fundamentos de Geologia**. São Paulo: Cengage Learning Edições, 2009. 508p. Disponível em: <<https://biblioteca-virtual.com>>. Acesso em: 29 nov. 2017.

Sendo assim, encerra-se o estudo sobre as rochas. Conforme estudamos ao longo das seções, são três os tipos de rochas existentes: as ígneas, as sedimentares e as metamórficas. Elas são relacionadas umas com as outras através do ciclo das rochas, que depende não só das forças internas da Terra mas também dos processos que ocorrem em superfície.

Sem medo de errar

Caro aluno, nesta seção, foram aprofundados os conhecimentos sobre as rochas sedimentares e metamórficas. As sedimentares são aquelas constituídas por sedimentos, enquanto que as metamórficas têm sua origem relacionada à transformação de rochas preexistentes (podendo ser de qualquer tipo). Sendo assim, agora é o momento de relembramos a situação-problema que lhe foi proposta no início desta seção. Você e a equipe com a qual trabalha em uma empresa necessitam saber sobre quais outros minerais, além da calcita, podem ser encontrados em um mármore. Ainda, percebendo que o mármore é uma rocha metamórfica proveniente de uma rocha sedimentar, você também deve saber qual é a composição da rocha preexistente do mármore. Para ter domínio sobre esses assuntos, você deve realizar uma pesquisa sobre esse tipo de rocha.

Primeiramente, deverá encontrar informações sobre a composição do mármore. Este é uma rocha composta, basicamente, por calcita. Porém, a dolomita também pode fazer parte da mineralogia principal. Além disso, minerais, como quartzo, pirita, anfíbios e diopsídio, podem ser encontrados como constituintes em menores proporções.

Ainda, você pode obter informações sobre o calcário, que é a rocha preexistente do mármore. O calcário é composto, basicamente, por calcita e tem sua origem atrelada à precipitação química inorgânica ou através de organismos.

Sendo assim, ao final da pesquisa, você deve ser capaz de elaborar um relatório contemplando informações sobre as características das rochas encontradas pela empresa, além de possíveis minerais que poderão ser encontrados nessas litologias. É importante que, durante a elaboração do relatório, seja considerada uma estrutura adequada dele. Por exemplo, deve sempre ser iniciado com uma introdução, na qual, brevemente, deve ser abordado o assunto que será explanado ao longo do relatório. Como este trabalho é baseado em pesquisa, deve ficar claro ao leitor do relatório que o documento se embasa em revisão bibliográfica voltada para a área de pesquisa, devendo ser abordadas, inclusive, as particularidades que foram encontradas pela empresa na área de interesse. Em seguida, é preciso descrever as informações obtidas durante a pesquisa. No caso desta atividade, o primordial é o relato sobre as possíveis composições das rochas, porém informações sobre os tipos das rochas também podem constar, de maneira a deixá-lo ainda mais completo. Por fim, o relatório deve ser finalizado com as considerações alcançadas durante a pesquisa, além de possíveis orientações à empresa.

Avançando na prática

Intemperismo

Descrição da situação-problema

Você, como professor de Química, decidiu abordar temas que envolvem química na dinâmica do nosso planeta. Para tal, você julgou importante realizar uma apresentação de maneira a ficar mais didático os ensinamentos e, como primeiro tema, decidiu abordar o intemperismo que ocorre nas rochas, assim como, para a apresentação ficar mais educativa, além da exibição sobre o tema, levar materiais que representem a ocorrência desse fenômeno, como materiais visuais (fotografias, por exemplo).

Ao saberem sobre a atividade, os alunos ficaram instigados sobre a temática, uma vez que, inicialmente, não conseguiram compreender a associação entre a química e o intemperismo que ocorre nos materiais

geológicos. Sendo assim, começaram a se questionar: professor, existe um tipo de intemperismo no qual a química influencia? Se sim, quais são as reações químicas envolvidas neste processo?

Resolução da situação-problema

Considerando os questionamentos que seus alunos lhe fizeram, você decide iniciar sua apresentação comentando brevemente sobre os tipos de intemperismo. Os tipos mais comuns são o físico ou mecânico e o químico. O químico é responsável pela transformação de minerais e rochas em sólidos alterados, soluções e precipitados. Neste tipo, ocorrem reações químicas, tais como de dissolução, hidratação, hidrólise e oxidação.

Para que seus alunos compreendam ainda mais sobre o assunto e considerando que eles já conhecem previamente sobre mineralogia, você pode expor sobre a hidrólise. Sendo assim, explique que esta é uma reação entre o hidrogênio e a hidroxila, os quais estão presentes na água e em íons de minerais. Um exemplo de alteração pela hidrólise é a que ocorre nos feldspatos, conforme a seguinte reação química:



Desta maneira, a alteração química ocorre no feldspato, produzindo compostos em solução e minerais do tipo argila. Para mostrar aos alunos sobre a hidrólise, você pode apresentar amostras do mineral ortoclásio e, também, pequenas porções de argila, evidenciando a mudança que pode ocorrer devido ao intemperismo.

Para finalizar sua apresentação, você ainda pode explicar sobre a dissolução que pode ocorrer no mineral calcita, constituinte de calcários e mármore. A calcita é, praticamente, insolúvel em água pura. Porém, quando ocorre a presença de dióxido de carbono, ocorre a combinação com a água e forma-se uma solução ácida. Essa solução ácida, quando em contato com a calcita, produz a seguinte reação química:



Portanto, ocorre a dissolução da calcita, deixando íons em solução. Aqui, pode ser retratada através de materiais visuais sobre exemplos reais de dissolução de calcita (por exemplo, cavernas de Maquiné e Lapinha).

Faça valer a pena

1. Os processos que dão origem às rochas sedimentares são conhecidos como processos sedimentares. São importantes porque, além de produzirem as partículas que compõem este tipo de rocha, também criam as camadas e as endurecem, transformando-as em rochas.

Assinale a alternativa que contemple a ordem de ocorrência dos processos sedimentares.

- a) Intemperismo – erosão – diagênese – deposição – soterramento – transporte.
- b) Intemperismo – transporte – soterramento – erosão – diagênese – deposição.
- c) Intemperismo – erosão – transporte – deposição – soterramento – diagênese.
- d) Diagênese – deposição – erosão – intemperismo – soterramento – transporte.
- e) Diagênese – transporte – erosão – soterramento – intemperismo – deposição.

2. Os sedimentos e as rochas sedimentares são classificados como clásticos, químicos e bioquímicos. Os sedimentos químicos e bioquímicos originam-se através de íons dissolvidos durante o intemperismo químico. Mediante reações químicas e bioquímicas são precipitados, gerando as rochas sedimentares.

Considerando a composição das rochas sedimentares químicas e bioquímicas, assinale a alternativa que contém o nome da rocha e do mineral característico de sua composição.

- a) Gesso – halita.
- b) Dolomito – gipsita.
- c) Sílex – carbono.
- d) Calcário – gipsita.
- e) Calcário – calcita.

3. O metamorfismo é o conjunto de processos de transformações mineralógicas, texturais e estruturais na rocha preexistente, no estado sólido, dando origem a rochas metamórficas, tais como xisto, gnaiss, anfíbolito, mármore e quartzito.

Com relação ao metamorfismo e às rochas metamórficas, é possível afirmar que:

- a) Somente as rochas ígneas podem dar origem às rochas metamórficas.
- b) Os agentes do metamorfismo são o calor, a pressão e a atividade de fluidos.
- c) Os tipos de metamorfismo que mais ocorrem são o de impacto e de contato.
- d) Os minerais-índice não são capazes de revelar as condições metamórficas de baixo, médio e alto grau.
- e) O quartzito é uma rocha metamórfica de baixo grau.

Referências

- GROTZINGER, J.; JORDAN, T. **Para entender a Terra**. 6. ed. São Paulo: Bookman, 2013.
- PRESS, F. et al. **Para entender a Terra**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.
- TEIXEIRA, W. et al. **Decifrando a Terra**. São Paulo: Oficina de Textos, 2003.
- WICANDER, R.; MONROE, J. S. **Fundamentos de Geologia**. São Paulo: Cengage Learning Edições, 2009. 508p.

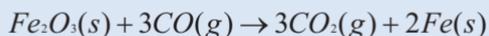
Recursos minerais e processos industriais

Convite ao estudo

Caro aluno, estamos chegando na etapa final do nosso estudo sobre Mineralogia e Cristalografia. Esta é nossa última unidade e, por meio dela, daremos início ao estudo dos principais recursos minerais existentes no Brasil, enfatizando sua importância, localização e características geológicas. Você já deve ter imaginado que devido à grandeza territorial do nosso país, possivelmente, ele apresenta uma vasta riqueza mineral, não é mesmo? O Brasil é um país vasto e apresenta grande variedade de tipos de solos e também de tipos de rochas. Será que essas características podem influenciar nos recursos minerais que nosso país possuiu? Qual será a importância desses recursos do ponto de vista industrial? Responderemos a essas perguntas no decorrer desta unidade.

Também iremos abordar a extração dos recursos minerais, enfatizando suas principais aplicações e importância para a sociedade. O processamento industrial dos recursos minerais será um dos pontos principais desta unidade. Destacaremos o processamento de três recursos naturais: a hematita (Fe_2O_3); a bauxita, que apresenta em sua composição uma mistura de óxidos de alumínio como componentes principais; e o calcário, que consiste em uma rocha que apresenta o carbonato de cálcio ($CaCO_3$) como componente principal. Abordaremos o processo de produção do aço, do alumínio metálico (Al) e também a produção de óxido de cálcio (CaO) a partir do calcário, destacando os principais processos químicos envolvidos, os impactos ambientais que essas atividades podem trazer e também a importância destes materiais para as atividades industriais.

Vamos imaginar que você trabalha em uma indústria multinacional que atua na área de mineração. Essa indústria deseja investir na produção de aço no Brasil a partir do mineral hematita (Fe_2O_3), atividade ainda não explorada pela indústria em questão. O aço é empregado em diversos utensílios domésticos, tanques industriais, etc. Sua produção é realizada em um alto forno, reator químico em que se processa o aço. Esse equipamento é alimentado com carvão coque, ar atmosférico e hematita. Você saberia dizer qual a função do ar atmosférico e do carvão nesse processo? A reação global do processo é apresentada a seguir, entretanto, essa reação ocorre em diversas etapas e é um processo endotérmico. Você saberia dizer quais etapas são essas? Se o processo é endotérmico, qual a fonte energética para a reação? Qual a quantidade correta dos reagentes que alimentarão o alto forno? Esse processo gera impactos ao meio ambiente? Como minimizá-los? De que modo as propriedades mecânicas do Fe obtido podem ser otimizadas? Ao término desta unidade, você será capaz de responder a essas perguntas.



Assim como muitas ações humanas, tanto o processamento dos recursos minerais quanto a sua extração podem gerar impactos ao meio ambiente, entretanto, cabe a você, futuro profissional, entender as etapas envolvidas no processamento e estudar mecanismos para minimizar tais impactos. Bons estudos e seja bem-vindo a esta última unidade.

Seção 4.1

Recursos minerais

Diálogo aberto

Caro aluno, você deve ter notado que os minerais apresentam grande importância dentro do contexto tecnológico e industrial, pois eles atuam como matéria prima para muitos materiais que utilizamos no nosso dia a dia, como aço, alumínio metálico, cimentos, etc. O aço é uma liga constituída de ferro e carbono produzida a partir do minério de ferro, em especial, a hematita. Já o alumínio, que utilizamos em diversas ferramentas, portões e estruturas domésticas, é produzido a partir da bauxita. Além disso, o óxido de cálcio (CaO), utilizado na construção civil, é proveniente do processamento do calcário. Veja por meio destes exemplos como os minerais e rochas estão presentes em nossas atividades, seja de forma direta ou indireta (processado). Assim sendo, é muito importante que você, como profissional, domine as principais propriedades destes bens minerais e entenda como extraí-los e processá-los de forma a contribuir para o avanço tecnológico e industrial.

Para melhor exemplificar a importância dos recursos minerais, vamos retomar a situação proposta no Item "Convite ao Estudo". Lembre-se que você trabalha em uma indústria multinacional e que esta indústria deseja implementar uma nova planta no Brasil destinada à produção de aço. Entretanto, para que isso seja possível, é necessário realizar um levantamento das reservas de minério de ferro e também de carvão no Brasil, uma vez que estes recursos são matérias-primas essenciais para produção do aço.

Visando verificar o melhor local para implementação desta planta e também para dimensionar a estrutura da planta industrial em função da produção diária de aço desejada, foi solicitado a você, o responsável pela implementação de projetos da empresa, que realize esse estudo. Você deverá apresentar um relatório que contenha um levantamento da localização e produtividade das principais reservas de minério de ferro e de carvão no Brasil. Será que o Brasil apresenta quantidades suficientes dos recursos desejados? Qual o melhor

local para implementar essa nova planta? Será necessário que a empresa realize a importação de alguma destas matérias-primas?

Para resolver essa situação problema, você deverá realizar um estudo sobre os recursos minerais existentes no Brasil, assim como suas localizações. Seu estudo pode se iniciar por meio de um levantamento bibliográfico e também por meio de informações de órgão vinculados ao governo. Você verá como é importante conhecer os recursos minerais existentes, assim como saber como esses recursos podem e são extraídos e também a importância de processá-los industrialmente. Ao longo desta seção, reforçaremos ainda mais essas informações e importâncias. Bom trabalho e vamos ao estudo!

Não pode faltar

Prezado aluno, daremos início agora ao nosso estudo envolvendo os recursos minerais presentes no Brasil. Denominamos por recursos minerais as concentrações de minérios disponíveis na natureza, considerando as substâncias inorgânicas que podem ser extraídas da terra e utilizadas como matérias primas. Não podemos nos esquecer do vasto território que nosso país possui e que em sua extensão estão presentes uma grande variedade geológica.

Para iniciarmos nosso estudo, vamos abordar brevemente os depósitos minerais, enfatizando que suas variações estão associadas ao aspecto de formação. A distribuição dos depósitos minerais na crosta terrestre acompanha, de modo geral, a divisão geotectônica da Terra. Assim sendo, as feições geotectônicas correspondem a um dos principais controles das mineralizações que ocorrem no mundo. Desde tempos remotos, foi observado que determinados tipos de minérios se relacionavam a certos litotipos específicos. Dessa forma, pode-se realizar algumas associações entre a litologia e o tipo de depósito mineral existente. Entretanto, alguns dados não eram consistentes com as observações feitas, por exemplo, nem todos os granitos apresentavam-se mineralizados com estanho e nem todas as rochas ultrabásicas apresentavam-se mineralizadas com cromita. Dessa forma, houve uma tendência para melhor definir o ambiente de formação destas rochas e melhor classificar os depósitos minerais existentes. Um modelo genético ou conceitual

de um depósito mineral é um modelo prático que visa como explicar a formação do depósito mineral. As condições básicas que envolvem a formação de um depósito mineral são as condições operacionais do sistema mineralizador, a disponibilidade de agentes químicos e a localização.

Os depósitos do tipo filoneanos são bastante comuns. Nesses depósitos os minérios ocupam espaços abertos pelo fraturamento tectônico das rochas ou, na fase de alívio, após a fase compressiva, o minério ocupa os espaços gerados pelo fraturamento das rochas cisalhadas. São também comuns os minérios que preenchem os poros das rochas, como arenitos e conglomerados. Outro caso bastante típico é quando há reação química entre o fluido mineralizador e alguns minerais das rochas. As substâncias de caráter iônico cristalizam como produtos destas reações, enquanto os metais do fluido ficam retidos e os cátions primitivos são transportados pelo fluido residual até a zona de dispersão.

O deslocamento do magma de seu local de origem pode trazer alterações em sua composição, afetando de modo geral a formação do depósito. Quando o magma é deslocado, alterações de pressão e de temperatura podem acontecer, além da assimilação de rochas presentes na crosta, gerando, portanto, magmas diferenciados. Tanto o magma de origem primária quanto o magma diferenciado constituem a essência básica para formação do depósito mineral, que caracterizam um sistema endomagmático. Neste sistema, um corpo mineralizador faz parte do próprio magma. Grande parte dos minerais deste tipo estão na forma de óxidos, podendo haver também fosfatos e carbonatos. A presença de enxofre nesses minerais provém, na maioria das vezes, de fontes externas, devido à contaminação do fluido. Depósitos endomagmáticos são classificados de acordo com a influência do agente externo na formação do corpo mineralizador e também de acordo com o nível estrutural onde os depósitos se formam (BIONDI, 2015).

Como podemos ver, a formação dos depósitos minerais envolve aspectos bastante complexos. Diversos depósitos minerais compartilham características de fonte e de composição de fluidos semelhantes. Entretanto, os modelos descritos e teóricos ainda não são complementemente suficientes para descrever todas as ocorrências e

depósitos minerais, devido à complexidade e às variáveis envolvidas na formação.

Agora vamos abordar os recursos minerais presentes no Brasil. Para facilitar nosso estudo, vamos dividir o território brasileiro em duas partes, considerando o contexto geológico: o Brasil Amazônico (Oeste) e o Brasil Atlântico (Leste), tendo como elementos de divisão a faixa de dobramento Paraguai- Araguaia, construída no Ciclo Brasileiro, que se estende ao norte da Ilha do Bananal, com orientação sul-meridiana. Podemos diferenciar essas regiões da seguinte forma: o Brasil Leste engloba as regiões Sul, Sudeste, Nordeste e Centro-Oeste, enquanto o Brasil Oeste engloba a região Norte (Academia Brasileira de Ciências, 2016). A principal diferença entre essas duas regiões é que o Brasil Amazônico (Oeste) é caracterizado por apresentar 60% do território nacional, floresta tropical, infraestrutura viária e energética muito limitada, baixa população, conhecimento geológico/metalogenético muito básico, poucas minas de porte significativo, garimpos ativos ou em extinção, potencial para depósitos superficiais ou em subsolo. Enquanto o Brasil Atlântico (Leste), apresenta 40% do território nacional, vegetação de cerrado, caatinga, resíduos de mata atlântica e campos sulinos, densamente povoados, infraestrutura viária e energética razoável, maior conhecimento geológico/metalogenético, oportunidade para reabertura de minas abandonadas e para descobertas em superfície.

A Figura 4.1 apresenta as principais províncias e depósitos minerais brasileiros, enquanto Tabela 4.1 mostra as principais reservas, produção e situação no mercado das *commodities* minerais e principais minas brasileiras. Os aspectos geológicos de países como Canadá e Austrália podem ser comparados ao aspecto geológico Brasileiro, entretanto, estes países são ricos em reservas de metais preciosos, como ouro (Au), prata (Ag) e metais bases como cobre (Cu), zinco (Zn), chumbo (Pb) e níquel (Ni). Já o Brasil, destaca-se por reservas de ferro (Fe), alumínio (Al), manganês (Mn), nióbio (Nb) e estanho (Sn). Esses elementos químicos, em especial o Fe, são a base da indústria mineradora brasileira.

Dados da literatura apontam que a produção de *commodities* e de elementos metálicos no Brasil têm como predominância depósitos

minerais de elementos siderófilos (Fe, Ni, cromo (Cr) e cobalto (Co) e de elementos litófilos (Al e Mn). As jazidas de elementos calcófilos (Cu, Pb, Zn, cádmio (Cd) e mercúrio (Hg) são encontradas em menor proporção no Brasil. Os depósitos de enxofre e sulfetos também são raros no Brasil, o que é resultado da baixa concentração de enxofre nos magmas (ACADEMIA BRASILEIRA DE CIÊNCIAS, 2016).

Quatro estados brasileiros são responsáveis pela produção de 80% das *commodities* minerais brasileiras, sendo eles Minas Gerais, Goiás, Bahia e Pará. Merecem destaques quanto ao porte significativo de reservas minerais os distritos: Província Mineral Ferro-Aurífera do Quadrilátero Ferrífero (MG) (posição 18 na Figura 4.1) Província Mineral Polimetálica de Carajás (PA) (posição 4 na Figura 4.1), distritos de *greenstones belts* auríferos de Goiás, Bahia e Minas Gerais e distritos de maciços básicos-ultrabásicos de Goiás, Bahia e Pará.

A Tabela 4.1 mostra as principais reservas de recursos minerais existentes no Brasil, assim como a sua produção anual, global e a necessidade ou não de exportação do recurso (dados referentes a 2012/2013). Os dados mostram que o Brasil se destaca na produção de minério de ferro (13,4% das reservas deste minério encontram-se no Brasil), sendo um importante exportador deste recurso. Outro aspecto interessante presente na tabela é a necessidade de importação de carvão. Apenas 0,1% das reservas de carvão encontram-se no Brasil. É importante ressaltar que tanto o minério de ferro quanto o carvão são matérias-primas importantes na produção do aço. É importante mencionar que as principais reservas de nióbio do mundo encontram-se em território brasileiro (93.52% no período 2012/2013).



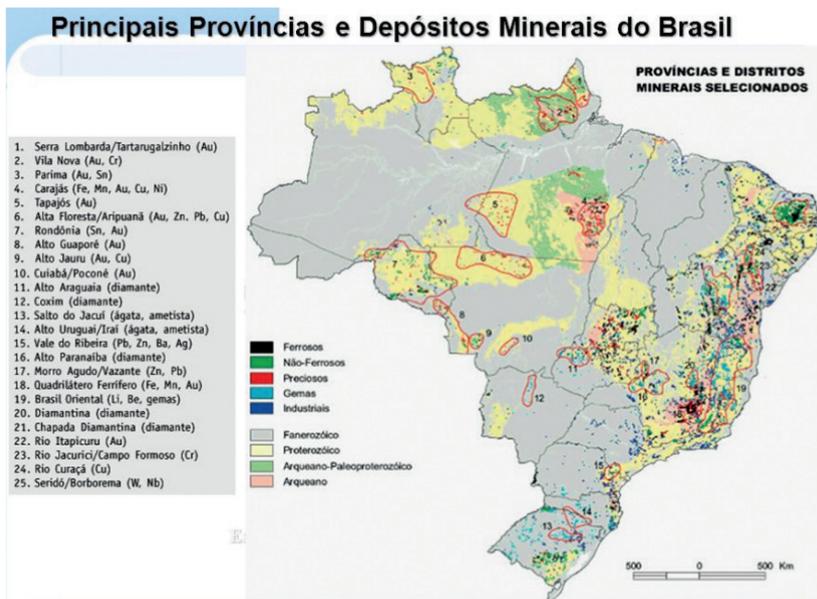
Exemplificando

O Brasil está entre os cinco maiores produtores de minério de ferro no mundo. Ele é extraído principalmente no Estado de Minas Gerias, tendo destaque a região do Quadrilátero Ferrífero, e também no Pará (Serra dos Carajás) e, em menor proporção, no Mato Grosso do Sul. O minério de ferro representa 93% das exportações do setor de mineração no Brasil, sendo a sua principal aplicação na indústria do aço.

As formações ferríferas bandadas são rochas sedimentares que se formam por meio da precipitação química associada à atividade microbiana, que ocorre diretamente na água do mar, rica em Fe, devido à presença de emanações vulcânicas submarinas. Os minerais de Fe compreendem os óxidos metálicos como a hematita (Fe_2O_3) e a magnetita (Fe_3O_4), carbonatos como siderita ($FeCO_3$) e ankerita ($Ca(Mg,Fe)(CO_3)_2$), silicatos como a greenalita ($(Fe^{2+}, Fe^{3+})_2 - Si_2O_5(OH)_4$) e também combinado com enxofre na forma de pirita (FeS_2).

O Quadrilátero Ferrífero representa uma das principais reservas de minério de ferro no Brasil, apresentando depósitos de domínio ocidental e oriental. No primeiro caso, o minério é geralmente maciço com corpos tubulares ou aproximadamente colunares. Estando a magnetita sempre presente na forma de grãos agregados, enquanto a hematita é encontrada na forma de uma trama de cristais alongados. Já no domínio oriental, predomina-se os minerais xistosos, ou seja, aqueles que apresentam aspectos lamelares.

Figura 4.1 | Esboços das principais províncias e depósitos minerais do Brasil



Fonte: NEVES, M.R. 2007, p.24.

Quadro 4.1 | Reservas, produção e situação no mercado das commodities minerais e principais minas brasileiras, em 2012/2013

Minério	Reserva (em 1000 t)	Produção (t/ano)	% global	Situação	Principais minas
Amianto	10 515	304 321	15,2	Grande exportador	Cana Brava (GO)
Bauxita	590 000	33 260 000	12,7	Grande exportador	São Lourenço (MG)
					Juriti (PA)
					Oriximiná (PA)
					Paragominas (PA)
					Itamarati de Minas (MG)
Carvão	2 154 000	6 630 000	0,1	Grande importador	Criciúma (SC)
					Candiota (RS)
					outras 20 minas no RS.
Cobre	11 419	223 100	1,3	Importador	Chapada (GO)
					Sossego (PA)
					Salobo (PA)
					Caraíba (BA)
Estanho	341 033	13 667 000	5,94	Exportador	Bom Futuro (RO)
					Massangana (RO)
					São Lourenço (RO)
Ferro	19 948 000	400 822 000	13,4	Grande exportador	33 no Quadrilátero Ferrífero (MG)
					N4, N5 e S11 (PA).

P2O5	270 000	6 740 000	3,2	Grande importador	MCT (MG)
					Lagamar (MG)
					Irecê (BA)
					Catalão (GO)
					Ouvidor (GO)
					Cajati (SP)
Grafita	39 805	88 000	8	Grande exportador	Tijuco Preto (MG)
					Imidia (BA)
					da Paca (MG)
					Zé Crioulo (MG)
Magnesita	239 342	479 000	7,4	Exportador	Brumado (BA)
Manganês	53 5000	1 118 000	6,6	Exportador	Azul (PA)
					Lucas (MG)
					Urucum (MS)
					Comin (MS)
					Biritirama (PA)
					Morro da Mina (MG)
Nióbio	10 565	82 214	93,52	Grande exportador	Barreiro (MG)
					Boa Vista (GO)
Níquel	8 658	139 531	6,2	Exportador	Santa Rita (BA)
					Barro Alto (GO)
					Barro Alto (GO)
					Niquelândia (GO)
					Onça-Puma (PA)

Ouro	2,6	67	2,5	Exportador	Fazendo Nova (GO)
					Aurizona (MA)
					Jacobina (BA)
					Morro do Ouro (GO)
					Pedra Branca do Amapari (AP)
					Crixás (GO)
					São Vicente (MT)
					São Francisco (MT)
					Santa Bárbara (MG)
					Sabará (MG)
					Cocais (MG)
Caeté (MG)					
Potássio (KCl)	14 925	346 000	1	Grande importador	Taquari/ Vassouras (SE)
Tântalo	35	118	16,8	Grande exportador	Garimpos
Zinco	2 079	164	1,2	Importador	Morro Agudo (MG)
					Vazante (MG)

Fonte: Academia Brasileira de Ciências, 2016, p.21-22



Assimile

Você sabe como é feita a classificação geoquímica dos elementos químicos? Nesse quadro você irá entender um pouco melhor sobre essa classificação.

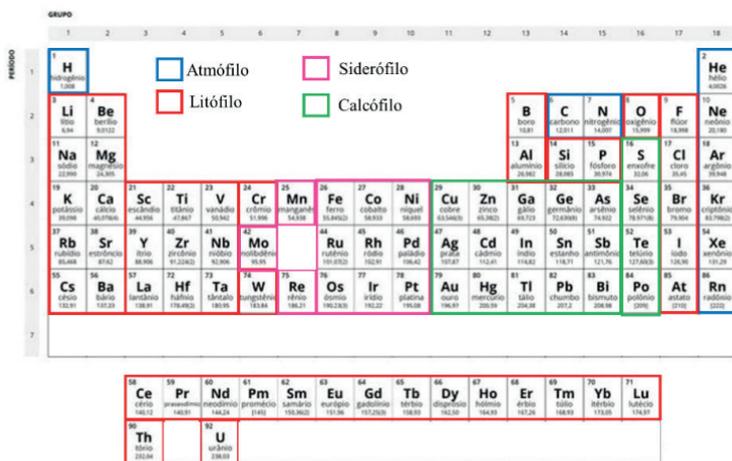
- **Siderófilos:** são caracterizados por elementos de transição externa (bloco d da tabela periódica) que apresentam alta densidade e

também a tendência de se ligar ao ferro metálico em seu estado sólido ou fundido. Como apresentam maior afinidade pelo Fe em relação a elementos, como oxigênio (O) e enxofre (S), são elementos comuns no núcleo terrestre e em meteoritos.

- **Calcófilos:** são caracterizados por elementos metálicos que se ligam preferencialmente ao S em relação ao O. São encontrados na forma de sulfetos e estão presentes no manto terrestre.
- **Litófilos:** incluem os elementos altamente reativos dos blocos s e f da tabela periódica e também um pequeno número de não metais reativos e os metais mais reativos do bloco d como titânio (Ti), zircônio (Zr) e vanádio (V). São elementos que apresentam afinidade com a sílica, portanto, são encontrados na litosfera.
- **Atmófilos:** são aqueles elementos encontrados na natureza no estado gasoso.

A Figura 4.2 pode melhor ilustrar a classificação geoquímica dos elementos, ou seja, a maneira como os elementos encontram-se combinados na natureza.

Figura 4.2 | Classificação geoquímica dos elementos químicos



Fonte: elaborada pela autora.



Você sabia que a exploração mineral no Brasil é uma importante atividade econômica? Por possuir um território amplo, o Brasil apresenta uma variedade de recursos naturais, entretanto, será que esses recursos são suficientes para o país se autossustentar do ponto de vista industrial? Muitas vezes, exportamos diversos recursos minerais e importamos produtos acabados feitos com os recursos daqui exportados.

O Brasil também apresenta destaque na extração de manganês. Assim como o ferro, o manganês também pode ser utilizado na indústria do aço, sendo responsável por dar liga aos componentes, melhorando as propriedades mecânicas do aço. A maior parte do manganês extraído no Brasil destina-se a essa aplicação, sendo encontrado no estado do Amapá. Também está presente em menor quantidade no Quadrilátero Ferrífero (MG) e na Serra dos Carajás (PA).

A bauxita também é um recurso importante presente no Brasil. É a principal fonte para produção de alumínio (Al) metálico. O Brasil detém a terceira maior reserva de bauxita no mundo, sendo que suas jazidas estão localizadas, principalmente, nos estados de Minas Gerais e Pará.

A formação da bauxita inclui a decomposição de rochas alcalinas, provocada pela infiltração de água de chuva, por exemplo, no interior das rochas, ao longo de muitos anos. Muitas vezes, ela pode apresentar uma coloração avermelhada, devido à presença de Fe em sua composição, sendo este o contaminante presente em maior quantidade na bauxita.



Por que será que o estado de Minas Gerais recebeu esse nome? Que tipos de riquezas minerais os portugueses exploraram no nosso país quando aqui chegaram? Para entender um pouco melhor sobre as riquezas minerais presentes nas cidades de Minas Gerais e também para melhor entender a exploração mineral dos portugueses, assista o vídeo a seguir:

Caminhos da Reportagem: a rota do ouro e do diamante (Parte I).

Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=KRF07ozUJmc>.
Acesso em: 17 dez. 2017.

Assista os primeiros 10 minutos deste vídeo. Ele lhe ajudará a melhor entender os questionamentos anteriores. Você irá perceber que a exploração mineral existe em nosso país desde o período colonial.

Conforme você pode notar, o Brasil possui um papel importante dentro da atividade de exploração mineral no mundo, principalmente, no que diz respeito ao minério de ferro. Nas próximas seções, você entenderá melhor sobre as aplicações desses recursos minerais, assim como seu processamento industrial.

Sem medo de errar

Vamos relembrar a situação problema exposta no item “Diálogo Aberto”? Você deve se lembrar de que a empresa multinacional na qual você trabalha deseja investir na produção de aço no Brasil, atividade ainda não desenvolvida pela empresa em nosso país. A produção do aço é feita em um alto forno e utiliza-se o mineral hematita (Fe_2O_3) como fonte de ferro, além do carvão mineral como agente redutor e como fonte de energia, e também ar atmosférico. Para melhor planejar as atividades da empresa na produção do aço, é necessário que você faça um levantamento das principais reservas de hematita no Brasil e também verifique a disponibilidade de carvão mineral, de modo a saber se o Brasil apresenta condições suficientes para fornecimento das matérias-primas desejadas ou se haverá necessidade de importação desses recursos.

Você, como profissional responsável, sabe que o Brasil é um grande exportador de minério de ferro (hematita), por possuir grandes reservas de hematita na região do Quadrilátero Ferrífero (MG) e também na Serra dos Carajás (PA), sendo assim, não será necessário que a indústria importe o minério de ferro, entretanto, em seu estudo, você verifica que o Brasil não possui vastas reservas de carvão mineral, o que possivelmente acarretará na importação desta matéria-prima.

Para apresentar o resultado à empresa, você deve elaborar um relatório que mapeie as principais reservas de hematita e

carvão vegetal existente no Brasil e concluir seu estudo afirmando que possivelmente será necessário a importação apenas do carvão vegetal. A empresa ficará bastante satisfeita com o estudo apresentado, pois ele poderá auxiliar a tomada de decisão da empresa sobre a viabilidade de implementação de uma nova unidade destinada à produção de aço no Brasil.

Avançando na prática

Visita técnica a uma reserva de minério de ferro

Descrição da situação-problema

Você trabalha como professor de Química em um colégio e deseja ensinar o processo de produção e de extração de materiais metálicos, entretanto, antes de iniciar esse assunto, você deseja propor aos alunos alguma atividade que faça com que eles entendam um pouco melhor a extração dos minerais e os recursos minerais existentes no Brasil, pois são a partir destes recursos que os materiais metálicos serão obtidos. Como a escola que você trabalha está localizada próxima ao Quadrilátero Ferrífero, você resolve agendar uma visita técnica com seus alunos para que eles entendam e conheçam um pouco mais sobre a extração do minério de ferro. Como você direcionaria essa atividade com seus alunos? Que tipo de observações eles deverão fazer? Que aspectos deverão ser discutidos após a visita técnica?

Resolução da situação-problema

Durante a visita técnica, você direciona seus alunos a observarem e questionarem aspectos envolvendo a composição química das substâncias presentes, aspectos de formação do mineral e condições geológicas do local que possam influenciar na formação do minério de ferro. Você realiza questionamentos, de modo que o aluno perceba que a maioria dos metais não são encontrados isolados na natureza, estando sempre combinados com oxigênio ou enxofre, por exemplo, e por isso são necessários processamentos industriais para obtenção do metal puro. O aluno deverá apresentar um relatório a respeito da visita mostrando esses aspectos e,

posteriormente, você, como professor, fará um fechamento em sala de aula discutindo os aspectos econômicos envolvidos na extração do mineral, destacando a sua importância do ponto de vista industrial e econômico. Essa atividade foi importante para que os alunos entendessem melhor a extração e a disponibilidade da hematita no Brasil, de modo que, posteriormente, você possa abordar o processamento desse mineral, enfatizando a produção do aço, por exemplo.

Faça valer a pena

1. O Estado de _____ apresenta destaque na extração de minério de ferro. Esse é encontrado na natureza, principalmente, na forma de _____, sendo sua principal aplicação a produção de _____.

Assinale a alternativa que completa corretamente a sentença anterior.

- a) São Paulo, bauxita, Al.
- b) Pará, hematita, Al.
- c) Minas Gerais, bauxita, aço.
- d) Minas Gerais, bauxita, Al.
- e) Minas Gerais, hematita, aço.

2. "A bauxita é uma rocha de cor vermelha formada principalmente por óxido de alumínio e outros compostos em menores quantidades, como sílica, dióxido de titânio, óxidos de ferro e silicato de alumínio. Esse mineral foi descoberto pelo geólogo e mineralogista francês Pierre Berthier, em 1821". Fonte: <https://www.infoescola.com/rochas-e-minerais/bauxita/>. Acesso em: 17 dez. 2017.

A respeito da bauxita, foram feitas algumas afirmações:

- I.É a principal matéria-prima utilizada na produção de alumínio metálico.
- II.O Brasil não apresenta reservas deste minério.
- III.É utilizada na produção do aço.

Assinale a alternativa que apresenta as afirmações corretas.

- a) I, II e III.
- b) I e II, apenas.
- c) II e III, apenas.
- d) I e III, apenas.
- e) I apenas.

3. “O minério de manganês está entre os vinte elementos mais abundantes na crosta terrestre, no entanto, é raro encontrar um depósito do minério, estimativas dão conta que de cada 300 concentrações de manganês apenas uma pode ser considerada como depósito”.

Fonte: SANTANA, A.L. 117p.

A respeito do manganês, assinale a alternativa correta.

- a) Pode ser utilizado na produção do aço.
- b) O Brasil não apresenta reservas de manganês.
- c) É utilizado na produção de Al.
- d) É encontrado na natureza na forma de hematita.
- e) É encontrado na natureza na forma de bauxita

Seção 4.2

Extração e utilização dos minerais

Diálogo aberto

Prezado aluno, na seção anterior falamos sobre os recursos minerais existentes no Brasil. Agora daremos continuidade a esse estudo destacando os processos de extração dos bens minerais e suas aplicações. Você já deve ter tido contato com diferentes materiais feitos de aço ou alumínio, não é mesmo? Você sabia que estes materiais são produzidos a partir do minério de ferro e da bauxita, respectivamente? Isso mesmo. Muitos materiais que usamos no cotidiano são obtidos a partir do processamento recursos de minerais. Para melhor ilustrar essas aplicações, vamos retomar à situação exposta no item “Convite ao Estudo”.

Lembre-se de que você trabalha em uma indústria multinacional que deseja implantar uma nova unidade no Brasil voltada à produção de aço a partir da hematita (Fe_2O_3). Na realização da primeira etapa da atividade, proposta na seção anterior, você verificou que o Brasil apresenta grandes reservas deste mineral, podendo, portanto, ser viável a instalação de uma nova unidade para produção de aço. A indústria tem como objetivo inicial uma produção diária de 500 kg de aço, cujo teor de Fe é de 98% (m/m). Você saberia determinar a quantidade de hematita necessária para que essa taxa de produção seja alcançada? A pureza e qualidade da hematita extraída irá influenciar no processo? Que outra matéria-prima deverá ser determinada para que a produção do aço seja possível?

Ao término desta seção, você será capaz de responder a essas questões. Essas respostas auxiliarão a empresa durante as tratativas da nova planta. Conhecer a reação química envolvida nesta etapa irá auxiliar você. Excelente trabalho!

Não pode faltar

Caro aluno, agora que você já estudou sobre os principais recursos minerais presentes no Brasil, vamos entender melhor como eles são extraídos e quais são suas principais aplicações. Como você pode observar na seção anterior, o minério de ferro apresenta a principal

classe de recursos minerais extraída no Brasil, devido a sua elevada abundância nos estados de Minas Gerais e Pará, e também devido às importantes aplicações do ferro (Fe) na sociedade. Os minérios de ferro juntamente a seus produtos semiacabados apresentam um papel importante na economia da mineração brasileira. É importante ressaltar que tanto o mercado interno como externo do minério de ferro se caracterizam por crescentes exigências na qualidade dos bens minerais, pois isso irá refletir de maneira direta na qualidade do produto acabado. Desse modo, as especificações para as propriedades físicas, químicas e metalúrgicas dos minérios de ferro acompanham, em termos de qualidade, o desenvolvimento tecnológico do setor siderúrgico e de seus produtos finais.

Para darmos continuidade ao assunto, vamos entender o conceito de beneficiamento mineral de modo geral. Esse termo está relacionado a uma série de operações com o objetivo de se modificar a granulometria e concentração do mineral, sem que ocorra a alteração da identidade química. As principais operações realizadas na etapa de beneficiamento mineral incluem as seguintes etapas: fragmentação (britagem e moagem), classificação, concentração e métodos de separação sólido/líquido. Essas operações são importantes para melhor recuperar o recurso mineral desejado e também adequar os produtos obtidos em função da qualidade desejada. A seguir, podemos melhor entender o que seria cada uma destas etapas:

- **Fragmentação:** trata-se de uma técnica fundamentada na diminuição granulométrica dos recursos minerais até que o mineral de interesse possa ser separado dos minerais indesejáveis. Envolve as etapas de britagem (Figura 4.3 a), na qual as partículas atingem diâmetros na ordem de 1mm e também de moagem (Figura 4.3 b) que proporcionam tamanhos de partículas ainda menores.

Figura 4.3 | Equipamentos utilizados no processo de fragmentação: a. britador e b. moinho



Fonte: adaptada de <<https://ge902ferro.wordpress.com/processos/tratamento-e-beneficiamento/>>. Acesso em: 19 dez. 2017.

- **Classificação:** é o processo de separação de partículas por tamanho em conjunto com as etapas de fragmentação. Os principais equipamentos utilizados para esse fim são: peneira, classificadores mecânicos e ciclones.
- **Concentração:** ocorre quando se deseja separar o recurso mineral de interesse daqueles que são indesejáveis. Para que isso seja possível, é preciso que os bens minerais tenham passado pelas etapas mencionadas anteriormente. Os principais métodos para concentração do mineral são: separação/concentração gravimétrica, separação magnética, flotação, seleção mecanizada, utilizando dispositivos automáticos de detecção, de identificação e de separação.

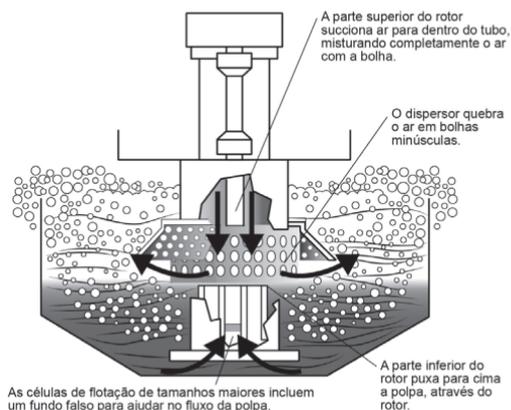


Assimile

O beneficiamento mineral envolve um conjunto de técnicas que visam separar e concentrar o recurso mineral de interesse, de modo a otimizar a qualidade do mineral e também de seu produto acabado.

Com a redução mundial das reservas de alto teor de minério de ferro mundial, os processos de concentração são de grande interesse das empresas que extraem o minério e a técnica de flotação reversa passou a ter bastante aceitação. Trata-se da técnica mais utilizada entre os processos de concentração do minério de ferro, entretanto, a mesma apresenta como desvantagem o consumo excessivo de água. Nesse processo são utilizadas bolhas de ar que apresentam características eletromagnéticas, enquanto o minério de ferro é hidrofóbico. Dessa forma, esse material que apresenta pequena granulometria é aderido às bolhas que se concentram na parte superior do tanque e que, por diferença de densidade, podem migrar para a parte superior do tanque na forma de espuma. A Figura 4.4 ilustra melhor o processo. Dessa forma, a espuma é recolhida da parte superior do tanque, formando o ciclo de isolamento do minério.

Figura 4.4 | Representação do processo de flotação empregado na concentração do mineral



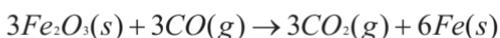
Fonte: <<https://www.ejminas.com/flotacao-mineracao>>. Acesso em: 19 dez. 2017.



Refleta

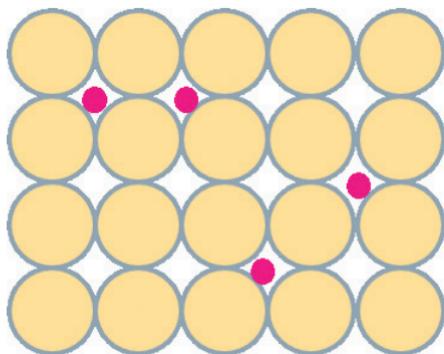
Você sabia que para cada tonelada de minério de ferro que passa pelo processo de flotação são necessários, em média, 4m³ de água? Somente no ano de 2000, no Quadrilátero Ferrífero, foram processadas 194 bilhões de toneladas de minério bruto e foi necessário 1 bilhão de metros cúbicos de água para seu beneficiamento. Será que essa atividade pode gerar dano ao meio ambiente? Reflita!

Por que será que o minério de ferro é tão importante para as nossas vidas? O minério de ferro, em especial a hematita (Fe_2O_3), é uma matéria-prima importante para a produção do aço. Este está presente em muitos objetos importantes para nosso dia a dia, como automóveis, eletrodomésticos, estrutura de casas, etc. Vamos entender melhor o que é o aço: trata-se de uma liga metálica, ou seja, uma solução homogênea sólida, formada de ferro (Fe) e carbono (C). Na estrutura do aço, o Fe apresenta a estrutura principal, enquanto os átomos de C, de menor raio, preenchem os espaços vazios (interstícios), formando uma liga do tipo intersticial (Figura 4.5). A presença dos átomos de C nos interstícios melhora as propriedades mecânicas do Fe, que quando combinado ao C é denominado aço. O teor de C no aço varia em torno de 0.5 a 2.0% (m/m). Ele é produzido por meio da reação:



Na próxima seção, estudaremos melhor o processo de produção do aço.

Figura 4.5 | Representação da estrutura do aço (liga intersticial). As esferas maiores representam os átomos de Fe enquanto as esferas menores os átomos de C



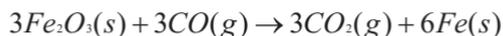
Fonte: elaborada pela autora.



Exemplificando

Vamos supor que você trabalha em uma empresa que deseja produzir 1000 kg de aço por dia com 99% de Fe, a partir da hematita. Qual será a quantidade de hematita necessária? Dados: massas molares: Fe= 56g/mol, O =16g/mol

Se temos 1000 kg de aço com 99% de Fe, a massa de Fe presente será 990kg. Assim, considerando a reação:



480 g Fe_2O_3 ----- 336 g Fe

x ----- 990 kg Fe

x= 1414 kg de Fe_2O_3

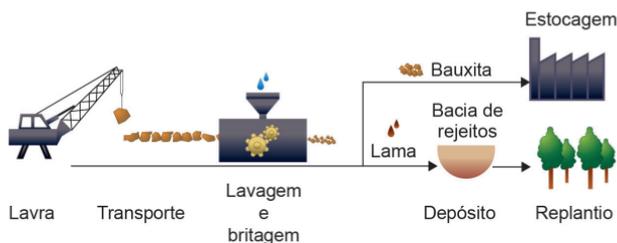
A quantidade de hematita necessária para produção de 1000 kg de aço contendo 99% de Fe será igual a 1414 kg.

Conforme apresentamos na Seção 1 desta unidade, a bauxita também é um recurso muito importante encontrado no Brasil. Normalmente, a bauxita é encontrada em depósitos cobertos por várias camadas de rochas e argila, as quais precisam ser removidas.

Em seguida, a bauxita é transportada para a usina, onde será lavada e britada, antes de ser transportada para o refino e a purificação (trataremos melhor esses itens na Seção 3). A lama resultante do processo de lavagem é depositada em bacia de rejeitos que, após seu uso, é coberta e recebe o plantio de espécies nativas para que se estabeleça a vegetação natural. A Figura 4.6 ilustra o processo de extração e de processamento da bauxita, envolvendo também a recuperação ambiental necessária.

Será que a extração da bauxita pode afetar o meio ambiente? A resposta para isso é sim, assim como qualquer outro recurso mineral. Ocorrem mudanças na paisagem e no ataque à biodiversidade, causados pela remoção e restabelecimento da vegetação, além de ser necessário o controle da erosão e da drenagem superficial para que seja possível a retirada das rochas e solo. Como consequência, temos distúrbios hidrológicos devido à alteração dos cursos d'água, afetando também a qualidade e a distribuição da água.

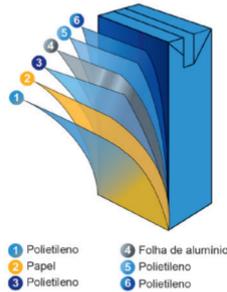
Figura 4.6 | Processo de extração e processamento da bauxita



Fonte: <<https://www.hydro.com/pt-BR/a-hydro-no-brasil/Sobre-o-aluminio/Ciclo-de-vida-doaluminio/Mineracao-de-bauxita/>>. Acesso em: 19 dez. 2017.

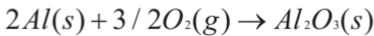
Você saberia dizer porque a bauxita é um recurso tão importante? É através da bauxita que o alumínio (Al) é produzido. A produção é feita por um processo denominado eletrólise. Trata-se de um processo bastante custoso, por isso, muitas vezes a reciclagem do Al é preferível. Esse metal é muito utilizado na formação de ligas metálicas, como elemento estrutural na formação de embarcações e veículos terrestres; na construção civil como meio estrutural de portas, esquadrias, janelas, portões, divisórias, entre outros; e também em revestimentos para embalagens, como é o caso das embalagens Tetra Pak (Figura 4.7). Nesse tipo de embalagem, a folha de Al tem como função barrar a entrada de oxigênio (O_2) e luz, evitando, assim, que o alimento sofra alterações químicas.

Figura 4.7 | Representação das acamadas presentes em uma embalagem Tetra Pak



Fonte: <http://embalagensustentavel.com.br/2011/06/21/tetra-pak-e-o-pos-consumo/tetra-pak-camadas/>. Acesso em: 19 dez. 2017.

A utilização do Al em objetos, como portas, portões e automóveis, está relacionado a seu potencial de sofrer corrosão. Apesar de se oxidar facilmente na presença de O_2 (ar atmosférico), o produto de oxidação é o óxido de alumínio (Al_2O_3), que aderece à superfície do metal, formando uma película insolúvel em água que não permite o contato do interior do material com o meio externo, evitando, assim, que a corrosão continue. Dessa forma, o próprio produto da corrosão evita com que a corrosão continue. A reação a seguir ilustra a formação da película protetora de Al_2O_3 :



O calcário, cuja composição principal é o carbonato de cálcio ($CaCO_3$), também tem sua extração importante dentre os recursos naturais explorados em nosso país. Ele normalmente é extraído de pedreiras ou grandes depósitos, que podem apresentar largas extensões e espessuras chegando a ter centenas de metros (Figura 4.8).

Figura 4.8 | Imagem de uma mina de calcário



Fonte: <<http://verbetes.cetem.gov.br/verbetes/ExibeVerbete.aspx?verid=173>>. Acesso em: 19 dez. 2017.

Dependendo da qualidade do calcário obtido, ele pode ser utilizado nas mais variadas aplicações, como produção de papel, tintas, plásticos, cerâmica, borracha, alimentação de animais, metalurgia, vidros e também na correção de pH de solos e água. Já o calcário menos nobre, que não atende a determinadas especificações industriais, é destinado a outros fins menos exigentes, como na construção civil. No Brasil, uma das principais aplicações do calcário é como corretivo de pH de solos. Essa propriedade está relacionada à afinidade química dos carbonatos (CO_3^{2-}) com ácidos, conforme reação a seguir:



Assim como já mencionamos, a extração dos minerais gera impactos ambientais e isso não é diferente na etapa de extração do calcário, que pode contribuir para a degradação da vegetação local. A extração de calcário pode ser prejudicial também para o ciclo local das águas, pois os afloramentos de calcário recolhem a água das chuvas e a direcionam aos corpos d'água subterrâneos, funcionando como uma caixa d'água natural e eficaz. Além disso, a extração de calcário, inevitavelmente, desfaz as paisagens e destrói os sítios de interesse espeleológico, arqueológico e indígena (SANTI; FILHO, 2004). É importante ressaltar que a extração de todo e qualquer recurso mineral geram impactos ao meio.



Pesquise mais

Para que você entenda mais sobre os benefícios e consequências das atividades de mineração, foram selecionados alguns vídeos e reportagens que poderão auxiliá-lo.

O vídeo a seguir mostra uma reportagem feita em uma área de extração de bauxita na região de Minas Gerais que foi recuperada por meio do plantio de café:

Área de extração de bauxita em MG é recuperada com mata, café e pasto. Disponível em: <<http://g1.globo.com/economia/agronegocios/globo-rural/noticia/2017/10/area-de-extracao-de-bauxita-em-mg-e-recuperada-com-mata-caffe-e-pasto.html>>. Acesso em: 19 dez. 2017.

O texto a seguir representa um material elaborado pela Associação Brasileira de Alumínio e nos conta um pouco a extração e a utilização da bauxita no Brasil. Sugerimos que você faça a leitura das páginas 9 a 17.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ALUMÍNIO, **Bauxita no Brasil: Mineração responsável e competitividade**. Disponível em: <http://www.abal.org.br/downloads/ABAL_Relatorio_Bauxita_2017_1.pdf> . Acesso em: 19 dez. 2017

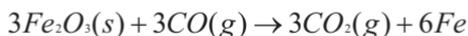
O vídeo a seguir trata de uma reportagem feita sobre a extração do calcário no estado de Rondônia.

Veja como é feita a extração de calcário em Rondônia. Disponível em: <<http://g1.globo.com/am/amazonas/amazonia-rural/videos/v/veja-como-e-feita-a-extracao-de-calcario-em-rondonia/4912820/>>. Acesso em: 19 dez. 2017.

Acesse os materiais recomendados que irão lhe auxiliar a entender melhor sobre essa seção.

Sem medo de errar

Nessa seção abordamos a extração de três importantes recursos minerais existentes no Brasil: hematita, bauxita e calcário. Falamos sobre a importância destes recursos, as suas aplicações e também sobre os impactos que a extração destes recursos podem causar ao meio ambiente. Agora, vamos retomar a situação proposta no item *Diálogo Aberto?* Lembre-se de que você trabalha em uma empresa multinacional que deseja implementar uma planta no Brasil para produção de aço a partir do mineral hematita. Para melhor dimensionar a planta, você deve calcular a quantidade de hematita necessária para a produção de 500 kg de aço por dia com 98% de Fe (m/m). Você sabe que para produção do aço ocorre por meio da reação:



Sabendo que o aço obtido terá 98% de Fe, em uma produção diária de 500 kg de aço, teremos 490 kg de Fe e 10 kg de C. Considerando a reação anterior e as massas molares de Fe e O como 56 e 16g/mol, respectivamente, temos:

480 g <<Eqn016.eps>> ----- 336 g de Fe

X ----- 490 kg de Fe

X = 700 kg de hematita

Considerando que a hematita tenha 100% de pureza, o que nunca é verdade, serão necessários 700 kg de hematita para a produção de aço desejada. Mas você sabe que a massa a ser utilizada poderá ser maior, uma vez que a hematita não apresenta 100% de pureza, portanto, a pureza é um fator determinante também para o dimensionamento da planta. Além disso, o monóxido de carbono (CO), que participa do processo de redução da hematita a ferro metálico, é proveniente da queima do carvão com ar atmosférico, dessa forma, além da hematita, também será necessário o uso de carvão e isso deverá ser considerado para o dimensionamento da planta. Você deve concluir o seu trabalho apresentando um relatório para a apresentação, considerando a massa do mineral necessária e também equacionar outras variáveis que podem influenciar no dimensionamento da planta para produção de aço, como a pureza do mineral utilizado, assim como a massa de carvão utilizada.

Avançando na prática

Extração da bauxita

Descrição da situação-problema

Vamos considerar que você trabalha em uma mineradora. A empresa é responsável pela extração de diversos minerais, dentre eles, a bauxita. Uma nova área destinada à exploração da bauxita foi encontrada e você, como profissional responsável pelo processo, necessita fazer um levantamento dos principais impactos que essa exploração poderá causar ao meio ambiente. Para isso, você fez uma visita ao local e verificou que a reserva de bauxita está localizada sobre uma reserva de mata nativa e que também passa um curso de água próximo ao local a ser explorado. Quais itens você acredita ser importante para o seu relatório? A visita ao local poderá ajudá-lo a formar conclusões? De que maneira a exploração da bauxita pode impactar o local? Será necessário um replantio no local? A exploração poderá afetar o curso d'água? Bom trabalho!

Resolução da situação-problema

Após uma visita técnica ao local da reserva de bauxita, você verifica que a extração poderá afetar a vegetação local, pois a bauxita normalmente é encontrada abaixo das camadas de solo e de rocha, sendo necessário, portanto, remover a vegetação para sua extração.

Dessa forma, você conclui que se a empresa realmente fizer a extração da bauxita, será necessário realizar o replantio das espécies nativas, visando minimizar os impactos ambientais. Você sabe que a atividade poderá afetar a biodiversidade, trazendo mudanças drásticas à paisagem local. Você também sabe que a atividade em questão poderá causar distúrbios hidrológicos, uma vez que há um curso d'água ao redor da reserva de bauxita, podendo afetar também a qualidade e a distribuição da água. Você conclui que a visita ao local a ser explorado foi muito importante para fundamentar as suas conclusões, e relatar de que maneira a extração da bauxita nesta região pode impactar o meio ambiente. Seguramente, o material que você deve apresentar será muito importante para as tomadas de decisões da empresa.

Faça valer a pena

1. O minério de ferro atua como matéria-prima utilizada na produção do _____, que é uma liga formada pelos elementos _____ e _____. A função do elemento _____ é otimizar as propriedades _____ do material.

Assinale a alternativa que completa corretamente a frase acima.

- a) aço, alumínio, carbono, carbono, mecânicas.
- b) bronze, alumínio, carbono, carbono, mecânicas.
- c) aço, ferro, carbono, carbono, mecânicas.
- d) aço, ferro, carbono, alumínio, mecânicas
- e) bronze, ferro, alumínio, carbono, mecânicas.

2. Os recursos minerais são extraídos da natureza e, posteriormente, separados e processados, levando à obtenção de diversos materiais importantes no nosso dia a dia.

Analisar as colunas a seguir:

Coluna I – Mineral	Coluna II – Produto
a. Hematita	1. Alumínio
b. Bauxita	2. Aço
c. Calcário	3. Papel

Assinale a alternativa que associa corretamente as colunas I e II.

- a) a.1, b.2, c.3
- b) a.2, b.1, c.3
- c) a.3, b.1, c.2
- d) a.3, b.2, c.1
- e) a.2, b.3, c.1

3. O calcário para fins agrícolas é utilizado para corrigir a acidez do solo. Ao mesmo tempo em que faz essa correção, o **calcário** também fornece cálcio e magnésio indispensáveis para a nutrição das plantas.

Considerando o texto acima, assinale a alternativa correta.

- a) O calcário é uma fonte importante de Fe.
- b) O calcário apresenta caráter ácido.
- c) O íon carbonato presente no calcário tem afinidade com íons H^+ , por isso é utilizado para correção de pH de solos.
- d) O calcário é uma fonte de íons hidróxido.
- e) o calcário é uma fonte de Al.

Seção 4.3

Aplicações e processamentos industriais

Diálogo aberto

Prezado aluno, nas seções anteriores você aprendeu sobre os recursos minerais existentes no Brasil e sobre suas aplicações, agora daremos continuidade ao assunto abordando como os minerais são processados e transformados em produtos de interesse industrial.

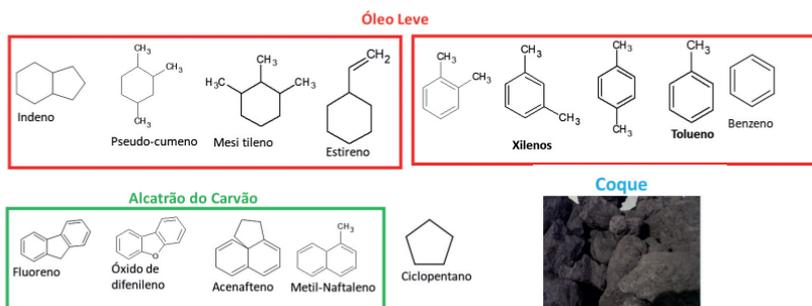
Para melhor exemplificar, vamos retomar ao contexto desenvolvido no item “Convite ao Estudo”? Você deve se lembrar da situação hipotética na qual você trabalha em uma indústria multinacional que visa implementar uma nova planta no Brasil para produção de aço, mas para isso são necessários alguns estudos que vão desde a extração e análise dos recursos minerais existentes, como também o planejamento da planta quanto aos aspectos produtivos, assim como o tratamento do resíduo gerado. Você deve lembrar que na primeira etapa do estudo, você realizou um levantamento a respeito da localização e da produtividade das principais reservas de minério de ferro e de carvão existentes no Brasil, de modo a verificar se o Brasil apresenta os recursos necessários para implementação da nova planta industrial. Em um segundo momento, foi solicitado a você que determine a quantidade de hematita necessária para uma produção diária de aço (98% de Fe) igual a 500 kg. Dando continuidade ao seu estudo, nessa terceira etapa do projeto de implementação desta nova planta, a empresa deseja fazer um levantamento do impacto ambiental gerado na produção do aço e, no caso de produção de resíduos, você também deverá apontar como estes deverão ser tratados ou descartados. Você saberia dizer que tipo de resíduo é gerado na produção do aço a partir da hematita (Fe_2O_3)? Que impacto esse resíduo poderá trazer? Como esse resíduo poderá ser tratado? De que maneira as três etapas realizadas em seu estudo podem auxiliar no dimensionamento e implementação desta nova planta industrial? Essas respostas são fundamentais para implementação de uma planta de produção de aço. Bom trabalho!

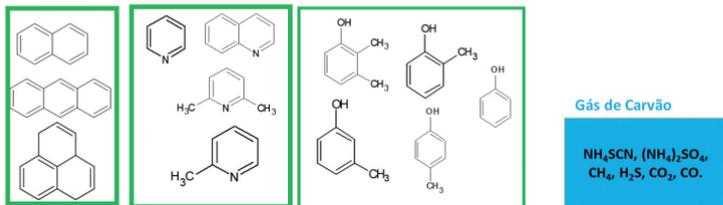
Não pode faltar

Prezado aluno, agora que você já aprendeu sobre os recursos minerais brasileiros, a sua extração e aplicações, vamos aprimorar seus estudos apresentando os principais processos industriais que envolvem o uso de minerais, destacando sua importância e também os impactos que essas atividades podem trazer. Para começar nosso estudo, vamos abordar sobre o processamento do mineral hematita (Fe_2O_3). Já discutimos que o Brasil apresenta grandes áreas de reservas de minério de ferro, sendo importante para a produção do aço (liga de ferro com carbono). Mas como ocorre a produção do aço?

As matérias-primas utilizadas nesse processo são a hematita, carvão coque e ar atmosférico. O carvão coque é uma variação do carvão obtida a partir do processo de pirólise do carvão mineral, ou seja, aquecimento feito em uma atmosfera inerte. Quando o carvão mineral passa por esse processo, o aquecimento promove a quebra de algumas ligações, levando à formação de três frações: uma gasosa, uma líquida e uma sólida (Figura 4.9). A fração gasosa é constituída de espécies leves como metano (CH_4), ácido sulfídrico (H_2S), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2), etc. A fração líquida é formada por uma mistura denominada óleos leves (aromáticos leves e nafta) e também por alcatrão (hidrocarbonetos policíclico aromáticos). Essa fração dará origem a diversos solventes de importância industrial (benzeno, tolueno e xilenos, por exemplo). Por último, teremos a obtenção de um sólido residual purificado, denominado carvão coque (SHEREVE e BRINK, 1997).

Figura 4.9 | Substâncias produzidas a partir do carvão mineral





Gás de Carvão

$\text{NH}_3, \text{SCN}, (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4,$
 $\text{CH}_4, \text{H}_2\text{S}, \text{CO}_2, \text{CO}.$

Fonte: elaborada pelo autor.

A produção do aço ocorre em um equipamento denominado alto-forno (Figura 4.10). Na parte superior do alto-forno, este é alimentado com hematita, calcário e carvão coque. Essa mistura atua como um fundente, diminuindo a temperatura de fusão da hematita. Na parte inferior do forno, é injetada uma corrente de ar atmosférico (79% de N_2 e 21% de O_2), que promove a combustão do carvão de modo completo e incompleto, conforme exemplificado a seguir:



Como o ar atmosférico é uma mistura contendo apenas 21% de O_2 , a combustão se dá preferencialmente de modo incompleto, pois é a situação que requer menor quantidade desta espécie.

A combustão do carvão apresenta dois papéis importantes dentro do processo de produção do aço. O primeiro deles é o fornecimento do CO para a redução da hematita (Fe_2O_3) a ferro metálico (Fe). Esse processo se dá em três etapas, conforme apresentado a seguir (GOUTO E ROSA, 2013):



Temos a redução parcial dos íons Fe^{3+} , presentes na hematita, a Fe^{2+} . Essa etapa é exotérmica e apresenta $\Delta H = -47,6\text{kJ}$.

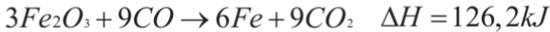


Nessa etapa, temos a redução total dos íons Fe^{3+} para Fe^{2+} , que estão presentes no óxido de ferro II (FeO). Trata-se de um processo endotérmico e apresenta $\Delta H = 36,8\text{kJ}$.



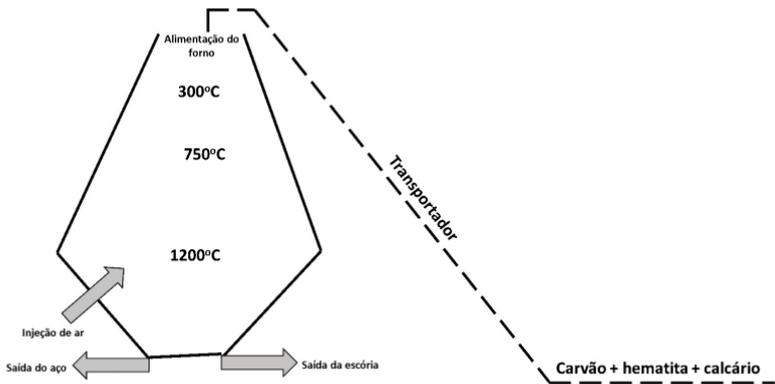
Nessa etapa final, temos a redução total do FeO para ferro metálico (Fe^0). Trata-se de um processo endotérmico, cuja variação da entalpia é $\Delta H = 17,2\text{kJ}$.

A soma das reações ocorridas nas etapas acima nos dá a reação global do processo, assim como o calor envolvido:



Conforme podemos notar, de maneira global, temos um processo endotérmico ($\Delta H > 0$), ou seja, é necessário fornecer energia para que a reação aconteça. Você saberia dizer de onde vem essa energia? Você se lembra de que mencionamos que a queima do carvão apresenta duas funções importantes? Uma delas já discutimos que seria o fornecimento de CO para redução da hematita a Fe, e a outra função é o fornecimento de energia. A energia liberada na sua queima é utilizada para promover a redução da hematita. Temos a liberação de -110 kJ por mol de carvão na queima incompleta e -393,6 kJ por mol de carvão na queima completa. A queima do carvão faz com que a temperatura no interior do alto forno aumente entre 1500 e 2300° C.

Figura 4.10 | Representação de um alto-forno utilizado na produção do aço



Fonte: elaborada pela autora.

O ferro metálico puro, assim como a maioria dos metais, é reativo, mole e dúctil, não apresentando muitas aplicações. Uma alternativa para a otimização destas propriedades é a formação de ligas metálicas. O aço é uma liga metálica de ferro e carbono. Qual a função do carbono no aço? Conforme discutimos, o alto forno é alimentado com carvão coque e hematita. O carvão é queimado em meio ao ar atmosférico, entretanto, o carvão residual do processo preenche os interstícios presentes na estrutura do ferro formando a

liga. Dependendo da quantidade de carbono presente na estrutura do ferro, a liga recebe algumas denominações. O ferro gusa, por exemplo, contém entre 2 a 5% de C (m/m), enquanto o aço de 0.5 a 1,8% de C (m/m).

Para a obtenção do que chamamos de ferro doce (ferro com 100% de pureza), são utilizadas várias técnicas, mas a mais comum é a injeção de O_2 puro dentro do alto forno a elevadas pressões. Isso faz com que o O_2 injetado reaja com o resíduo de carvão presente nos interstícios da estrutura do Fe, convertendo-o a CO_2 .

Com base no que foi discutido até agora, você saberia dizer quais resíduos são gerados nesse processo? Falaremos um pouco melhor sobre isso ainda nesta seção.



Assimile

O carvão apresenta um importante papel na produção do aço. Sua queima fornece CO e energia para o processo. Além disso, o carvão residual preenche os interstícios do ferro produzido, formando a liga metálica, que otimiza as propriedades mecânicas do ferro.

Agora vamos abordar o processo de produção de cimento e o processamento do calcário. O cimento é um material cerâmico que, quando em contato com a água, produz uma reação exotérmica que envolve a cristalização de produtos hidratados, ganhando, assim, resistência mecânica. As matérias-primas necessárias para a produção do cimento são carbonato de cálcio ($CaCO_3$), sílica, alumínio e minério de ferro. Essas matérias-primas normalmente são obtidas por meio da rocha calcária e da argila. O calcário é o componente principal a ser utilizado, sendo uma fonte importante de $CaCO_3$. A argila é um mineral rico em Al, Fe e Si, que são elementos essenciais para a qualidade final do cimento. A produção do cimento é feita por meio da moagem de uma mistura de calcário e argila, gerando grãos muito finos. No moinho é instalado um sistema de filtração de modo que as partículas geradas não sejam despejadas na atmosfera. Essa mistura é aquecida a $900^\circ C$ e direcionada a um forno, ocorrendo a seguinte reação:

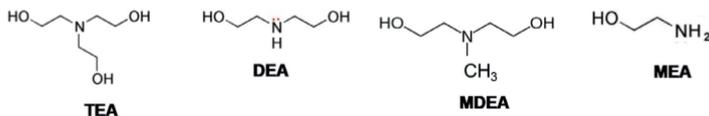


Nessa reação, temos a produção de óxido de cálcio (CaO) que

é o componente principal do cimento. Além da formação desta espécie, teremos também a formação de óxidos de alumínio de silício e de ferro.

Você notou alguma semelhança entre o processamento da hematita na produção do aço e do calcário na produção do cimento? Apesar dos produtos principais apresentarem aplicações muito diferenciadas, em ambos os processos temos a geração de CO_2 , como subproduto ou resíduo da reação. A emissão antrópica deste gás tem sido hoje atribuída como responsável pela intensificação do Efeito Estufa, que tem como consequência o aumento da temperatura média do planeta. Assim, para evitar que o CO_2 gerado vá para a atmosfera, as indústrias costumam empregar soluções de etanolaminas, como a monoetanolamina (MEA), dietanolamina (DEA), metil-dietanolamina (MDEA) e trietanolamina (TEA). As estruturas destas espécies estão presentes na Figura 4.11.

Figura 4.11 | Representação das principais etanolaminas utilizadas no processo de captura de CO_2 gerada em processos industriais



Fonte: ÁVILA et al., 2015, 670p.

A presença dos pares de elétrons livres no átomo de nitrogênio faz com que ocorra uma reação do tipo ácido-base, seguindo a teoria ácido-base de Lewis (ácido é uma espécie receptora de pares de elétrons, enquanto a base é uma espécie química doadora de pares de elétrons). A reação em questão leva à formação de carbamatos e carbonatos que ficam retidos na solução, evitando, assim, que o CO_2 seja emitido na atmosfera.



Reflita

Será que as etanolaminas representam a única forma de reter o CO_2 ? O que é feito após a captura de CO_2 ? Que outros métodos podem ser utilizados para essa finalidade?



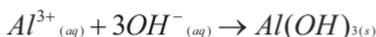
Você sabe o que é feito com as soluções de carbamatos e bicarbonatos que são produzidas após a captura de CO_2 ? Vamos entender um pouco mais sobre o assunto. O dióxido de carbono é um gás residual não apenas da indústria do cimento, mas também é gerado nos processos de produção de hidrogênio (H_2), via reforma a vapor, na produção do aço e também no processo de extração do petróleo. Para exemplificarmos o processo de captura de CO_2 , vamos considerar o processo de extração do petróleo. O petróleo é encontrado junto aos poros das rochas calcárias. Com o tempo, o carbonato presente nessas rochas sofre decomposição, liberando CO_2 , conforme reação a seguir:



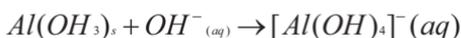
Quando o petróleo é extraído, uma grande quantidade deste gás pode estar presente. Para evitar sua emissão, são utilizadas soluções de etanolaminas, que farão a absorção do gás por meio de um processo químico. Assim, o CO_2 ficará retido na forma de carbamatos ou bicarbonatos. Esse processo é realizado à temperatura ambiente, entretanto, quando o sistema é aquecido, o CO_2 retido é liberado novamente e a solução de etanolamina é regenerada, podendo ser utilizada novamente para captura de CO_2 . Trata-se de um processo químico reversível. Uma questão bastante interessante de se comentar é que no processo de extração do petróleo, todo CO_2 obtido após a regeneração da solução é reinjetado sob altas pressões nas rochas. Esse procedimento aumenta a eficiência de extração do petróleo, pois o CO_2 é uma espécie química apolar, assim como os hidrocarbonetos presentes no petróleo.

O alumínio metálico é obtido a partir do processamento da bauxita que envolve duas etapas principais: a purificação da bauxita e sua eletrólise. O processo de purificação é necessário, pois a bauxita obtida não apresenta elevado grau de pureza. A purificação é iniciada por meio de um ataque ácido, provocando a dissolução da bauxita e também de outras impurezas presentes como óxidos metálicos. Apenas os silicatos não são solúveis em meio ácido, sendo, portanto, removidos nesse processo. A mistura, então, é filtrada e obtém-se uma solução contendo íons Al^{3+} e outros íons metálicos, principalmente Fe^{3+} , pois resíduos de óxidos de ferro são comuns

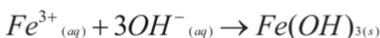
junto à bauxita. À solução resultante, é adicionada uma solução de hidróxido de sódio (NaOH). Com exceção dos metais alcalinos e do íon amônio (NH_4^+), todos os cátions metálicos precipitam em meio alcalino, formando seus respectivos hidróxidos. Entretanto, os íons Al^{3+} apresentam um comportamento um pouco diferente quando excesso de NaOH é adicionado. Vamos entender o que acontece: inicialmente, com a adição de NaOH, o alumínio presente na solução precipita na forma de $Al(OH)_3$, conforme reação abaixo:



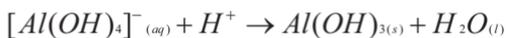
Entretanto, esse precipitado se dissolve em excesso de íons OH^- , devido à formação de um complexo solúvel em água, o íon aluminato:



O ferro representa um dos principais contaminantes existentes na bauxita. A adição de excesso de NaOH pode deixar o alumínio em uma forma solúvel, porém, isso não acontece com os íons de ferro. Os mesmos permanecem precipitados na forma de hidróxido de ferro (III), conforme reação a seguir.



Dessa forma, as impurezas presentes precipitam, enquanto o alumínio permanece em solução na forma do íon aluminato. Essas impurezas são removidas por meio de uma filtração. A próxima etapa envolve a formação do hidróxido de alumínio novamente. Para que isso ocorra, é necessário acidificar a solução. Removendo o excesso de base, o precipitado será formado novamente:



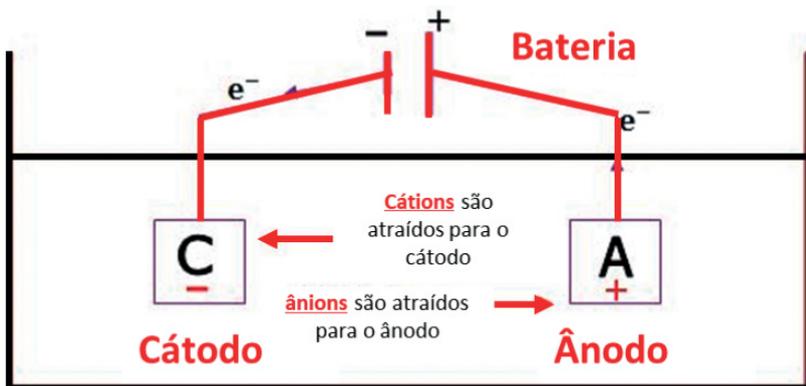
Esse precipitado é, então, lavado, seco e introduzido em um forno para que ocorra a calcinação. Nessa etapa, o $Al(OH)_3$ sofre decomposição, conforme reação a seguir, formando o Al_2O_3 , porém, agora essa espécie apresenta elevado grau de pureza.



Todas as etapas que discutimos até agora envolvem apenas a purificação da bauxita, entretanto, a sua principal aplicação é no processo de produção do alumínio metálico. Esse processo é feito por meio da eletrólise da bauxita e é um processo bastante custoso. Um processo eletrolítico é aquele em que se utiliza energia elétrica para a realização de uma reação química. Trata-se de um processo

de oxidorredução não espontâneo, ou seja, um processo que só ocorre quando há o fornecimento de energia. Utilizamos uma célula eletrolítica, que contém um eletrodo positivo, denominado ânodo; e um eletrodo negativo, denominado cátodo. No ânodo, ocorre o processo de oxidação, enquanto no cátodo ocorre a redução. A Figura 4.12 representa de forma genérica uma célula eletrolítica.

Figura 4.12 | Representação de uma célula eletrolítica



Fonte: elaborada pela autora.

Conforme podemos notar na Figura 4.12, para que o processo ocorra, é necessário que os cátions e ânions presentes no material tenham mobilidade para migrar para o cátodo e ânodo, respectivamente. Todavia, para que isso seja possível, é preciso que o material esteja em solução ou fundido. Um dos grandes problemas empregados na eletrólise da bauxita é que o processo não pode ser feito em meio aquoso, pois a água apresenta potencial de redução maior do que o potencial de redução de alumínio, ou seja, na presença de água, quem reduz é a própria água e não o alumínio. O grande inconveniente de não se fazer o processo em meio aquoso é o gasto energético envolvido, pois é necessário trabalhar com a substância fundida, porém, o ponto de fusão do Al_2O_3 é acima de $2000^\circ C$, o que torna sua fusão pouco viável.

Um dos grandes avanços envolvido na produção do Al foi desenvolvido pelo americano Charles M. Hall e pelo francês Hall-Hérault, ficando conhecido por Processo Hall-Hérault. Nesse processo, eles utilizam o mineral criolita (Na_3AlF_6) como fundente.

A adição da criolita foi capaz de reduzir a temperatura de fusão do Al_2O_3 para $1000^\circ C$.

A produção do Al metálico é feita em uma cuba eletrolítica. Uma mistura de Al_2O_3 e criolita é adicionada a esta cuba, que é feita de aço revestido com carbono. Por essa mistura fundida passa uma corrente elétrica. As reações envolvidas estão ilustradas a seguir:



As paredes do recipiente que ficam em contato com a mistura funcionam como os polos positivo (ânodo) e negativo (cátodo), ocorrendo a redução dos cátions de Al (semi reação catódica) e a oxidação dos íons O^{2-} para O_2 (semi reação anódica), entretanto, devido à presença do carbono no eletrodo, todo O_2 é convertido para CO_2 .



Pesquise mais

Conforme podemos ver, um dos principais problemas envolvidos no processo de produção de Al é o elevado custo envolvido na eletrólise da bauxita, sendo necessário o fornecimento de energia elétrica e também energia térmica para a fusão do Al_2O_3 . Assim, uma alternativa para a redução dos gastos energéticos é o processo de reciclagem do Al. O vídeo a seguir mostra como esse processo é feito e quais são suas vantagens:

O processo de reciclagem das latas de alumínio. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=9EgJLNAIrV4>. Acesso em: 26 dez. 2017.

Caro aluno, estamos finalizando nosso estudo sobre Mineralogia e Cristalografia. Durante o desenvolvimento das unidades e seções, você pode aprender sobre os conceitos básicos de cristalografia, de modo a compreender como a estrutura e o arranjo espacial das espécies atômicas e/ou moleculares podem influenciar nas propriedades dos minerais. Além disso, aprendeu sobre as principais estruturas e sistemas cristalinos e sobre as propriedades dos minerais iônicos e metálicos. Também estudamos sobre a origem,

classificação e caracterização dos minerais e sobre os tipos de rochas, envolvendo os aspectos gerais e os processos de formação. Nesta última seção, abordamos os recursos minerais existentes em nosso país, assim como seu processo de extração e também seu processamento industrial. Você deve ter notado como os recursos minerais são importantes para o desenvolvimento tecnológico, logo, é importante conhecer suas propriedades e caracterizá-los de modo a melhor utilizá-los de forma direta ou de modo a processá-los industrialmente. Destacamos o processamento de alguns recursos minerais como hematita, bauxita e calcário, na produção de aço, alumínio metálico e cimento, respectivamente. Mas será que apenas estes recursos minerais são importantes? Seguramente, não. Existem muitos outros recursos e também uma infinidade de aplicações. Agora que você aprendeu um pouco sobre Mineralogia e Cristalografia tente refletir a importância dos conceitos trabalhados ao longo deste material e relacione esses conceitos com aspectos tecnológicos envolvidos na indústria de processos químicos.

Bons estudos!

Sem medo de errar

Vamos retomar à situação-problema proposta no item *Diálogo Aberto*? Você deve se lembrar da situação hipotética na qual você trabalha em uma indústria multinacional que deseja implementar uma planta no Brasil para produção de aço. A você foram designadas algumas tarefas. Sua primeira tarefa envolvia o levantamento das principais reservas de hematita e carvão vegetal no Brasil, de modo a verificar se seria necessário a importação destas matérias-primas. Sua segunda tarefa foi verificar a quantidade de hematita necessária para a produção diária de aço especificada pela empresa, de modo a auxiliar no dimensionamento da planta. Nesta terceira etapa, foi proposto a você verificar se há algum impacto ambiental envolvido no processo de produção do aço e também propor maneiras de minimizar esse impacto. Ao analisar a reação envolvida na produção do aço, por meio da redução com CO, você verificou que ocorre a emissão de grande quantidade de CO_2 .



Você sabe que apesar deste gás não ser tóxico, a sua emissão

antrópica está relacionada à intensificação do Efeito Estufa e, conseqüentemente, pode contribuir para o aquecimento extra do planeta. Dessa forma, o processo em questão poderá causar danos ambientais, logo, você deve estudar uma possibilidade de minimizar esses impactos e propor à empresa que seja implementada uma estação de captura de CO_2 na saída do alto-forno. A captura deste gás poderá ser feita utilizando soluções aquosas de etanolaminas. Isso auxiliará a minimizar os impactos ambientais decorrentes do processo.

Agora você deve entregar um relatório mensurando esses impactos, assim como as alternativas propostas para minimizá-los, além destas informações, você também deve apresentar uma relação da localização e produtividade das principais reservas de minério de ferro e de carvão existente no Brasil, assim como a estimativa da quantidade de hematita que a empresa irá necessitar para produzir 500 kg de aço diariamente com 98% de ferro em massa. As informações irão auxiliar a empresa a dimensionar a nova planta industrial para produção de minério de aço.

Avançando na prática

Reciclagem do Alumínio

Descrição da situação-problema

Vamos considerar que você trabalha no setor de embalagens de uma indústria de sucos. Os sucos são produzidos e embalados em latas de alumínio. A empresa compra o Al destinado à produção das latas de outra empresa especialista na produção de alumínio metálico a partir da eletrólise da bauxita. Um dos grandes problemas que a empresa na qual você trabalha apresenta é o elevado custo envolvido na compra do Al para produzir as embalagens. Devido a isso, foi destinado a você, profissional responsável, a realização de um estudo de minimização dos custos envolvidos na produção, de modo a não ser necessário aumentar o custo do produto acabado. Como minimizar os gastos envolvidos na compra do alumínio? Seria possível reaproveitar as latas?

Resolução da situação-problema

Você sabe que a empresa que você trabalha apresenta um gasto elevado nas embalagens porque ela compra o Al de uma outra empresa que o produz diretamente da bauxita. Nesse processo há um gasto energético elevado devido à energia elétrica envolvida na eletrólise da bauxita e também à energia envolvida no processo de fusão da mesma, que ocorre a 1000° C. Para minimizar os custos você deve propor que a empresa onde você trabalha coloque pontos de coletas para recuperar as embalagens de alumínio dos sucos produzidos por elas e, a partir do material coletado, será possível a reciclagem das latinhas, o que reduzirá muito o custo envolvido na compra direta do Al.

Faça valer a pena

1. O aço é uma liga metálica formada por ferro e carbono. O ferro puro não apresenta propriedades interessantes por ser reativo e dúctil, assim, a presença de carbono na estrutura do material melhora as propriedades do ferro.

Considerando o texto acima, analise a frase abaixo:

Durante a produção do aço em alto-forno são utilizadas matérias-primas, como _____ e _____.

A combustão do _____ fornece energia para o processo de redução da hematita que é um processo _____.

Assinale a alternativa que completa corretamente a frase acima.

- a) hematita, carvão, calcário, carvão, endotérmico.
- b) hematita, carvão, calcário, calcário, endotérmico.
- c) bauxita, carvão, calcário, carvão, endotérmico.
- d) hematita, carvão, calcário, carvão, exotérmico.
- e) bauxita, carvão, calcário, carvão, exotérmico

2. As rochas calcárias apresentam $CaCO_3$ como componente principal e têm como uma de suas principais aplicações a produção de óxido de cálcio (CaO), muito utilizado na indústria do cimento.

Com base no texto anterior, foram feitas algumas afirmações:

- I. A produção de cimento pode trazer impactos ao meio ambiente.
- II. Durante a decomposição do calcário são emitidas grandes quantidades de CO_2 .
- III. Utiliza-se carvão coque na produção do cimento.

Analisando as frases acima, assinale a alternativa que apresenta as afirmações corretas.

- a) I, II e III.
- b) I e II apenas.
- c) I e III apenas.
- d) III apenas.
- e) I apenas.

3. “A bauxita é a principal fonte natural de alumínio (terceiro elemento mais abundante na natureza), e a maior parte de sua extração mundial é destinada à obtenção desse elemento”.

Fonte: CARDOSO, M. **Bauxita**. Disponível em: <<https://www.infoescola.com/rochas-e-minerais/bauxita/>> . Acesso em: 26 dez. 2017.

Considerando o texto acima, analise as afirmações a seguir:

- I. A produção do alumínio metálico é feita por meio da redução da bauxita em alto forno.
- II. Um dos grandes problemas envolvidos na produção do alumínio é o elevado consumo energético.
- III. A criolita é um mineral utilizado como fundente no processo de produção do alumínio.

Assinale a alternativa que apresenta apenas as afirmações corretas.

- a) I, II e III.
- b) I e II apenas.
- c) I e III apenas.
- d) II e III apenas.
- e) II apenas.

Referências

ACADEMIA BRASILEIRA DE CIÊNCIAS. **Recursos Minerais no Brasil**: problemas e desafios. Disponível em: <<http://www.abc.org.br/IMG/pdf/doc-7006.pdf>>. Acesso em: 10 dez. 2017.

ÁVILA, S.G.; LOGLI, M.A.; MATOS, J.R. Kinetic study of the thermal decomposition of monoethanolamine (MEA), diethanolamine (DEA), triethanolamine (TEA) and methyldiethanolamine (MDEA). **International Journal of Greenhouse Gas Control**, v. 42, 666-671p, 2015.

BIONDI, J.C. **Processos Metalogênicos e os Depósitos Minerais Brasileiros**. 2 ed., São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

GOUTO, M.; ROSA, G. **Química Industrial**. Porto Alegre: Bookman, 2013, 283p.

NEVES, M.R. **Principais Provinciais de Mineração no Brasil**. Economia e política mineral I. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

SANTANA, A. L. Manganês. **Publicações do Departamento Nacional de Produção Mineral**. Disponível em: <<http://www.dnrm.gov.br/dnrm/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/outras-publicacoes-1/3-2-manganes>>. Acesso em: dez. 2017.

SANTI, A. M. M.; SEVÁ FILHO, A. O. **Combustíveis e riscos ambientais na fabricação de cimento**: casos na Região do Calcário ao Norte de Belo Horizonte e possíveis generalizações. In: Encontro da ANPPAS - Associação Nacional de Pós-Graduação e Pesquisa em Ambiente e Sociedade, 2., 2004, Piracicaba. Encontro da ANPPAS, 2004. p.1-18. Disponível em: <http://www.ifch.unicamp.br/profseva/anppas04_SantiSeva_cimento_RMBH.pdf>. Acesso em: 19 dez. 2017.

SHREVE, R. N.; BRINK JR., J. A. **Indústrias de Processos Químicos**. 4ª ed., Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2012, 717p. .

ISBN 978-85-522-0742-9



9 788552 207429 >