

Coleção Química no Cotidiano

Ano Internacional da Tabela Periódica dos Elementos Químicos
Volume 11

Aldo J.G. Zarbin

Carbono

Coleção Química no Cotidiano

Volume 11

Carbono

Aldo J.G. Zarbin



Sociedade Brasileira de Química



United Nations
Educational, Scientific and
Cultural Organization



2019
IYPT
International Year
of the Periodic Table
of Chemical Elements

1ª edição

São Paulo | Sociedade Brasileira de Química | 2019

© Sociedade Brasileira de Química

Coleção Química no Cotidiano

Ano Internacional da Tabela Periódica dos Elementos Químicos (IYPT2019)

Volume 11

Coordenadoras do projeto

Claudia Moraes de Rezende e Rossimiriam Pereira de Freitas

Editora-chefe

Claudia Moraes de Rezende

Revisores

Claudia Moraes de Rezende e Rossimiriam Pereira de Freitas

Arte gráfica e editoração

Cabeça de Papel Projetos e Design LTDA (www.cabecadepapel.com)

Ficha Catalográfica
Wanda Coelho e Silva (CRB/7 46)
Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Z53q Zarbin, Aldo J.G.

Carbono / Aldo J.G. Zarbin – São Paulo: Sociedade Brasileira de Química, 2019.
p.39. - (Coleção Química no Cotidiano, v. 11)

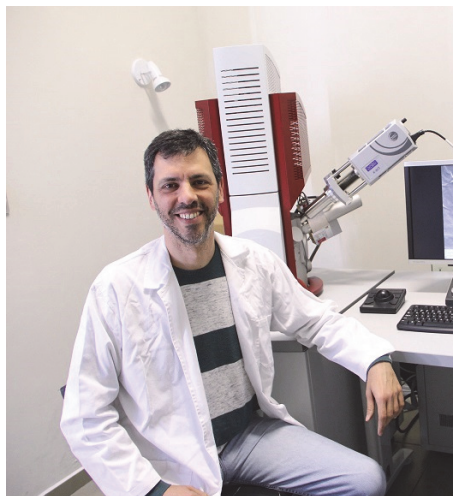
ISBN 978-85-64099-26-5

1. Química - Carbono. 2. Elementos Químicos. I. Zarbin, Aldo J.G.. II. Título. III. Série.

CDD 547.7
CDU 547.9

Todos os direitos reservados – É proibida a reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por outro meio. A violação dos direitos de autor (Lei nº 5.988/73) é crime estabelecido pelo artigo 184 do Código Penal.

Sobre o autor



Professor Titular do Departamento de Química da Universidade Federal do Paraná (início em março/1998), onde é líder do Grupo de Química de Materiais (GQM) daquela instituição. Foi duas vezes coordenador do Programa de Pós-Graduação em Química da UFPR e Presidente (2016-2018) da Sociedade Brasileira de Química. É Fellow da Royal Society of Chemistry (RSC) e foi editor Associado do periódico Química Nova de setembro/2008 a abril/2016, e editor do Boletim Eletrônico da SBQ no biênio 2012-2014. Desde 2016 é membro do Advisory Board do periódico Materials Horizons, da RSC. Orientador da tese vencedora do Prêmio CAPES de tese na área de Química em 2015, e da tese agraciada com menção honrosa na área de Química no Prêmio CAPES de tese de 2014. Membro de vários comitês temáticos de assessoramento em nanotecnologia do CNPq e da FINEP. Reconhecimento Mérito

Acadêmico da UFPR em 2011, 2015 e 2016, e eleito personalidade do ano na área de Ciência e Pesquisa pelo Diário Comércio e Indústria do Paraná (2017-2018). Suas principais linhas de pesquisa estão relacionadas à síntese e caracterização de materiais em escala nanométrica (como nanotubos, grafeno e outras formas de carbono, nanocompósitos, nanopartículas metálicas, vidros porosos, polímeros condutores e óxidos de metais de transição) em interfaces líquido/líquido, e estudo da aplicação destes nanomateriais em sensores, dispositivos fotovoltaicos, baterias, capacitores e catalisadores.

Prefácio

O ano de 2019 foi proclamado pela UNESCO como o Ano Internacional da Tabela Periódica (AITP), em homenagem aos 150 anos da sua primeira descrição, pelo químico russo Dmitri Mendeleev. Para celebrar essa que é uma das maiores conquistas da história da ciência, diversas atividades vêm sendo realizadas e programadas por sociedades científicas ao redor do mundo. A Sociedade Brasileira de Química (SBQ) tem um papel importante nesse processo, sendo a responsável pelas principais ações relacionadas ao AITP no Brasil. Dentre elas, o lançamento de livros sobre alguns elementos químicos, voltados para professores e estudantes do ensino médio, dentro da qual esse livro específico se enquadra.

Ter recebido o convite da Sociedade a qual sou sócio desde 1991 (e que tive a honra de presidir no biênio 2016-2018), para escrever um livro sobre o elemento químico que dedico a maior parte da minha pesquisa científica, foi uma grande distinção que aceitei na forma de mais um desafio, ciente do tamanho da responsabilidade que essa empreitada significava. O resultado encontra-se agora nas mãos (ou na tela) de quem está lendo esse prefácio.

O assunto não me poderia ser mais familiar. Meu grupo de pesquisa na UFPR foi um dos pioneiros na síntese de nanotubos de carbono no Brasil, através de um método de deposição química por vapor, no início dos anos 2000, e alguns anos depois um dos primeiros a preparar grafeno *via* oxidação do grafite. Desde então a quase totalidade do trabalho científico a que me dedico envolve a preparação e o estudo da aplicação de diferentes alótropos de carbono e materiais derivados, incluindo o desenvolvimento de uma nova forma de preparar grafeno a partir de moléculas simples, publicado inicialmente em 2015 e refinado em 2018. O fascínio e o envolvimento com o tema, entretanto, tornou o desafio de escrever esse livro ainda maior, na busca do enfoque que pudesse ser o mais interessante possível para o público-alvo, e da linguagem adequada que garantisse uma leitura agradável, sem o comprometimento do conteúdo científico. Com essa preocupação em mente, o livro foi organizado de modo a retratar o elemento químico carbono através dos aspectos mais relevantes que impactam diretamente nosso cotidiano.

Dividido em 8 tópicos, o livro faz uma viagem pela história do carbono, abordando sua gênese, seus usos, as razões pelas quais exerce tanto fascínio e é um elemento tão poderoso (a ponto da vida decidir escolhê-lo para lhe dar sustentação), as diferentes substâncias formadas somente por carbono, a riqueza da sua química, sua ocorrência, suas transformações, suas relações com o meio-ambiente, sua relação com as artes. A ideia foi de organizar uma viagem sobre os diferentes assuntos diretamente relacionados ao carbono, na

tentativa de aguçar a curiosidade e estimular o interesse por esse elemento tão versátil, o grande responsável por estarmos aqui. Roteirizar essa viagem foi um processo extremamente prazeroso e muito produtivo, que trouxe como efeito colateral um estímulo pessoal avassalador para investir esforços em outras ações como essa, que foquem na divulgação científica, na desmistificação da ciência e na necessidade premente da aproximação da ciência com as novas gerações.

Espero que a leitura desse livro seja tão divertida como foi o processo de escrevê-lo.

Aldo J.G. Zarkin

Curitiba, 2019

às minhas meninas
Sofia, Elisa e Leyle,
Dedico

Índice

Prefácio.....	3
Índice.....	10
1- Carbono: o mais versátil dos elementos	11
2- Configuração eletrônica e ligações químicas	14
3- Alótropos: as diferentes substâncias constituídas somente por átomos de carbono. Definições, estruturas e aplicações	20
3.1) As nanoestruturas de carbono: nanotubos e grafeno	29
4- O elemento da vida	35
5- A idade das coisas	38
6- Carbono inorgânico	42
7- O ciclo do carbono.....	44
8- Um vilão para o meio ambiente?	47
9- Para finalizar	50
Referências Bibliográficas	51

1- Carbono: o mais versátil dos elementos

Considerado um dos elementos mais intrigantes e fascinantes que se conhece, o carbono quase sempre é apresentado em livros-texto ou em revisões sobre o tema como “o elemento da vida”. De fato, a quase totalidade do fascínio que o primeiro elemento do grupo 14 (antigo grupo 4A) da tabela periódica exerce sobre as pessoas está corriqueiramente associada ao fato de que a vida, na forma pela qual a conhecemos, é totalmente dependente da sua ocorrência, e da variedade e diversidade de compostos químicos capazes de serem formados a partir do carbono. Mas como se não fosse suficiente, o carbono está distante de ser “só isso”. Graças ao carbono, podemos contemplar a pedra preciosa mais emblemática (diamante); a molécula mais elegante de toda a natureza (fulereno); as estruturas que são as mais representativas da crescente e abrangente área da nanociência e nanotecnologia (nanotubos de carbono e grafeno) e um material natural com ampla aplicação tanto no cotidiano quanto em dispositivos de alta tecnologia (grafite). O carbono também nos propicia o churrasco dos finais de semana (carvão vegetal), e muito mais. E tudo isso devido às suas características singulares, que lhe permite várias configurações para realizar diferentes ligações químicas consigo próprio (resultando em tão diferentes substâncias

elementares formadas somente por carbono, como as citadas anteriormente) ou com outros elementos, originando um número infinito de possibilidades de preparação de novas moléculas.

Diferente do que se poderia imaginar, a abundância do carbono na terra é relativamente baixa, correspondendo somente a 0,025% dos elementos existentes na crosta terrestre (nesse quesito, temos o oxigênio em primeiro lugar com aproximadamente 50%, seguido de 26% de silício, 8% de alumínio, 5% de ferro, 4% de cálcio, 3% de sódio. O carbono ocupa a 19ª. posição) (<https://www.britannica.com/science/carbon-chemical-element>). Apesar disso, o carbono sozinho é responsável por um número maior de compostos e moléculas conhecidas do que todos os outros elementos juntos. Se levarmos em consideração todo o universo, o carbono é o sexto elemento mais abundante, ficando atrás do hidrogênio, hélio, oxigênio, neônio e nitrogênio, nessa ordem (<https://www.britannica.com/science/carbon-chemical-element>).

O nome carbono é originário da palavra grega *carbo*, que significa carvão. De fato, na forma de carvão, o carbono é um dos elementos mais antigos conhecidos, com registros de sua utilização pelo homem no período da pré-história, embora sua identificação como elemento químico seja muito mais tardia. Há evidências que os chineses utilizavam o diamante em aproximadamente 2500 anos a.C, mas foi o químico francês Antoine Lavoisier o primeiro a descrever que o diamante era uma forma elementar de carbono.

Da mesma forma, detectou-se que no quarto milênio a.C. algumas civilizações no sudeste da Europa usavam grafite como pigmento para decoração de peças cerâmicas, enquanto que sua identificação como outra forma elementar do carbono fosse descrita somente em 1779, pelo químico sueco/alemão Carl Wilhelm Scheele. Em 1779, em seu livro icônico “Tratado Elementar da Química” (cuja publicação é considerada por muitos historiadores da ciência como o marco do nascimento da química moderna), Lavoisier lista o carbono pela primeira vez como um elemento químico.

2- Configuração eletrônica e ligações químicas

O Carbono é o primeiro elemento do grupo 14 da tabela periódica, com número atômico 6 ($Z = 6$) e massa molar de $12,011 \text{ g.mol}^{-1}$. Ocorre naturalmente na forma de dois isótopos estáveis, o carbono-12 (6 prótons, 6 nêutrons, 6 elétrons, abundância natural de 98,93%) e o carbono-13 (6 prótons, 7 nêutrons, 6 elétrons, abundância natural de 1,07%), e possui ainda isótopos instáveis e radioativos, como o carbono-14 (6 prótons, 8 nêutrons, 6 elétrons, abundância natural menor de 0,00001%).

Para que possamos entender com clareza as razões do Carbono conseguir fazer tantas combinações e originar tão grande número de moléculas diferentes, é necessário um olhar rápido através das teorias de ligação química, principalmente a Teoria de Ligação de Valência (TLV), que é uma das duas grandes abordagens para explicar ligações entre átomos levando-se em conta os postulados da mecânica quântica, desenvolvida por Linus Pauling. Um dos postulados da TLV é que uma ligação química entre dois átomos ocorre a partir da sobreposição de orbitais existentes em cada um desses átomos, com os elétrons desses orbitais sendo agora compartilhados e atraídos pelos dois núcleos, formando uma ligação covalente. Outro postulado é que para realizar

essas ligações, os orbitais individuais de cada átomo podem se combinar em diferentes proporções, para formar novos orbitais, chamados de orbitais híbridos, onde os elétrons estarão localizados. Em outras palavras, uma ligação química pode ocorrer pela sobreposição de um orbital “puro”, ou a partir de orbitais resultantes da associação prévia de dois ou mais orbitais puros, agora chamados de orbitais híbridos. De acordo com o tipo e com o número de orbitais puros que previamente se combinam para formar o orbital híbrido, esse terá uma característica e uma orientação espacial diferente. É importante ressaltar que o número total de orbitais sempre será o mesmo, ou seja, se tivermos a combinação de dois orbitais puros, obrigatoriamente resultará em dois novos orbitais híbridos. A combinação inicial de três orbitais puros resultará em três novos orbitais híbridos, e assim sucessivamente. O processo através do qual os orbitais atômicos se combinam para originar orbitais híbridos recebe o nome de hibridização.

A configuração eletrônica original do Carbono é $1s^2 2s^2 2p^2$, correspondendo a quatro elétrons de valência (dois no orbital 2s e outros dois em dois orbitais 2p), e quatro orbitais de valência (um orbital 2s e três orbitais 2p). Tal configuração permite que três diferentes tipos de hibridizações possam ser realizadas:

1) os quatro orbitais de valência se combinam, originando quatro novos orbitais híbridos todos exatamente com a mesma energia. Esse processo é conhecido como hibridização tipo sp^3 (uma vez que é baseado na

combinação de um orbital s e três orbitais p), e cada um dos quatro orbitais híbridos resultantes recebe o nome de orbital híbrido sp^3 . Nesse caso, cada um dos quatro elétrons de valência do Carbono será distribuído em um dos quatro orbitais sp^3 , que estão distribuídos no espaço orientados em um tetraedro regular, e cada orbital será responsável por uma ligação química, resultando em quatro ligações permitidas para o carbono, como ilustrado na **Figura 1a** e **Figura 2a**;

2) hibridização do tipo sp^2 , onde um orbital s e dois orbitais p se combinam, originando três orbitais híbridos do tipo sp^2 , exatamente com a mesma energia, e dispostos no plano separados entre si por um ângulo de 120° . Nesse caso, um orbital p do carbono não participou da hibridização, e continua na sua forma natural, conhecido como orbital “p puro”, localizado perpendicularmente ao plano formado pelos orbitais híbridos (**Figura 1b**). Nessa configuração, cada um dos três orbitais híbridos fica com um elétron de valência do carbono, sendo que o quarto elétron pertence ao orbital p puro. A presença dos orbitais p puros ocupados por elétrons e perpendiculares ao plano formado pelos orbitais híbridos permite que esses se sobreponham a orbitais de outro átomo em aproximação paralela, originando um tipo de interação diferenciada, conhecida como ligação do tipo π (e diferente da sobreposição frontal dos orbitais híbridos, que ocorre no mesmo eixo dos núcleos atômicos, cuja ligação é conhecida como ligação σ). Uma ligação π só ocorre em conjunto com uma ligação σ , resultando em duas ligações entre os

mesmos átomos (ou seja, quatro pares de elétrons compartilhados entre os dois núcleos), o que é conhecido em química como uma ligação dupla;

3) hibridização envolvendo a combinação de um orbital s e um único orbital p, resultando em dois orbitais híbridos do tipo sp separados por um ângulo de 180° (**Figura 1c**). Esse processo resulta em dois orbitais p puros, perpendiculares entre si e perpendiculares ao plano dos orbitais híbridos sp, e cada um dos quatro orbitais (dois híbridos sp e dois p puros) receberão um elétron. A presença de dois orbitais p puros possibilita a formação de duas ligações duplas, ou de uma ligação tripla, onde entre dois átomos ocorre uma ligação σ e duas ligações π (**Figura 2c**).

A **Figura 1** mostra uma representação esquemática das três hibridizações permitidas para o átomo de carbono, e a **Figura 2** mostra quais os tipos de ligação química possíveis de serem formadas a partir de cada uma delas, e nos dá uma clareza do grande número de combinações de ligações possíveis de serem realizadas por um único átomo de carbono: quatro ligações σ simples com quatro átomos diferentes; uma ligação dupla com um átomo e duas ligações simples com outros dois átomos; duas ligações duplas com dois átomos; uma ligação tripla com um átomo e uma ligação simples com outro. Essa variedade de possibilidades, somado ao fato que o carbono pode se ligar a si próprio criando cadeias ou conglomerados de átomos ligados, faz com que a possibilidade de combinações seja quase infinita, assim como o número de moléculas baseadas em carbono.

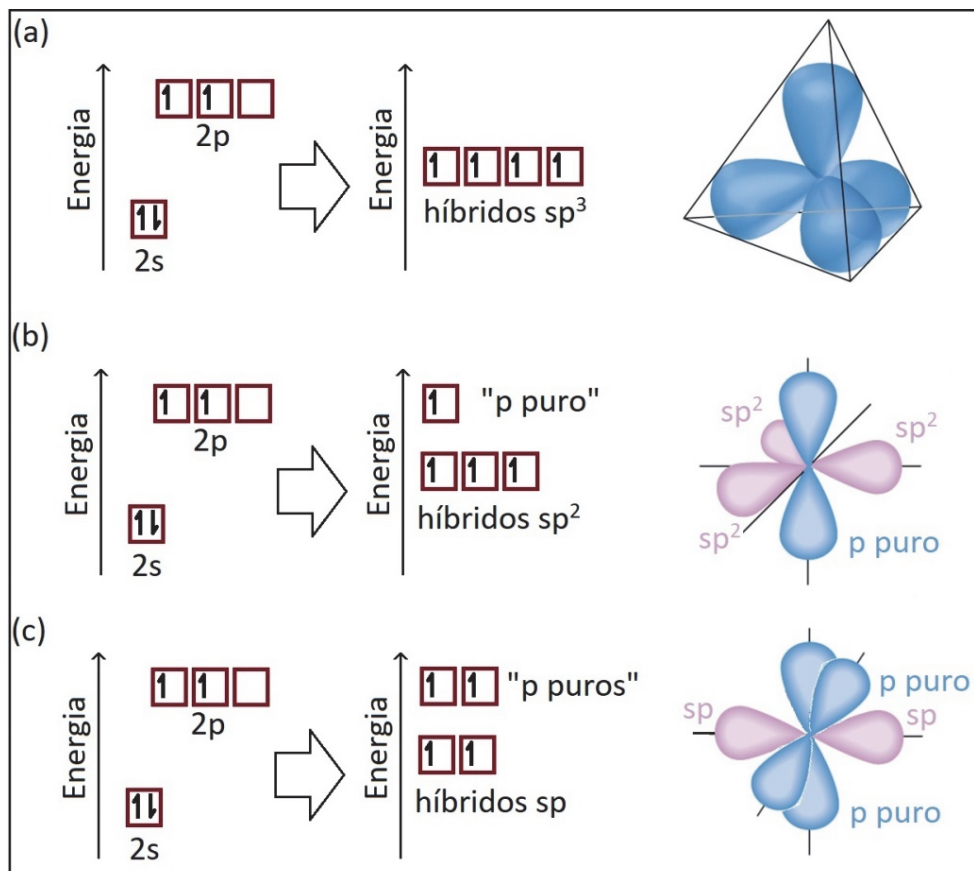


Figura 1: Representações dos tipos possíveis de hibridização do carbono e dos orbitais resultantes: a) hibridização sp^3 ; b) hibridização sp^2 ; c) hibridização sp .

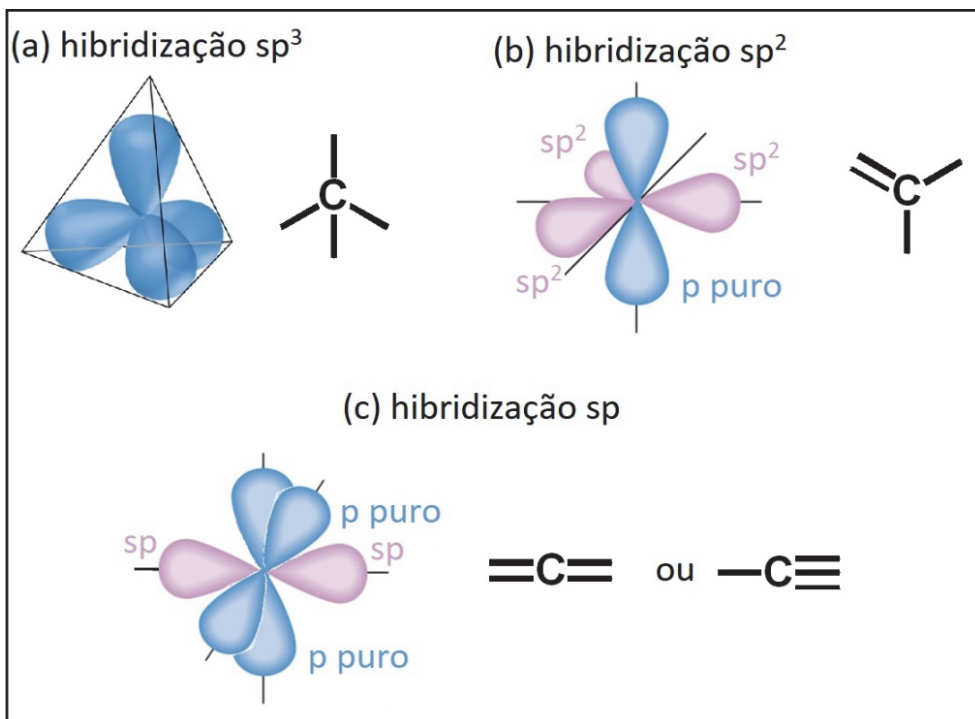


Figura 2: Ligações químicas possíveis para cada tipo de hibridização do carbono

3- Alótropos: as diferentes substâncias constituídas somente por átomos de carbono. Definições, estruturas e aplicações

À primeira vista parece difícil acreditar que o diamante e o grafite (esse mesmo, que usamos para escrever no lápis) possuem exatamente a mesma composição química, carbono. Uma substância formada somente por um elemento químico é chamada de substância elementar, e quando o mesmo elemento químico dá origem a mais de uma substância elementar, essas são conhecidas como alótropos. O diamante e o grafite são dois alótropos do carbono, mas não os únicos, como pode ser observado na **Figura 3** [2].

A diferença entre os alótropos do carbono se dá pelo tipo de hibridização e de ligação química, pela forma como os átomos se organizam e pelas dimensões de cada estrutura. Na **Figura 3a** temos uma representação esquemática da estrutura do grafite, onde cada “bolinha” representa um átomo de carbono. O grafite é formado por átomos de carbono com hibridização sp^2 , cada um deles ligado a outros três átomos de carbono também com hibridização sp^2 , originando uma rede planar de átomos de carbono ligados entre si formando hexágonos, como se fosse uma colmeia. Como todos os átomos têm

hibridização sp^2 , todos eles também possuem um orbital p puro perpendicular ao plano da colmeia, que fazem ligações do tipo π com átomos de carbono vizinhos, originando então uma densidade muito grande de elétrons acima e abaixo do plano da colmeia, conhecido como uma nuvem π de elétrons. Uma folha desse tipo possui a espessura de um único átomo de carbono, e é conhecida como “grafeno”, cujos detalhes serão discutidos adiante. O grafite é formado pelo empilhamento de inúmeras folhas de grafeno, em uma estrutura conhecida como estrutura lamelar. Imagine a estrutura do grafite como um pão de forma, ou como cartas de baralho, com várias fatias (ou várias cartas) empilhadas umas sobre as outras. No caso do grafite, cada “fatia” (ou carta de baralho) representa uma folha de grafeno, que é atraída uma em relação às outras por forças químicas mais fracas que as ligações formais, conhecidas como forças de van der Waals. No grafite, as folhas de grafeno estão separadas por uma distância fixa de 0,335 nm (1 nm = 1 nanômetro, que corresponde a um bilionésimo do metro, ou 10^{-9} m). O grafite, portanto, é um material que possui ligações químicas muito fortes no plano (as ligações entre os átomos de carbono que formam o hexágono, ou seja, as ligações σ formadas pela sobreposição dos orbitais sp^2 de cada átomo), e ligações fracas perpendiculares ao plano. A “maciez” do grafite, que faz com que ele possa ser usado para escrever, ou como lubrificante sólido, se deve exatamente ao deslizamento de uma folha de grafeno sobre a outra por fricção. Quando usamos um lápis para escrever sobre uma folha de papel, o pedaço de grafite que sai do lápis e fica

aderido no papel é um pedaço que foi rompido pelo deslizamento das folhas de grafeno, causado pela fricção do lápis sobre o papel.

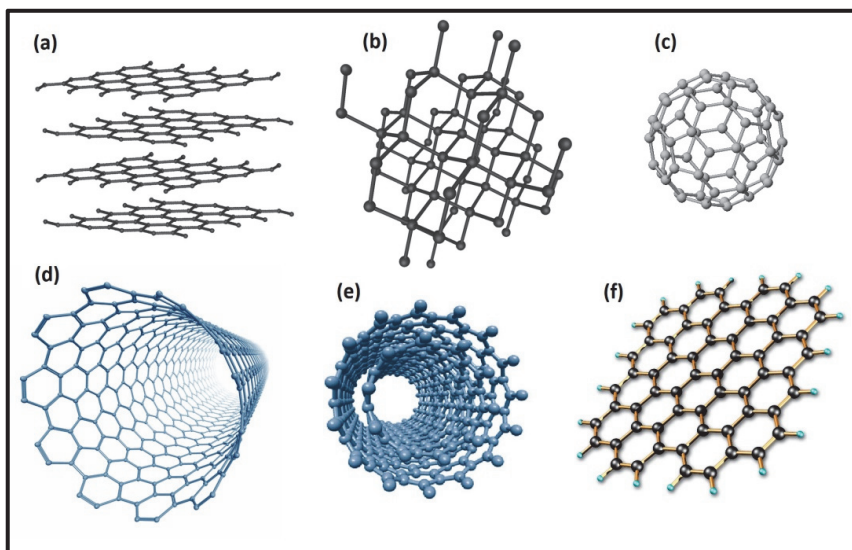


Figura 3: Representação esquemática das diferentes estruturas alotrópicas do carbono: a) grafite; b) diamante; c) fulereno; d) nanotubo de carbono de parede simples; e) nanotubo de carbono de parede múltipla; f) grafeno. Reproduzido com permissão da Sociedade Brasileira de Química (ZARBIN E OLIVEIRA, 2013).

O grafite pode ser natural ou sintético, sendo que o Brasil possui a segunda maior reserva de grafite natural no mundo, com cerca de 70 bilhões de quilogramas, superada somente pela Turquia com cerca de 90 bilhões de quilogramas. Em seguida vem China (55 bilhões), Moçambique e Tanzânia (17 bilhões cada), Índia (7 bilhões) e México (3,1 bilhões)

(<https://www.statista.com/statistics/267367/reserves-of-graphite-by-country/>).

Dentre as propriedades do grafite, destacam-se os altos valores de condutividade térmica e elétrica, alto ponto de fusão, flexibilidade, resistência química e resistência a raios X, o que lhe confere aplicações que vão muito além do lápis de escrever: em materiais refratários; como reforço em cerâmicas e polímeros (originando as fibras de carbono, por exemplo); como eletrodo de baterias, supercapacitores e células a combustível; como componentes em materiais de fricção; como lubrificante sólido; em pastilhas e lonas de freios; e muito mais, correspondendo a um material de alta tecnologia.

O diamante é o segundo alótropo mais conhecido do carbono, e a estrutura esquemática está representada na **Figura 3b**. Diferentemente do grafite, o diamante é formado por átomos de carbono com hibridização sp^3 , o que significa que cada átomo de carbono está ligado a quatro outros átomos de carbono por ligações covalentes do tipo σ resultante da sobreposição dos orbitais sp^3 . Para cada átomo de carbono, os quatro orbitais híbridos sp^3 estão distribuídos espacialmente na direção dos vértices de um tetraedro regular, e as ligações entre os átomos de carbono com essa característica originam uma estrutura rígida, um sólido covalente formado por uma grande extensão de ligações C-C do tipo sp^3-sp^3 . Essa estrutura contínua e organizada confere as propriedades conhecidas do diamante, como alta dureza e rigidez (trata-se do material natural mais duro que se conhece), altos pontos de fusão, transparência, condutividade térmica e isolante elétrico. Os diamantes foram

forjados pela natureza em ambientes de altas pressões, a 150-200 Km abaixo da crosta terrestre, e são estimados terem sido formados há aproximadamente 3 bilhões de anos. Essas características fazem do diamante uma pedra preciosa rara, sendo seu uso como joia ornamental o mais difundido e valioso. Os países que são os maiores produtores mundiais de diamante são a Rússia (23 milhões de quilates em 2017), Botsuana (14 milhões), Canadá (13 milhões), Angola (8,1 milhões) e África do Sul (6,7 milhões), sendo que o Brasil esteve na 13ª. posição em 2017 com 180 mil quilates (Mineral Commodity Summaries, 2018). As propriedades singulares do diamante, entretanto, lhe possibilitam várias outras aplicações, principalmente em ferramentas de corte de alta precisão, tirando vantagem de sua elevada dureza. Para tal, cientistas conseguem produzir diamantes em laboratório, os chamados diamantes sintéticos, que podem ser preparados submetendo o grafite a altas temperaturas e pressões, ou a partir de um processo conhecido como “deposição química por vapor” (CVD, do inglês *Chemical Vapour Deposition*), onde em um forno a altas temperaturas e atmosfera controlada, alguns compostos moleculares se decompõe originando o diamante. Embora possua exatamente a mesma estrutura e as mesmas propriedades do diamante natural, o preço do diamante sintético é de 20 a 40% menor, pois o trabalho da natureza de 3 bilhões de anos não consegue ser reproduzido em laboratório com toda a sua beleza e perfeição, características desejáveis para um diamante ser utilizado em um anel, brinco ou colar, por exemplo.

Do ponto de vista estrutural, tanto o grafite como o diamante possuem, além das características já mencionadas, uma alta organização dos átomos, uns em relação aos outros. Os átomos de carbono ocupam uma posição muito bem definida, e estão organizados em um padrão que se repete periodicamente por toda a estrutura do sólido, ou seja, se pegarmos um pedaço dessa estrutura, veremos que ela vai se repetir. Portanto, conhecendo um “pedacinho” da estrutura, é suficiente para conhecer o sólido inteiro, imaginando a repetição periódica desse “pedacinho”. Essa organização estrutural a longa distância é uma característica dos sólidos conhecidos como sólidos cristalinos. Portanto, tanto o grafite como o diamante são alótropos cristalinos do carbono. Entre essas duas estruturas organizadas existem inúmeras outras estruturas “desorganizadas”, ou seja, cuja posição dos átomos não é regular e não há repetição de padrões. Isso é uma característica de sólidos não-cristalinos, ou sólidos amorfos. Há várias estruturas de carbono elementar com essa característica, genericamente conhecidas como carbono amorfo. Além da falta de organização a longa distância, essas substâncias possuem os átomos de carbono hibridizados preferencialmente na forma de sp^2 , contendo também uma fração sp^3 (uma parcela de átomos com hibridização sp também pode ser encontrada). Uma das formas de caracterizar esses carbonos amorfos é exatamente em se definir a razão entre átomos com hibridização sp^2 e sp^3 (razão sp^2/sp^3). Uma outra característica é a presença em pequena proporção de alguns

heteroátomos, ou seja, átomos de elementos químicos diferentes do carbono, principalmente hidrogênio e oxigênio. Além disso, a falta de organização estrutural, a presença de ligações químicas com heteroátomos e as formas sintéticas de obtenção desses materiais possibilitam estruturas altamente porosas, com impacto direto no tipo de aplicação. Vários materiais bastante conhecidos são classificados dentro do termo amplo de carbono amorfo, como o carvão, a fuligem, o negro-de-fumo, o carbono vítreo, dentre outros. Esses materiais possuem ampla aplicação e estão presentes em vários dispositivos e sistemas presentes no nosso dia a dia, não só como combustível nos churrascos, mas como fonte de energia, em eletrodos de baterias, como cargas em plásticos e borrachas (como pneus, por exemplo), em tintas e como pigmento preto, como absorvedores de impurezas, em sistemas de purificação de água e gases, em células solares, como recobrimento anti-reflexo, e muitas outras aplicações.

Em 1985 a comunidade científica foi surpreendida com a descoberta de um novo alótropo do carbono, o fulereno (Kroto *et al.*, 1985). Os químicos Henry Kroto (Universidade de Sussex, Inglaterra), Robert Curl e Richard Smalley (ambos da Universidade Rice, nos EUA) estavam trabalhando na identificação de moléculas formadas no espaço interestelar, quando em suas pesquisas detectaram uma nova molécula formada por 60 átomos de carbono, com altíssima estabilidade, e representada pela fórmula C_{60} . Após vários estudos para identificar sua estrutura, descobriram que a molécula era

formada exatamente como o desenho de uma bola de futebol, onde os 60 átomos de carbono com hibridização sp^2 estavam ligados uns aos outros formando uma estrutura circular, possível de ser atingida através da alternância de pentágonos e hexágonos, como esquematicamente ilustrado na **Figura 3c**. Quando se deu conta da beleza da estrutura molecular da nova molécula, Kroto se recordou das obras do arquiteto americano Buckminster Fuller, famoso pela projeção de domos geodésicos esféricos, e em sua homenagem batizou a nova molécula de fulereno. A importância da descoberta da molécula de fulereno foi mundialmente reconhecida com a outorga do Prêmio Nobel de Química de 1996 aos três cientistas diretamente envolvidos nesse processo.

Um aspecto bastante interessante da descoberta do fulereno é que se trata de um alótropo molecular do carbono (diferente dos outros já há tanto tempo conhecidos, que são estruturas características de estado sólido, conhecidas como sólidos covalentes), o que lhe confere propriedades típicas de moléculas, como solubilidade em vários solventes. O advento do fulereno promoveu o desenvolvimento de uma série de trabalhos científicos, voltados para a compreensão e domínio de rotas de preparação, para a possibilidade de realizar reações químicas e modificações na sua estrutura molecular, e para estudo da viabilidade de aplicação desse novo composto. Hoje em dia os fulerenos e seus derivados são muito estudados em aplicações biomédicas (por exemplo em terapia fotodinâmica, como agente de

contraste, como carreador de fármacos), em dispositivos fotovoltaicos (em células solares orgânicas), como catalisadores em diversas reações químicas e em membranas de células a combustível, somente para citar alguns exemplos.

Em 1991 o cientista japonês Sumio Iijima, observando amostras de fulereno em um microscópio eletrônico de transmissão, detectou a presença de estruturas diferentes e intrigantes, que apareciam como subprodutos no material de síntese de fulereno pelo qual estava dedicando seu trabalho (Iijima, 1991). Ao analisar com um pouco mais de calma pode confirmar que se tratava de uma nova estrutura alotrópica de carbono, dando origem a uma das mais fantásticas descobertas recentes, e abrindo uma nova fronteira no conhecimento humano. Ali se iniciava a era de ouro dos nanotubos de carbono, ou mais genericamente falando, das nanoestruturas de carbono.

3.1) As nanoestruturas de carbono: nanotubos e grafeno

As duas últimas décadas do século XX foram marcadas pelo advento de uma nova forma de se enxergar a natureza, relacionada à compreensão de fenômenos advindos da matéria em escala de tamanho extremamente pequeno, na ordem de poucos nanômetros. Um nanômetro (nm) corresponde a um bilionésimo do metro, ou cientificamente falando, a 10^{-9} m (0,000000001 m). Apenas para efeito de comparação, um único átomo possui um diâmetro médio de aproximadamente 0,3 nm, o que significa dizer que 1 nm corresponde a um espaço que equivale a 3 ou 4 átomos enfileirados. Quando a matéria é preparada com o tamanho das suas partículas na ordem de alguns nanômetros, as propriedades da matéria são totalmente diferentes daquelas que conhecemos naturalmente. Por exemplo, todos sabem que o ouro tem a cor amarelo-dourada, mas o ouro se preparado em tamanho de partículas menores de 10 nm, pode possuir a cor vermelha, ou azul, ou verde, ou roxa. Isso significa que novas propriedades podem ser obtidas de materiais conhecidos, somente controlando o tamanho de suas partículas, mantendo-as abaixo de alguns nanômetros (que dependem do tipo de material e da propriedade específica). Esse é um comportamento genérico que se aplica a todo tipo de material, que se deve a vários fatores, dentre os quais à forma pela qual os elétrons ficam confinados em partículas muito pequenas. Essa descoberta científica levou a uma explosão de trabalhos envolvendo a preparação de diferentes materiais em escala

nanométrica, o estudo de suas características e propriedades, e a viabilidade de usar suas propriedades diferenciadas visando novas aplicações. Todo esse novo cabedal de conhecimento ficou genericamente conhecido como Nanociência e Nanotecnologia (N&N).

Nenhum material é mais significativo e representativo das N&N que o nanotubo de carbono. O alótropo do carbono que traz o prefixo “nano” no seu DNA tem sua estrutura que pode ser compreendida como resultante do enrolamento de uma folha de grafeno, formando tubos ocos com diâmetros de alguns poucos nanômetros e comprimentos que podem chegar a milímetros, como esquematicamente representado na **Figura 3d**. Os nanotubos de carbono, na realidade, correspondem a uma grande família de materiais que diferem entre si pelo número de folhas enroladas que originam o tubo, podendo ser separados em nanotubos de paredes simples (como na **Figura 3d**) ou nanotubos de paredes múltiplas (**Figura 3e**), onde mais que uma folha concêntrica se enrola para formar um tubo com estrutura parecida com um tubo coaxial. Nos nanotubos de paredes múltiplas a distância entre as folhas de grafeno enroladas é muito parecida com a distância que separa cada folha de grafeno na estrutura do grafite.

Além disso, os nanotubos de paredes simples são diferentes entre si. Se o que fornece a propriedade especial é o fato dos tubos terem diâmetros nanométricos, pode-se imaginar que diferentes diâmetros possuam propriedades diferentes, e é exatamente isso que acontece. Além disso, há

várias formas de se “enrolar” uma folha de grafeno, assim como há várias formas de se enrolar uma folha de papel (isso é fácil de compreender, imagine uma folha convencional de papel sulfite e visualize o número diferente de maneiras que se pode enrolá-la para formar um tubo – partindo do comprimento, partindo da largura, ou começar a enrolar com a folha inclinada, nos mais diferentes ângulos possíveis). Cada maneira de enrolar essa folha origina um nanotubo com característica diferente, cuja propriedade varia também. Essa descoberta causou uma grande excitação na comunidade científica, pois se tratou do primeiro caso conhecido onde fatores meramente geométricos (diâmetro do tubo, forma pela qual ele foi enrolado) determinam a propriedade de um material.

Em resumo, a substância alótropa do carbono conhecida como nanotubo de carbono se refere, na verdade, a vários materiais diferentes, que têm a estrutura geral representada da mesma forma (folha de grafeno enrolada originando tubos), mas que diferem entre si pelo número de camadas, pelo diâmetro e pela forma que essas camadas se enrolam. O que há em comum são suas propriedades superlativas: tratam-se dos materiais com maior resistência mecânica conhecida, mas extremamente leves; possuem propriedades eletrônicas diferenciadas, podendo ser mais condutores que o cobre, ou apresentar propriedades semicondutoras como o silício; têm a maior condutividade térmica dentre todos os materiais conhecidos; e ainda podem ser modificados quimicamente. Tudo isso lhes

permitem aplicações reais ou em potencial em um número incrível de dispositivos e sistemas. Hoje é difícil imaginar uma área do conhecimento e que marque presença no nosso dia a dia que não tenha sido de alguma maneira influenciada pelo advento dos nanotubos de carbono – da medicina à agricultura, da engenharia à química, física e biologia, da eletrônica à ótica.

Desde seu primeiro relato por Iijima em 1991, o desenvolvimento científico e tecnológico relacionado a esse alótropo do carbono evoluiu de forma inacreditável, passando por todos os aspectos do conhecimento básico (compreensão da estrutura, compreensão das propriedades, desenvolvimento de rotas de preparação, conhecimento do efeito na natureza e na saúde humana, etc) até o conhecimento aplicado (que inclui o desenvolvimento de plantas industriais de fabricação controlada de nanotubos de carbono em grande escala e a preço competitivo, processos de incorporação de nanotubos em dispositivos e sistemas, fabricação e comercialização de produtos contendo nanotubos de carbono). De materiais esportivos de alto desempenho (bicicletas de corrida, raquetes de tênis, remos, tacos de baseball, etc), passando por equipamentos eletrônicos como telefones celulares e tablets, por células solares, plásticos resistentes, para-choques de automóveis e tintas condutoras, existem mais de 200 produtos diferentes no mercado contendo nanotubos de carbono. O mercado envolvendo nanotubos de carbono em 2018 foi de 2,4 bilhões de dólares, com perspectiva de atingir a cifra de 6 bilhões em 2023 (Carbon Nanotubes

Market , 2018). Tudo isso para um material cujo primeiro relato se deu há menos de 30 anos, e que ainda hoje se descobre características e propriedades novas e intrigantes.

O mais novo alótropo do carbono é também um membro da família dos nanomateriais, o grafeno. Como já mencionado, o grafeno é a unidade básica com espessura de um único átomo de carbono sp^2 , cujo empilhamento origina a estrutura do grafite. Por muitos anos cientistas teóricos previam que caso fosse isolado da estrutura do grafite (e, portanto, pudesse existir como um material único), o grafeno teria propriedades fantásticas e bastante diferenciadas dos materiais conhecidos. Entretanto, um material com a espessura de um único átomo e as dimensões laterais que podiam chegar até a centímetros era considerado impossível de ser obtido, pois se esperava que esse material fosse instável. Em 2004 os cientistas André Geim e Konstantin Novoselov, da Universidade de Manchester na Inglaterra, provaram que essa crença não era real, e isolaram uma única folha de grafeno pela primeira vez (Novoselov *et al.*, 2004). Mais do que provarem que o material era estável, eles demonstraram experimentalmente as propriedades que haviam sido previstas, abrindo um novo campo de pesquisa na ciência de materiais, relacionado a materiais bidimensionais. Por isso tudo foram agraciados com o Prêmio Nobel de Física de 2010.

O grafeno, portanto, corresponde ao alótropo do carbono com espessura de um único átomo, formado por átomos de carbono com

hibridização sp^2 . Essa peculiaridade da espessura monoatômica faz com que os elétrons dos orbitais p puros de cada átomo de carbono fiquem livres e possam interagir com orbitais vizinhos, sem serem perturbados com os orbitais de folhas adjacentes como acontece no grafite. Essa particularidade faz com que esses elétrons se movimentem de forma diferenciada, acarretando nas propriedades de condução singulares do grafeno. Além disso, o grafeno apresenta propriedades mecânicas e térmicas muito parecidas com os nanotubos de carbono, o que lhe confere também inúmeras aplicações tecnológicas.

4- O elemento da vida

A espinha dorsal da vida no planeta terra se deve ao elemento carbono, a tal ponto que a química relacionada às moléculas formadas pelo carbono ser conhecida como Química Orgânica. Nenhum outro dos 118 elementos químicos conhecidos possui a regalia de ter uma das quatro grandes áreas da química totalmente dedicada a si (as outras três são a Química Inorgânica, a Química Analítica e a Físico-Química).

A vida é formada por um número extraordinário de compostos complexos baseados em carbono, interagindo entre si para dar origem aos efeitos cooperativos que formam um organismo. Aproximadamente 98% de todo organismo vivo é composto de carbono, nitrogênio, hidrogênio e oxigênio, tendo o carbono como elemento central. Somente para considerarmos um exemplo, uma classe importante de compostos que formam a base da vida são os aminoácidos, compostos que possuem na mesma estrutura molecular os grupos químicos do tipo ácido carboxílico e amina, como representado esquematicamente na **Figura 4**. Os aminoácidos são os blocos construtores das proteínas, que se formam através de ligações entre diferentes moléculas de aminoácidos, conhecidas por ligações peptídicas (**Figura 4**). Existem somente 20 diferentes aminoácidos na natureza, mas o número existente de proteínas é praticamente incalculável, ocorrendo em

diferentes formatos, com diferentes massas, e assumindo diferentes funções. O mais interessante e surpreendente é que cada organismo possui o seu próprio conjunto de proteínas, ou seja, uma proteína existente no ser humano não é encontrada em um inseto ou em uma bactéria. Calcula-se que o ser humano possui cerca de cinco milhões de proteínas diferentes, e que organismos extremamente simples como a bactéria *E. coli* possuam aproximadamente 3.000 proteínas (Allinger *et al.*, 1976). Em um estudo publicado em 2017, cientistas propõe que o número de espécies vivas na terra é de aproximadamente 2 bilhões (Brendan *et al.*, 2017), cada um com seu próprio conjunto de proteínas. Com esses números em mente, tente estimar o número total de moléculas de proteínas diferentes existentes por aqui.

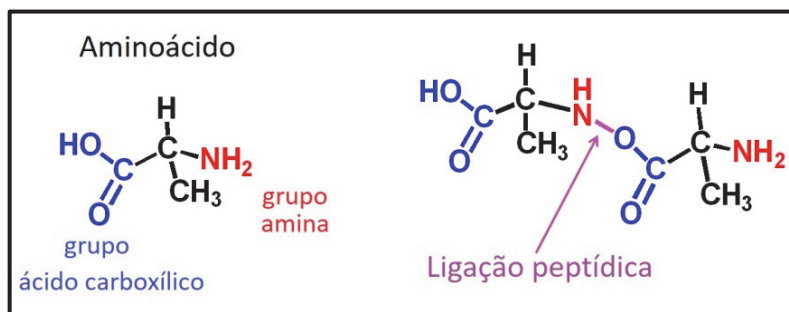


Figura 4: Exemplo de uma estrutura molecular de um aminoácido, e de uma ligação peptídica entre o grupo amina e o grupo ácido carboxílico de dois aminoácidos.

Mas afinal, por que a vida escolheu o carbono? A pergunta na verdade já foi respondida indiretamente em outros pontos desse texto. Nenhum outro elemento (exceto o silício) possui uma estrutura atômica que permite a formação de ligações químicas estáveis e tão variadas com tantos outros elementos químicos. E fundamentalmente, o carbono foi o elemento escolhido pela natureza para ser a base da vida devido à sua capacidade de se ligar, de formas diferentes, a outros átomos de carbono, formando ligações C-C combinando os diferentes tipos de orbitais híbridos possíveis para o átomo de carbono, o que permite a formação de moléculas lineares, cíclicas, ramificadas, do tipo gaiola, e ligadas aos diferentes elementos químicos que dão sustentação à vida. O número de combinações é infinito. E embora o elemento silício também possua essas propriedades (está no mesmo grupo do carbono na tabela periódica, um período abaixo), as ligações Si-Si não são estáveis o suficiente na atmosfera oxidante da terra. Portanto, uma vida baseada em silício não teria lugar (como de fato não teve) num planeta com as características de atmosfera, temperatura e luminosidade como as que existem na Terra.

5- A idade das coisas

Dentre os vários aspectos importantes no estudo da evolução da vida na terra, o estudo de fósseis corresponde a um dos mais importantes. Fósseis são resíduos de organismos que um dia foram vivos, ou seja, são traços da vida na Terra, e a partir deles se pode coletar informações sobre sua interação com outros organismos e com o meio ambiente, sobre como cresceram, do que se alimentavam, como se reproduziam, do que morreram, etc. Nada disso teria validade sem se conhecer a idade do fóssil, para que se possa relacionar as informações coletadas com o período da evolução pelo qual esse fóssil está associado. Estimar a idade de coisas que foram vivas tem papel fundamental para a Biologia, a Química, a Arqueologia, a Antropologia, a Paleontologia, a Geologia, a Geografia, a História, a Teologia, dentre várias outras áreas do conhecimento, e nesse processo temos novamente o Carbono ocupando um papel central.

A determinação da idade de fósseis, tecidos, ou qualquer resíduo de matéria que um dia tenha pertencido a um organismo vivo, é realizada através de um processo conhecido por datação por carbono-14. Esse processo é realizado através da medida da quantidade do isótopo do carbono-14 existente na amostra, ou mais especificamente, a partir da razão entre carbono 14 e carbono 12 (razão $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$). Como já mencionado na

segunda seção desse texto, o carbono possui três isótopos, sendo o carbono-14 instável e que apresenta decaimento radioativo. Isso significa que com o passar do tempo o carbono-14 se decompõe, pela conversão de um nêutron a um próton e emissão de uma partícula β , sendo convertido portanto para o elemento químico nitrogênio. Elementos radioativos (como o isótopo de carbono-14) são caracterizados por uma grandeza conhecida como tempo de meia-vida, que corresponde ao tempo necessário para uma determinada massa desse elemento ser reduzida espontaneamente à metade. Por exemplo, se o tempo de meia-vida de um determinado elemento é de 1000 anos, significa dizer que são necessários 1000 anos para que 100 g desse elemento se decomponham e reste a metade, 50 g. E outros 1000 anos para que desses 50 g sobrem 25 g. E outros 1000 anos para que desses 25 g sobre a metade, ou seja, 12,5 g. E assim sucessivamente. No caso do carbono-14, o seu tempo de meia-vida de 5.730 ± 40 anos. Esse dado é a chave para sua utilização na datação da matéria.

A atmosfera da terra é rica em nitrogênio, e parte desse nitrogênio é constantemente convertida em carbono-14 pela interação com raios cósmicos de alta energia. O ^{14}C se combina com o oxigênio da atmosfera para formar gás carbônico radioativo ($^{14}\text{CO}_2$), que acaba sendo incorporado pelas plantas a partir do processo de fotossíntese, e posteriormente incorporado aos animais através da utilização das plantas como alimento.

Como todo esse processo é constante e as plantas estão no topo da cadeia alimentar, pode-se afirmar que a quantidade de ^{14}C em qualquer organismo vivo é constante, ou seja, há uma proporção $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ conhecida para os seres vivos, uma vez que há troca constante de carbono entre um ser vivo e o meio ambiente. Quando o ser vivo morre essa troca de carbono é interrompida, e o carbono-14 remanescente no organismo agora morto começa a decair, em um tempo de meia-vida de 5.730 ± 40 anos. Assim, determinar a quantidade de ^{14}C em um pedaço de algo que algum dia foi vivo (um fóssil, um pedaço de osso, um tecido de origem vegetal, etc) indica há quanto tempo esse organismo morreu. Quanto mais velho, menor a quantidade de carbono-14. Como o tempo de meia vida é conhecido, existem tabelas e curvas analíticas que estimam a quantidade de ^{14}C presente em uma amostra e o tempo passado desde sua morte, ou seja, uma estimativa da sua idade.

A técnica da utilização do carbono-14 para datar a idade de coisas que um dia foram vivas foi desenvolvida em 1940 pelo químico americano Willard Libby, que recebeu o Prêmio Nobel de Química de 1960 por esse trabalho. Hoje em dia existem equipamentos sofisticados para a determinação da taxa $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ em diferentes amostras, e desde seu advento inúmeras questões de mais alta relevância científico/tecnológica foram respondidas: da idade das múmias do Egito ou da América Central; dos primeiros humanos que habitaram diferentes regiões do planeta; dos

primeiros organismos vivos que se tem relato, ajudando a conhecer onde surgiu a vida na terra; da idade dos dinossauros e de inúmeras espécies que já se extinguíram; da idade de antigos manuscritos (como os do Mar Morto) e papiros; da idade do santo sudário, o pano de linho que supostamente teria envolvido o corpo de Cristo; da idade de obras de arte, ajudando na comprovação de sua autenticidade; datação de madeiras de construções, utensílios ou mobiliários; dentre tantos outros exemplos.

6- Carbono inorgânico

Nem todo carbono presente no universo está na forma de um composto orgânico. Existem alguns compostos que estão presentes nos solos, sedimentos, rochas e minerais, assim como na atmosfera e dissolvidos em corpos aquáticos, que são os chamados carbonos inorgânicos. Os alótropos de carbono citados anteriormente são exemplos de carbonos inorgânicos. Além deles, o monóxido e o dióxido de carbono (CO e CO_2 , respectivamente), os carbonatos (compostos que possuem o ânion CO_3^{2-} , como por exemplo o carbonato de cálcio, conhecido como calcário, CaCO_3), os cianetos (compostos que possuem o ânion CN^-), os carbetos (compostos com o ânion C_2^{2-}), dentre outros.

O monóxido de carbono é um gás inodoro e extremamente tóxico, produzido pela queima de matéria orgânica em ambiente com quantidade de oxigênio insuficiente para formar o dióxido de carbono (popularmente conhecido como gás carbônico), que é muito mais estável. O CO_2 é um gás incolor e inodoro encontrado na composição da atmosfera e dissolvido em corpos aquáticos. É liberado na natureza através de vulcões, pela dissolução de rochas calcárias, pela respiração de organismos aeróbicos, pela fermentação de açúcares e pela queima de combustíveis fósseis.

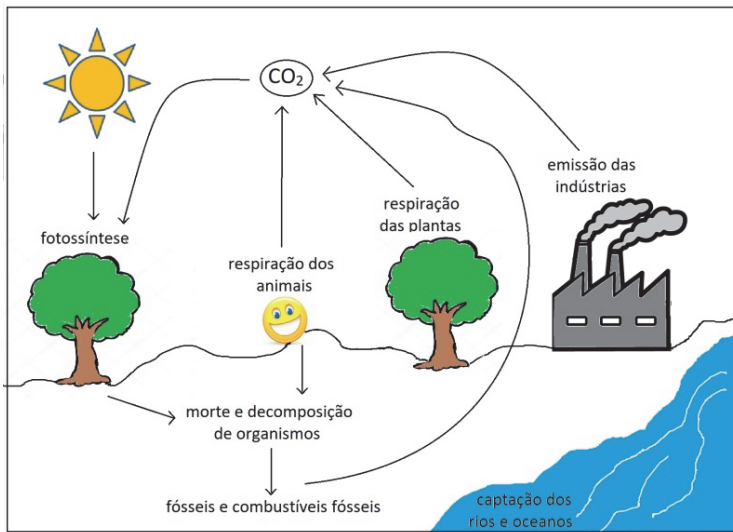
Dentre os carbonatos, o carbonato de cálcio é um dos mais conhecidos,

ocorrendo naturalmente como o mineral calcita. Conchas de moluscos e esqueletos de corais são constituídos primordialmente de CaCO_3 . Dentre os carbonatos famosos podemos citar também a soda (carbonato de sódio, Na_2CO_3) e a potassa (carbonato de potássio, K_2CO_3), utilizados na confecção de vidros, e os minerais dolomita (um carbonato de cálcio e magnésio, $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) e siderita (carbonato de ferro, FeCO_3).

7- O ciclo do carbono

As diferentes formas de interação de um elemento químico com o meio ambiente e com os seres vivos, e sua transição entre a atmosfera, hidrosfera, geosfera e litosfera, são conhecidos como ciclos biogeoquímicos. O movimento e a fluidez do elemento carbono entre rios, mares, atmosfera, solos, biosfera e geosfera, puro ou compondo diferentes substâncias nas suas mais variadas formas, recebe o nome de ciclo do carbono, e uma representação desse ciclo se encontra na **Figura 5**. Na verdade o ciclo do carbono é uma representação de onde (e como) o carbono pode ficar estocado em diferentes reservatórios, e como ele se movimenta de um reservatório a outro. No caso específico do carbono, esses reservatórios são os rios, mares e oceanos; o solo; a vegetação; a atmosfera; as rochas; os seres vivos.

O ciclo do carbono costuma ser dividido em um componente geológico e um componente biológico, como se fossem dois ciclos em paralelo. O componente geológico está relacionado na sua maioria ao carbono inorgânico, e envolve dissolução e intemperismo de rochas, movimentação de placas tectônicas e erupções vulcânicas. Na atmosfera o gás carbônico reage com moléculas de água para formar o ácido carbônico, um ácido fraco que quando atinge a superfície da terra trazido pela chuva ajuda a lixiviar rochas e sedimentos, fazendo com que os minerais sejam dissolvidos na forma iônica e arrastados para os corpos aquáticos (rios, lagos, oceanos), onde encontram outros íons e precipitam na forma de

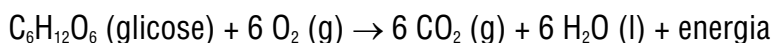


Química no Cotidiano | 45

Através da fotossíntese, as plantas absorvem o CO₂ do ar para produzir glicose, utilizando água e a energia da luz solar, de acordo com a seguinte equação química:



No processo inverso da fotossíntese, plantas e organismos vivos usam carboidratos como os açúcares para gerar energia para seu próprio metabolismo, liberando CO₂ para a atmosfera. Utilizando o mesmo exemplo da glicose, enquanto matéria orgânica:



Além da fotossíntese e da respiração, o componente biológico do ciclo do carbono envolve espécies marinhas, como por exemplo as fitoplânctons que usam carbono para prepararem as cascas de moluscos, que quando morrem vão para o fundo dos mares onde são enterradas e se convertem em calcário. E finalmente, várias espécies vivas quando morrem e são enterradas, seja em ambiente marinho ou terrestre, com o passar dos séculos são convertidas nos chamados combustíveis fósseis, como o petróleo, que ao ser extraído e usado como combustível, devolve o CO₂ à atmosfera.

8- Um vilão para o meio ambiente?

Estima-se que o planeta Terra surgiu há cerca de 4,6 bilhões de anos. Os primeiros seres vivos, chamados de estromatólitos, teriam surgido há 3,6 bilhões de anos, os primeiros organismos invertebrados (esponjas) há 650 milhões de anos, os primeiros vertebrados há 550 milhões de anos e os primeiros humanos há aproximadamente 200 mil anos (<https://biomimicry.net/earths-calendar-year-4-5-billion-years-compressed-into-12-months>).

Comparado ao tempo de existência do planeta e da vida, a existência dos humanos corresponde a uma fração de tempo insignificante. Entretanto, esse pouco tempo em que estamos habitando o planeta foi suficiente para causarmos sérias mudanças, que se acentuaram após a revolução industrial nos séculos XVIII e XIX, e se tornaram críticas a partir de meados do século XX. Dentre inúmeras ações antropogênicas danosas ao planeta e ao meio ambiente, o uso excessivo de combustíveis fósseis tem causado um crescente e contínuo aumento nas taxas de emissão de CO_2 para a atmosfera, desbalanceando o ciclo do carbono discutido anteriormente, e transferindo muito mais gás carbônico para atmosfera do que o possível pelos processos conhecidos para o caminho inverso. O excesso de gás carbônico é o principal responsável pelo chamado “efeito estufa”, que causa um aumento do aquecimento global do planeta.

O efeito estufa possui esse nome porque é o mesmo efeito que ocorre em uma estufa de vidro para plantas (cuja temperatura é muito maior do que a do lado externo), que por sua vez corresponde ao mesmo efeito do aquecimento sentido quando deixamos o carro fechado sob o sol. O CO₂ acumulado na atmosfera, assim como o vidro no carro ou na estufa de plantas, não permite que a radiação infravermelha (que é a responsável pelo calor que sentimos quando ficamos sob o sol) emitida pela superfície da terra seja dissipada, ficando, portanto, concentrada dentro daquele ambiente. O resultado é um aumento da temperatura do ambiente – a estufa, o carro, o Planeta Terra. Estima-se que desde 1975 a temperatura média da Terra tenha aumentado cerca de 0,2 °C a cada década (<https://earthobservatory.nasa.gov/world-of-change/DecadalTemp>), fruto do aumento significativo da taxa de emissão de CO₂ devido à queima descontrolada de combustíveis fósseis, e à diminuição na taxa de captura do CO₂ da atmosfera causada pelo desmatamento crescente, ou seja, a diminuição de áreas verdes capazes de realizar a fotossíntese. Parece pouco, mas essa taxa é absolutamente preocupante. Um aumento na temperatura da terra causa sérios prejuízos à vida, pois o metabolismo de vários microorganismos é alterado, além de causar derretimento de gelo acumulado nas calotas polares, o que aumenta o nível dos mares e oceanos, podendo levar a inundações.

A preocupação com o excesso de CO₂ na atmosfera tem levado governantes a inúmeras discussões políticas visando ações que acarretem na

diminuição da taxa de emissão de gases causadores do efeito estufa. A mais famosa iniciativa foi assinada por diferentes países na convenção da ONU realizada na cidade japonesa de Kyoto em 1997, que ficou conhecido como Protocolo de Kyoto. Apesar de assinado em 1997, o protocolo só entrou em vigor em 2005, contando com a ratificação de 192 países. Nele, houve um comprometimento para a redução gradativa da emissão de CO_2 , com a meta de redução de 5,2% até 2012, em comparação às taxas de emissão de 1990. Infelizmente somente 37 países cumpriram a meta, e curiosamente aqueles países que menos poluem. O Protocolo teve sua validade prorrogada até 2020, mas é difícil acreditar que suas metas serão atingidas.

A redução da taxa de emissão de CO_2 para a atmosfera depende de ações que acarretam em mudanças comportamentais do ser humano: investimentos em novas formas de geração de energia, que não dependam de combustíveis fósseis (energia solar e eólica, por exemplo), diminuição do número de automóveis circulando nas cidades (através de investimentos em sistemas de transporte coletivo e incentivos a uso de transportes de tração humana como a bicicleta), investimentos em automóveis movidos a energia elétrica, dentre tantas outras. Respondendo a pergunta que dá origem a esta seção, o vilão para o meio ambiente não é o carbono, mas sim o responsável pela sua emissão de forma desgovernada.

9- Para finalizar

O poema minimalista “Gestação”, da incrível poetisa paranaense Helena Kolody, diz: “Do longo sono secreto, na entranha escura da terra, o carbono acorda diamante.” O poema “Psicologia de um Vencido”, do enigmático e ainda pouco compreendido poeta Augusto dos Anjos, se inicia com a frase: “Eu, filho do carbono e do amoníaco”. Carbono é o título do álbum e da canção principal do CD do cantor Lenine, lançado em 2017. O elemento químico ao qual esse livro é dedicado também tem uma importância no mundo das artes, que perpassa a sua citação (muitas vezes como personagem principal) em textos, poemas e letras de canções, tendo sido extensivamente utilizado como pigmento, desde a pré-história (como nas pinturas rupestres encontradas na caverna de Lascaux na França), passando pelas pinturas renascentistas de Tintoretto, Botticelli, Caravaggio, Rembrandt e Michelangelo (o carbono está em todo detalhe em preto na Capela Sistina), pela estonteante Guernica de Pablo Picasso, e continua sendo a base dos pigmentos pretos utilizados até os dias de hoje. Como mais uma expressão de sua versatilidade, não deixa de ser sugestiva e emblemática essa sutil relação entre o elemento da vida e algumas das mais fascinantes manifestações de beleza que a vida nos proporciona.

Referências Bibliográficas

- [1] <https://www.britannica.com/science/carbon-chemical-element>, último acesso em 10/03/2019.
- [2] Zarbin, A. J. G.; Oliveira, M. M., Nanoestruturas de carbono (nanotubos, grafeno): Quo Vadis. **Química Nova**, 36, 1533-1539, 2013.
- [3] <https://www.statista.com/statistics/267367/reserves-of-graphite-by-country/>, acessado em 10/03/2019.
- [4] **Mineral Commodity** Summaries 2018: U.S. Geological Survey, January 2018.
- [5] Kroto, H. W.; Heath, J.R.; O'Brien, S.C.; Curl, R.F.; Smalley, R. E. C60: Buckminsterfullerene. **Nature**, 318, 162-163, 1985.
- [6] Iijima, S. Helical microtubules of graphitic carbon. **Nature**, 354, 56–58, 1991.
- [7] **Carbon Nanotubes Market - Segmented by Type, End-User Industry, and Geography - Growth, Trends, and Forecasts (2019-2024)**, Mordor Intelligence, 2018.

- [8] Novoselov, K. S. ; Geim, A. K.; Morozov, S. V.; Jiang, D.; Zhang, Y. ; Dubonos, S. V. ; Grigorieva, I. V. ; Firsov, A. A. Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films. **Science**, 306, 666-669, 2004.
- [9] Allinger, N.L.; Cava, M.P.; Jongh, D.C.; Johnson, C.R.; Lebel, N.A. **Química Orgânica**, Editora LTC, 2a.Edição, 1976.
- [10] Brendan, B.L. ; Miller, E.C.; Rhodes, M.K.; Wiens, J.J. Inordinate Fondness Multiplied and Redistributed: the Number of Species on Earth and the New Pie of Life. **The Quarterly Review of Biology**, 92, 229-265, 2017.
- [11] <https://biomimicry.net/earths-calendar-year-4-5-billion-years-compressed-into-12-months/> , acessado em 10 de março de 2019.
- [12] <https://earthobservatory.nasa.gov/world-of-change/DecadalTemp> , acessado em 10 de março de 2019.



Sociedade Brasileira de Química

Uma produção SBQ - Sociedade Brasileira de Química

www.s bq.org.br