

Eduardo Fleury Mortimer

Faculdade de Educação da UFMG - Av. Antônio Carlos - 6627 - 31270-901 - Belo Horizonte - MG

Recebido em 17/6/96; aceito em 3/7/96

BEYOND CHEMICAL BOUNDARIES: A CONCEPTUAL PROFILE FOR MOLECULE AND MOLECULAR STRUCTURE. The concepts of molecule and of molecular structure are so central to understand chemical phenomena that seems to be no doubt about the uniqueness of its meanings. Nevertheless, the idea that the world exhibits a multiform structure and that to different spheres of the world correspond different ways of knowing (Berger & Luckmann, 1967) has received support from different areas of scientific inquiry. Bachelard (1940, 1982) showed that a single philosophical doctrine is not enough to describe all the different ways of thinking when we try to explain a single concept. Wooley's question about the possibility of deducing the concept of molecular structure from quantum theory (Wooley, 1978) strengthened the feasibility of thinking the concept of molecule as a profile that encompasses different meanings. Moreover, research on students' learning of scientific concepts have brought to light that students use several ideas to explain scientific and everyday phenomena which are different from those learned in formal schooling. These ideas are not extinguished or replaced by scientific concepts, despite the efforts to do so in science classes. The common sense and scientific ways of understanding and talking about reality seems to be complementary in the same sense of the Bohr's complementarity (Halliday & Martin, 1993). So, we have to include in our profile of the concept of molecule not only scientific but also common sense zones. Drawing from Bachelard's notion of epistemological profile, from the history of science and from the research on children's ideas in science, we have developed the idea of a *conceptual profile* and used it to analyse basic scientific concepts, such as the concepts of matter and physical states of matter (Mortimer, 1995) and to investigate new ways to teach them. In the present paper, we will discuss the zones that might constitute a conceptual profile of molecule. The need of complementary views to account for the molecular structure in different contexts bring important issues for understanding and teaching chemistry, which will be discussed further in the article.

Keywords: conceptual profile; molecule; molecular structure.

Gostaria de agradecer a Divisão de Ensino de Química, pelo convite, que me deu a oportunidade de tentar refletir o que nós, da área de ensino, poderíamos dizer aos nossos colegas químicos quando se trata de pensar as fronteiras da química. Aparentemente o ensino é a área mais distante dessas fronteiras. O ensino lida com o conhecimento que já esteve na fronteira, foi validado pela comunidade científica e incorporado na cultura escolar, através de uma transposição didática. Muito do que foi transposto pode já ter sido superado, mas mantém-se nos currículos como parte de uma química escolar.

No entanto, o ensino lida com fronteiras da química não só com ciências humanas, como a psicologia, filosofia, história e sociologia, mas também com outras formas de conhecimento, não-científicas. Ao tentar pensar como o aluno aprende química, como suas experiências individuais e culturais anteriores influenciam esse aprendizado, nos deparamos com a química nas suas fronteiras com a cultura.

Falar de fronteiras como interdisciplinariedade, no entanto, ainda não responde a questão: o que o ensino teria a dizer que pudesse situá-lo nas fronteiras da química com o novo? Ao pensar essa relação da química com a cultura, ao transpor a química para a cultura escolar, e ao refletir sobre a evolução dos conceitos químicos, o ensino poderia estar escrevendo uma certa história e filosofia da química que ajudaria a pensar essa área do conhecimento para além de suas fronteiras em duas

direções. Numa delas nos deparamos com a vida cotidiana e sua "ciência" automática, quase inconsciente, dispersa, ao mesmo tempo útil, porque culturalmente enraizada. Na outra direção encontraremos o novo e o desconhecido. Ao lidar com a evolução de conceitos químicos, nós, da área de ensino, poderíamos oferecer à química novas formas de conectar suas fronteiras, reduzindo a distância entre a vida cotidiana e a ciência contemporânea, entre a química e a cultura.

A noção de *perfil conceitual* é uma contribuição que eu tenho procurado trazer para pensar o ensino de química e que considero que possa ajudar a conectar fronteiras da química, ao pensar a evolução de seus conceitos. A idéia de que os conceitos centrais da Química e de outras ciências naturais não são únicos, mas se encontram dispersos em perfis², pode fornecer elos para essas conexões. Ao colocar lado a lado, num mesmo perfil, concepções cotidianas e conceitos químicos clássicos e modernos, cria-se um quadro de referência que permite traçar a linha evolutiva dos conceitos e identificar os obstáculos à construção de idéias mais avançadas.

Nesta conferência vou apresentar uma proposta de perfil para o conceito de molécula. Para construir as categorias das diferentes zonas de um perfil conceitual, temos que recorrer à contribuições de outras disciplinas, principalmente a psicologia cognitiva, a filosofia e a história das ciências. Inspiradas na psicologia cognitiva, pesquisas na área de ensino têm realizado uma busca sistemática de concepções usadas por estudantes na explicação de fenômenos. Esses estudos revelaram a existência de uma "química" da vida cotidiana, onde palavras

E-mail: mortimer@oraculo.lcc.ufmg.br

como reações, substância, solubilidade e equilíbrio têm sentido diverso daqueles veiculados nas aulas de química. A literatura tem mostrado que essas concepções sobrevivem às mais variadas estratégias de ensino, mesmo àquelas elaboradas com o objetivo de suprimi-las. Essa persistência talvez possa ser explicada pelo enraizamento dessas concepções na nossa cultura cotidiana. Seria um esforço inútil tentar suprimi-las, já que elas são úteis ao nosso dia-a-dia. Esses estudos fornecem importantes pistas para a construção das primeiras zonas de um perfil conceitual.

É interessante que muitas idéias dessa química cotidiana tenham relações com formas de pensar usadas por filósofos e cientistas em outras épocas. Esse paralelismo nos leva diretamente à história e à filosofia das ciências. Por outro lado, estudos nessas áreas mostram mudanças significativas na maneira de pensar vários conceitos químicos, quando tentamos diferenciar o quadro conceitual da química entre a química clássica, a química moderna e a química contemporânea. Portanto, a filosofia e a história das ciências são a base para a construção de outras zonas de um perfil conceitual.

Vamos tentar concretizar essas relações entre psicologia, filosofia e ensino de química apresentando o exemplo de um possível perfil para o conceito de molécula. Vou me basear em artigo que eu e o Professor Luíz Otávio F. Amaral, do Departamento de Química da UFMG, apresentamos à uma conferência internacional em filosofia da química e da bioquímica, que aconteceu em abril desse ano, em Atenas³. Gostaria de agradecer ao Luiz Otávio e dizer que muitos dos exemplos que vou apresentar foram sugeridos por ele. Essa minha conferência, portanto, é fruto muito mais dessa nossa cooperação do que de meu trabalho individual. Nós agradecemos também ao Professor Rubem Dario por ter chamado a nossa atenção para os trabalhos em *clusters* de ouro(I).

Um perfil conceitual para molécula e estrutura molecular

De acordo com o Oxford Dictionary, a palavra *molecule* apareceu na língua inglesa em 1678, a partir da palavra francesa *molécule*. O termo pode ser encontrado no *Traité Elemetare de Chimie* (1789) de Lavoisier para designar a menor unidade em que um substância poder ser dividida sem que ocorra uma mudança na sua natureza química. A idéia evoluiu, no contexto da química clássica do século XIX, para designar o “menor grupo de átomos, iguais ou diferentes, unidos por forças químicas” (*The American Heritage Dictionary*, compact disc edition). De acordo com esse conceito clássico, as propriedades de qualquer material dependem da quantidade e tipos de átomos presentes na molécula, a maneira como eles estão ordenados - sua topologia - e a maneira como estão organizados no espaço - seu arranjo geométrico.

Essa idéia de molécula com um objeto real - o bloco básico da construção material, constituído por átomos unidos por forças químicas - continua a ser central para programas de pesquisa como, por exemplo, a nanotecnologia, através do qual cientistas tentam “reconstruir o mundo - molécula por molécula”⁴. Essa idéia clássica e mecanicista de molécula tem sido usada com sucesso em várias áreas relacionadas com a química. Perutz, por exemplo, recorre a ela ao descrever o mecanismo pelo qual moléculas de oxigênio reversivelmente se ligam e são liberadas de moléculas de hemoglobina⁵.

No entanto, para vários tipos de molécula que apresentam comportamentos descritos como não-rigidez estereoquímica e fluxionalidade, não é possível escrever uma estrutura única, com uma geometria fixa. Nas moléculas de PF₅, por exemplo, há uma mudança constante do átomos de flúor entre as posições equatoriais e axiais, em relação ao átomo central de fósforo. Além disso, a aplicação da mecânica quântica à química também resulta num conceito não-clássico de molécula, consequência da teoria de orbital molecular. Essa teoria sugere que a molécula possa ser considerada como uma unidade, um

tipo de nuvem eletrônica polinuclear e não apenas como uma estrutura resultante da união de átomos individuais. Há ainda que se considerar a natureza relacional de muitas propriedades químicas, que nos obriga a pensar essas propriedades como resultantes das interações entre moléculas e não como dependentes unicamente da composição e da geometria característica de cada molécula. Em outras palavras, nós não podemos substancializar essas propriedades químicas.

Para entender a química contemporânea, não podemos recorrer unicamente à noção clássica de molécula ou às seus contrapontos modernos: estruturas dinâmicas, polinucleares ou supramoleculares. Todas elas são visões complementares do mundo químico. Elas são complementares no sentido de que não podem ser aplicadas ao mesmo problema e também não podem, isoladamente, explicar todos os fenômenos químicos. Se olharmos para a fora da química, para a cultura cotidiana, tentando incorporar os resultados das pesquisas em ensino de ciências sobre concepções dos estudantes, essa complementariedade científica poderá ser expandida para incorporar outros significados num perfil conceitual completo da noção de molécula.

Na busca dessas partes do perfil, que não mais se mostram na cultura química, podemos recorrer também à história da ciência. A noção de princípios, como explicada nas obras de Aristóteles, Paracelsus e Libavius, sobrevive, de alguma forma, na homeopatia e no erbalismo. O substancialismo de se pensar que fenômenos macroscópicos - como dilatar, fundir e ferver - ocorrem também com átomos e moléculas, que é descrito em várias pesquisas sobre concepções de crianças e adolescentes, pode ser encontrado nos *minima naturalia* de Aristóteles, recuperadas e desenvolvidas como uma teoria das menores partículas na Idade Média em alguns dos cometários sobre a obra Aristóteles⁶. Num perfil alargado do conceito de molécula, que incorpore dimensões culturais do conceito, essas idéias podem ser colocadas lado a lado com idéias científicas. Antes de detalhar o que seria esse perfil, é necessário nos detemos um pouco na própria noção de perfil conceitual.

A noção de perfil conceitual

A idéia básica da noção de perfil conceitual, de que as pessoas podem apresentar diferentes maneiras de ver e representar o mundo, que são usadas em contextos diferenciados, é compartilhada por diferentes autores. Schutz, por exemplo, fala de um mundo social que “não é de modo algum homogêneo mas exibe uma estrutura multiforme. Cada uma de suas esferas ou regiões é, ao mesmo tempo, uma maneira de perceber e uma maneira de entender as experiências subjetivas dos outros”⁷. Berger e Luckmann⁸ complementam que existem diferentes formas de conhecimento correspondentes a diferentes realidades, a diferentes contextos sociais.

Essas concepções e categorias disponíveis nas diferentes esferas do mundo são usadas de forma similar por um grande número de indivíduos, o que possibilita a comunicação efetiva. Essas “representações coletivas”, no sentido usado por Durkheim⁹ em 1895, têm características supraindividuais, sociais, que são impostas à cognição individual pelo convívio social. De acordo com Kozulin¹⁰ Vygotsky teria se inspirado também nas representações coletivas de Durkheim ao apontar para a dimensão social dos processos mentais humanos.

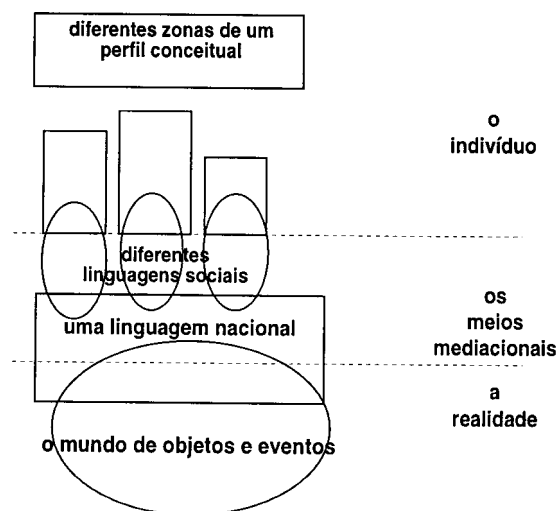
Marton, tendo por base a mesma idéia de representações coletivas, sugere a existência de “formas qualitativamente diferentes através das quais as pessoas entendem e percebem sua realidade”. Essas formas de entendimento não são qualidades individuais mas categorias de descrição que, em sua totalidade, denotam um tipo de intelecto coletivo. Marton afirma que “as mesmas categorias de descrição aparecem em situações diferentes. O conjunto das categorias é, portanto, estável e generalizável entre diferentes situações, mesmo se o indivíduo se mover de uma categoria a outra em diferentes ocasiões”¹¹.

Na *Filosofia do Não*, Bachelard apresenta a noção de perfil epistemológico, em que doutrinas filosóficas estão na base de diferentes formas de conceptualizar a realidade em termos de um mesmo conceito científico. Bachelard enfatiza que nenhuma doutrina filosófica, isoladamente, é suficiente para descrever todas as diferentes formas de pensamento que podem ser usadas para explicar um único conceito científico. Nas palavras de Bachelard, “um único conceito é suficiente para dispersar as filosofias e mostrar que elas são incompletas por estarem baseadas num único aspecto, iluminando apenas uma faceta.”¹². O autor sugere, ainda, que é possível que cada indivíduo desenhie seu próprio perfil para cada conceito científico. Ao fazê-lo, esse indivíduo alcança um melhor entendimento do mundo.

A noção de *perfil conceitual*, como descrita em meu artigo de 1995 em *Science & Education*¹³, compartilha com o perfil epistemológico de Bachelard a idéia de que uma única forma de pensamento é insuficiente para lidar com um único conceito. Mas eu considero que cada zona de um perfil conceitual tem, ao lado de suas características epistemológicas, seus componentes ontológicos. Além disso, não estamos procurando uma maneira de entender conceitos primitivos unicamente para ultrapassá-los, como no racionalismo do perfil bachelardiano. Nós estamos mais interessados em descrever o processo de conceptualização numa maneira que seja coerente com a idéia de que diferentes visões de mundo possam ser complementares. Nesse sentido, a noção de *heterogeneidade*, apresentada por Tulviste (1986) na sua descrição do pensamento verbal e discutida por Wertsch (1991) em seu *Voices of the Mind*, pode nos ajudar a organizar um perfil conceitual que tenha por base a idéia de complementariedade. A noção de heterogeneidade compartilha da mesma idéia geral de formas qualitativamente diferentes de pensamento. De acordo com Tulviste, “em qualquer cultura e em qualquer indivíduo não existe uma única forma homogênea de pensamento verbal”¹⁴. Tulviste descreve três modalidades que a heterogeneidade do pensamento verbal pode assumir, relacionadas à existência ou não de uma hierarquia genética entre elas. Numa dessas modalidades, a *heterogeneidade apesar da hierarquia genética*, diferentes formas de pensamento verbal podem ser hierarquizadas geneticamente, o que significa que algumas dessas formas são posteriores e podem ter evoluído das formas anteriores. No entanto, o fato de que algumas formas sejam posteriores não significa que elas sejam necessariamente mais poderosas. Nas palavras de Wertsch, “essa posição pode ser resumida dizendo que, embora algumas formas de funcionamento emergjam depois das outras, as últimas não são inerentemente melhores”¹⁵.

Essa noção de heterogeneidade apesar da hierarquia genética se ajusta perfeitamente com os diferentes conceitos de molécula a que já nos referimos. Embora a visão quântica, por exemplo, tenha aparecido mais tarde no desenvolvimento do conceito e seja mais complexa, ela não é inerentemente melhor que a visão clássica, já que existem contextos em que a última é mais apropriada como ferramenta explicativa do que a primeira. Se corremos o risco de cruzar as fronteiras da ciência em direção à cultura cotidiana, poderemos encontrar as primeiras zonas de um perfil conceitual de molécula: a zona dos ‘princípios’ e a ‘substancialista’. Essas duas zonas são geneticamente anteriores mas não inerentemente piores, uma vez que existem contextos culturais em que elas parecem funcionar tão bem ou mesmo melhor do que as idéias científicas.

Cada zona num perfil conceitual oferece uma forma de ver o mundo que é única e diferente das outras zonas. É como se olhássemos o mundo através de lentes que apresentam toda a realidade de uma maneira específica. Cada zona conceitual corresponde a meios mediacionais diferentes, a teorias e linguagens diferentes, cada qual revelando o mundo a sua maneira. A realidade não pode ser entendida inteiramente apenas sob uma perspectiva. Apenas um ponto de vista complementar pode oferecer uma descrição mais completa da realidade. Na figura 1



apresentamos um diagrama que tenta sintetizar essas características de um perfil conceitual qualquer.

O perfil conceitual de molécula

Ao explorar as zonas que constituem o perfil conceitual de molécula, faremos várias incursões pela história da ciência, já que todas as zonas no nosso perfil têm seu desenvolvimento histórico. No entanto, não temos a pretensão de fornecer um histórico detalhado do conceito de molécula, mas apenas usar a história para ilustrar a gênese das categorias que constituem as diferentes zonas do perfil desse conceito.

Para delimitar as zonas do perfil de molécula usaremos, também, os resultados das pesquisas em concepções de crianças e adolescentes. A noção de perfil conceitual tenta interpretar os resultados dessas pesquisas como formas de pensar individuais que têm um substrato cultural. Apesar de culturalmente enraizadas, essas formas de pensar mostram variações de indivíduo para indivíduo, já que a internalização de formas sociais de pensamento não é um processo passivo, pois o sujeito se apropria desse universo cultural na ótica das suas experiências, idéias e valores. No entanto, o substrato cultural dessas concepções está registrado na maneira como nos referimos, na linguagem cotidiana, aos diversos fenômenos que foram objeto da pesquisa sobre concepções de estudantes.

A primeira zona de um perfil conceitual de molécula: os ‘princípios’.

A primeira zona do perfil poderia ser identificada com a idéia dos ‘primeiros princípios’. Aristóteles (384-322 B.C.), discutindo os sistemas dos filósofos pre-socráticos, argumenta que há algo comum a todos eles. Nas palavras de Aristóteles, “todos os pensadores postularam seus elementos, ou ‘princípios’, como eles o chamam; e, embora eles não forneçam uma razão para esses ‘princípios’, no entanto nós achamos que eles estão realmente falando de pares contrários”¹⁶. Aristóteles mantém que esses princípios antitéticos precisam de algo onde atuar, um princípio passivo como o substrato não-antitético no qual ajam os princípios antitéticos¹⁷. Os quatro elementos (água, terra, fogo e ar) são os constituintes de todos os corpos sublunares mas, nas palavras de Aristóteles, “eles não podem ser aceitos como a matéria primordial, pois eles têm características antitéticas e podem ser transmutados uns nos outros por mudanças antitéticas”¹⁸. De acordo com Aristóteles, cada ser material era composto por um matéria primordial e uma forma de ser. Ao distinguir entre ‘matéria’ e ‘forma’, embora elas nunca existissem isoladamente, e ao assumir que a matéria “representa a não-existência incidental

de atributos”¹⁹, Aristóteles deixava claro que os princípios antitéticos não eram materiais.

O sistema de Aristóteles exerceu uma forte influência em vários outros sistemas de filosofia natural por quase dois mil anos. A idéia de princípios não-materiais e de transmutação teve um importância particular para a alquimia. Talvez influenciados pela idéia de duas exalações - seca e úmida - ou talvez pelo acúmulo considerável de conhecimento em metalurgia, enxôfre e mercúrio se tornaram importantes princípios em todas as versões da alquimia - helênica, árabe, chinesa e européia. Para a alquimia, enxôfre é o princípio da combustibilidade. Todas as coisas inflamáveis têm alguma forma de enxôfre. Mercúrio é o princípio da fusibilidade, a qual era considerada a mais importante propriedade dos metais - a possibilidade de se tornar líquido e ser moldado.

Paracelso (1493-1541) acrescentou sal ao mercúrio e enxôfre para formar a *tria prima*. Sal era considerado o princípio da solubilidade na água, da cristalinidade e da manutenção da saúde, já que era pelas salgas que os alimentos eram conservados. É curioso notar que a trindade de mercúrio, enxôfre e sal é o análogo exato do triângulo proposto por Ketelaar para representar as possibilidades das ligações químicas. Afinal, mercúrio é um metal, enxôfre uma substância molecular com ligações covalentes e sal um composto iônico.

A idéia de princípios imateriais continuou a exercer influência bem depois de Paracelso e pode ser encontrada mesmo em Libavius (1540-1616). Seu *Alchemia*, publicado em 1597, é considerado um marco bibliográfico na química²⁰. No lugar do discurso alegórico e enigmático, muito comum nessa época aos livros de alquimia, Libavius escreveu numa linguagem clara, explicando as operações da química de numa forma muito sistemática. De acordo com Libavius, a química (alchemia) poderia ser dividida em duas partes: *Encheria*, que lidava com as operações químicas, e *chymia*, o estudo das combinações químicas, através de uma abordagem descritiva para as reações químicas. Christie & Golinski²¹ chamam a atenção para um aspecto interessante da *Alchemia*. *Encheria* compreende duas classes de operações: as *elaborações* and as *exaltações*. As operações classificadas como *elaborações* são aquelas que juntam e separam as partículas materiais dos diferentes corpos. As *exaltações*, no entanto, são operações capazes de modificar as qualidades de um corpo sem afetar a matéria. Qualidades de um corpo independentes da matéria não são nada mais do que princípios imateriais. Christie & Golinski, ao compararem o esquema de operações de Libavius com um outro, de um autor anônimo de meados do século XVII, notaram que os esquemas eram muito similares, usando a mesma idéia geral para classificar as operações. Entretanto, não havia mais nenhuma operação do tipo das *exaltações*. O mecanicismo já havia, nessa época, se estabelecido na ciência, não deixando nenhum espaço para qualidades ou princípios imateriais. Desde essa época, essas idéias desapareceram do pensamento científico.

A idéia de princípios imateriais, no entanto, pode ainda ser encontrada fora da cultura científica, por exemplo em medicina alternativas como a homeopatia e o erbalismo. A idéia homeopática de intensificação terapêutica através de diluições centesimais sucessivas significa que um remédio se torna mais e mais eficaz através de uma diluição sequencial. Cada dinamização inclui a diluição do remédio até a centésima parte da concentração original e sua agitação, feita em número e formas prescritas. Se tomarmos como exemplo a 30ª dinamização centesimal, estaremos lidando com algo que foi diluído a (1/100)³⁰ ou 1/10⁶⁰ da concentração original. Se a concentração inicial fosse 1 mol/L, teríamos algo que é 1 x 10⁻⁶⁰ mol/L. Esse número é infinitamente pequeno. Para se ter uma única molécula nós precisaríamos de 10³⁶ litros de solução, ou seja, 10³³ metros cúbicos. Supondo um recipiente cúbico, existe uma molécula do remédio diluída num cubo com 10¹¹ metros de aresta, o que corresponde, aproximadamente, à distância entre

a Terra e o Sol. Um cubo dessa dimensão com apenas uma molécula do princípio ativo. A atividade de um remédio homeopático não pode ser explicada por um princípio material.

Não temos a intenção de criticar a homeopatia mas apenas de mostrar que, de certa forma, a idéia de princípios imateriais sobrevive nessa prática médica. Homeopatia e erbalismo têm se tornado cada vez mais populares, mesmo entre cientistas. As premissas para sua eficácia estão fora do escopo dos conceitos científicos, mas elas parecem funcionar para milhares e milhares de pessoas ao redor do globo. Na perspectiva do perfil conceitual, poderíamos dizer que, embora os princípios da homeopatia sejam anteriores, eles não são inerentemente piores do que o pensamento científico, pelos menos numa visão cultural ampla, uma vez que eles podem funcionar bem em certos contextos.

Substancialismo: a segunda zona do perfil conceitual de molécula

Embora na química moderna não sejam mais atribuídas às moléculas individuais propriedades como dilatação ou fusibilidade, o substancialismo ainda sobrevive na linguagem química cotidiana, principalmente quando lidamos com energia dos processos químicos ou com propriedades relacionais. ‘Calor latente de fusão’ e ‘capacidade calorífica’ são exemplos da substancialização da energia na linguagem da química. Frequentemente nos referimos a alimentos ou a combustíveis como materiais que têm energia armazenada nas suas ligações químicas. Livros didáticos de Bioquímica explicam que energia (substancializada) é liberada quando uma ligação P-O é quebrada numa molécula de ATP. A definição de molécula citada na maioria dos handbooks e dicionários - “a menor quantidade unitária de matéria que pode existir por si mesma e que retém todas as propriedades da substância original” (*CRC Handbook of Chemistry and Physics*) - é substancialista, uma vez que as moléculas não “retêm todas as propriedades da substância original”. Uma molécula não se funde. Um átomo de cobre não é vermelho-castanho ou maleável. Substancialismo, portanto, é uma zona importante do perfil para a própria ciência, uma vez que seu uso atômico e quase inconsciente na linguagem química pode produzir confusão, levando os químicos e, principalmente, os estudantes de química, a cometerem erros.

Nós podemos também encontrar o substancialismo na filosofia grega. Anaxágoras (500?-428 B.C.) usava a idéia de ‘sementes’ relacionada às menores unidades da matéria. Embora Aristóteles não concordasse com a afirmação de Anaxágoras de que qualquer substância contém todos os tipos de sementes, mas é denominada em função do tipo de semente que nela predomina, ele admitia que deveria haver um limite para o aumento e para a diminuição de uma coisa²². De acordo com Aristóteles, as menores partículas de um dado tipo de matéria seriam todas idênticas, pois elas são determinadas pela natureza específica da substância em questão²³.

Aristóteles não desenvolveu uma teoria física das menores partículas para além de um argumento lógico contra a divisibilidade infinita da matéria. Alguns de seus comentaristas na Idade Média, no entanto, tentaram fazê-lo. Averroes (1126-1198), por exemplo, explicava que “quando removemos uma parte do fogo e repetimos essa ação muitas vezes, nós finalmente alcançamos uma quantidade tal que, se a dividíssemos mais, o fogo pereceria, porque há uma certa quantidade mínima de fogo”²⁴. Scaliger (1484-1558) também é explicitamente substancialista em sua interpretação de Aristóteles. Seguindo Averroes, ele afirmava que maciez e aspereza, por exemplo, são propriedades dos próprios *minima*. Ele, no entanto, distinguia entre propriedades da matéria que dependiam dos *minima*, como maciez e aspereza, e outras que, como densidade, dependeriam da forma como os *minima* eram unidos. Nas palavras de Scaliger, “granizo tem a mesma aspereza da chuva, mas é

mais denso. Neve tem a mesma aspereza da chuva, mas é menos densa. Ainda, a matéria de todas elas é a mesma”²⁵.

É possível encontrar o substancialismo também na tradição mecanicista. Lemery (1645-1715), cujo “Cours de chymie”, publicado no fim do século XVII, foi um dos mais populares livros de química, usava a teoria corpuscular de Descartes, que afirmava que as propriedades da substância dependem principalmente da forma de suas partículas. Lemery, conseqüentemente, atribuía as propriedades dos ácidos à forma pontiaguda de suas partículas²⁶.

A importância do substancialismo reside no fato de que, embora se possa pensar que ele não faz mais parte da doutrina da química moderna, ele se mantém vivo na textura sutil da linguagem e práticas cotidianas da química. Diferentemente da primeira zona do perfil, cujos ‘princípios’ só sobreviveram fora da cultura científica, o substancialismo sobrevive nas sombras da linguagem química e pode confundir os estudantes. Além disso, as pesquisas em idéias de crianças e adolescentes têm mostrado que estudantes de diferentes países usam um atomismo substancialista, dilatando, fundindo ou fervendo as próprias partículas ao representar modelos para esses fenômenos²⁷. Ao tornar-nos conscientes dessa zona em nosso próprio perfil, poderemos evitar as armadilhas da linguagem habitual.

A terceira zona do perfil de molécula: átomos geometricamente arranjados

A química clássica vai conceber a molécula com a menor unidade na qual uma substância pode ser dividida sem que haja uma mudança na sua natureza química. De acordo com esse conceito clássico, as propriedades de qualquer corpo material dependem da quantidade e tipos de átomos, da maneira como eles estão ordenados - sua topologia - e da maneira como eles estão arranjados no espaço - sua geometria. Vamos mostrar, suscintamente, a gênese dessas três características do conceito.

Os origens dessa visão clássica podem ser encontradas no atomismo de Demócrito (460?-370? B.C.), que era essencialmente mecanicista e não-substancialista. As diferenças em tamanho, forma e posição dos átomos seriam responsáveis por todas as diferenças que percebemos nas coisas. Nas palavras de Demócrito, “conforme a convenção dos homens existem a cor, o doce, o amargo; em verdade, contudo, só existem os átomos e o vazio”²⁸.

Em 1803, Dalton (1766-1844) apresentou o que é geralmente aceito como a primeira teoria atômica aplicada à química. Nesse tempo, o atomismo já tinha sido bem difundido através do trabalho de Pierre Gassendi (1592-1655) e havia sido usado por vários cientistas importantes como, por exemplo, Galileu (1564-1642) Boyle (1627-1691) e Newton (1642-1727). Ao assumir que o peso era a propriedade fundamental que poderia distinguir átomos de diferentes elementos químicos, Dalton abriu um programa de pesquisa frutífero. Contudo, o atomismo esteve imerso em controvérsia e confusão por todo o século XIX. Nem todos os cientistas adotaram o programa daltoniano, como o fez Berzelius (1779-1848) na sua procura por pesos atômicos. Os pesos equivalentes de Leopold Gmelin (1788-1853) eram muito mais utilizados pelos químicos, por volta de 1840, do que os pesos atômicos de Berzelius. Dumas (1800-1884), in 1836, escrevia que “se eu tivesse poder para fazê-lo, eu apagaria da ciência a palavra **átomo**, persuadido de que ela vai além da experiência e de que em Química jamais devemos ir além da experiência”²⁹.

Mesmo aqueles que haviam adotado o programa atomista não estavam de acordo em muitos pontos. A hipótese de Avogadro (1811), que explicava as leis de volumes de gases combinantes, de Gay-Lussac, fazia uma clara distinção entre átomos e moléculas mas não pode ser aceita por Dalton ou Berzelius. Ambos tinham dificuldades em admitir, no contexto de suas teorias, que a molécula de um elemento pudesse ser

diatômica. O dualismo eletroquímico de Berzelius, que explicava a afinidade em termos de diferenças nas cargas elétricas dos átomos, proibia átomos de um mesmo elemento de atrair um uns aos outros, uma vez que eles possuíam a mesma carga elétrica. Dalton, por sua vez, imaginava que a atmosfera repulsiva de calórico dos átomos iguais impediria que eles formassem moléculas diatômicas. Apenas em 1860, após o Congresso de Karlsruhe, a confusão em torno de átomos, moléculas e pesos atômicos começou a se dissipar. Nesse congresso Cannizzaro mostraria os meios para se determinar pesos moleculares e, portanto, fórmulas acuradas, tendo por base a hipótese de Avogadro, acabando com meio século de disputa e confusão.

Uma outra contribuição fundamental para o conceito clássico de molécula foi o fenômeno de isomerismo, enunciado por Berzelius em 1830. Nas palavras de Berzelius, “os mesmos elementos, unidos no mesmo número, mas de modo diferente (talvez numa posição diferente dos átomos), produzem compostos de propriedades e formas diferentes”³⁰. Desde então, considera-se que as propriedades das substâncias dependem não apenas do número e do tipo de átomos mas também da forma como eles estão ordenados na molécula.

A terceira peça fundamental desse quebra-cabeças - que as propriedades das substâncias também dependem da geometria da molécula - emergiu no contexto de um intenso trabalho em vários conceitos que originariam a química estrutural. Na química orgânica haviam sido desenvolvidas várias teorias de tipos substituintes, os quais formariam a base para o posterior desenvolvimento do conceito de valência por Kekulé (1829-1896) e Couper (1831-1892). Os trabalhos de Le Bel (1847-1930) e Van’t Hoff (1852-1911) em compostos oticamente ativos, levariam à conclusão de que, ao se ligar quatro átomos ou grupo de átomos diferentes no átomo de carbono, os quatro substituintes poderiam ser arranjados em duas maneiras diferentes. As duas moléculas resultantes seriam diferentes, cada uma sendo imagem especular da outra. A representação tetraédrica do átomo de carbono abria a possibilidade de se representar moléculas como objeto reais, com os átomos dispostos num arranjo geométrico, que poderia ser expresso por um polígono que os conectasse.

Essa idéia de molécula seria basicamente preservada nas primeiras tentativas de se desenhar moléculas levando em consideração a estrutura eletrônica do átomo. As fórmulas de Lewis lidavam com as ligações químicas como pares eletrônicos orientados no espaço, sugerindo uma forma de tratar a formação de ligações que seria basicamente preservado nas primeiras tentativas de se aplicar a mecânica quântica à estrutura molecular, no contexto do Método de Ligação de Valência (VB). A multiplicidade de estruturas de ressonância, característica do método VB, é devida à impossibilidade de uma tradução literal da hipótese de Lewis em termos de uma função de onda, uma vez que todos os elétrons pertencem ao mesmo edifício molecular e não podem ser arranjados em pares de uma maneira única e predeterminada. Isso obriga o método VB a levar em consideração todas as possíveis maneiras de se formarem pares de elétrons, o que resulta na multiplicidade de estruturas de ressonância³¹.

Essa visão clássica da estrutura molecular, como um agrupamento de átomos geometricamente arranjados, deu à química um modelo com alto poder explanatório, aplicável a problemas moleculares não apenas em química mas também nas ciências físicas e biológicas. Um bonito exemplo é a explicação fornecida por Perutz para o mecanismo pelo qual a hemoglobina, reversivelmente, forma e quebra ligações com moléculas de oxigênio. Perutz recorre a um mecanismo disparador, no qual a transição entre as chamadas estruturas *T* e *R* da hemoglobina, consistindo principalmente da rotação de um par de alfa e beta subunidades em respeito ao outro par, provoca o movimento do heme ferro no plano do anel da porfirina. Nas palavras de Perutz, “uma vez que o heme ferro tenham descido

no plano ele pode ser ligado a uma molécula de oxigênio. Na transição reversa (de *R* para *T*) o ferro é puxado do plano e o oxigênio não pode segui-lo por que choca-se contra os átomos de nitrogênio da porfirina³². Essa abordagem essencialmente mecanicista à biologia molecular só é possível quando se considera que a estrutura molecular é um arranjo geométrico de átomos.

Química Contemporânea: trazendo novas zonas para o perfil de molécula

A característica essencial da estrutura molecular clássica é sua geometria fixa, descrita como a poligonal que une átomos que vibram em torno de suas posições. Muitas moléculas, no entanto, não podem ser descritas como possuindo uma geometria única.

Nós já mencionamos PF₅ como uma exemplo de comportamento fluxional. Entre muitos exemplos mais recentes, gostaríamos de mencionar alguns *clusters* de ouro (I) trissubstituídos, como Au₁₁L^{7-x}L_x(SCN)₃, onde L = P(C₆H₅)₃ e L' = P(*p*-CIC₆H₄)₃. O espectro RMN desses *clusters* mostra a redução a um só sinal à medida que a temperatura aumenta, o que caracteriza a equivalência dos núcleos³³. O que nós interessa nesse tipo de comportamento é a evidência que ele fornece para não-necessidade da correspondência entre as propriedades de uma material e uma estrutura molecular fixa. É óbvio que os químicos há muito consideram as propriedades dinâmicas da estrutura molecular como necessárias para a interpretação de espectros. Entretanto, a não-rigidez estereoquímica requer que se admita algo que vai além de rotações e oscilações ligeiras.

Uma outra evidência para a natureza dinâmica da estrutura molecular vem de estudos de trocas isotópicas. Ao se misturar iguais quantidades de vapor de H₂O e de D₂O obtém, num período muito curto de tempo, um sistema com aproximadamente 50% de moléculas de HDO.

A química contemporânea também vai além da química clássica ao admitir que uma molécula pode ser descrita sem se referir ao seus átomos constituintes. Na teoria de orbital molecular (MO), o uso de funções LCAO (combinação linear de orbitais atômicos) é meramente uma questão de comodidade, e não uma característica mandatária do esquema. Em contraste com o método de ligação de valência, a deslocalização aparece naturalmente no método de orbital molecular. Isso significa que não é necessário recorrer a artifícios como a ressonância para permitir a deslocalização de, pelo menos, alguns dos elétrons. Nós somos obrigados, no entanto, a impor correções em sentido oposto ao descrever alguns elétrons como localizados.

Woolley³⁴ vai mais longe ao questionar se a noção de estrutura molecular pode ser deduzida da mecânica quântica. Os métodos da química quântica aplicados à estrutura molecular se baseam na aproximação Born-Oppenheimer, que trata os núcleos atômicos como fixos. A abordagem de Woolley para a estrutura molecular, sem a essa aproximação, traz uma nova e desconcertante visão da estrutura molecular como uma coleção de núcleos e elétrons deslocalizados na qual todas as partículas idênticas são indistinguíveis³⁵.

Além disso, várias propriedades químicas não podem ser reduzidas a propriedades substanciais. Acidez e basicidade, comportamento redox, efeitos de solventes em reações, são apenas alguns exemplos de propriedades químicas relacionais que dependem da interação entre moléculas e não unicamente da estrutura de uma espécie isolada. Mesmo ácidos minerais fortes com os ácidos sulfúrico e clorídrico podem se comportar como bases quando em presença de poderosos doadores de prótons, como os superácidos. Nesses últimos, ácidos fracos como HF e SbF₅ podem se transformar numa ácido muito mais forte apenas sendo misturados. Essa mistura é ainda mais fortemente ácida na presença de SO₃. Também a energia de processos químicos só pode ser entendida em termos relacionais, pois

depende da quebra e da formação de ligações. A estrutura molecular é, portanto, algo dinâmico que não pode ser considerado apenas como um grupo de átomos cujo número, tipo e arranjo geométrico determinam todas as suas propriedades químicas.

Admitir a natureza relacional das propriedades químicas nos leva a subscrever as reservas de muitos cientistas de nosso tempo em relação ao programa reducionista. O reducionismo tenta nos persuadir a acreditar que todos os aspectos da natureza devem ser reduzido a algumas leis físicas fundamentais. Como Philip Anderson tão bem notou, "a habilidade de reduzir tudo a leis fundamentais simples não implica a habilidade de começar por essas leis e reconstruir o universo"³⁶. Anderson também enfatiza dois aspectos indesejáveis que são muito comuns ao reducionismo: primeiro, ele tende a considerar a maioria das áreas científicas como relativamente de menor importância, e a julgar suas questões específicas como meros exemplos ou aplicações triviais do trabalho realmente importante desempenhado por uma elite. Em segundo lugar, essa arrogância, se já é insuportável no caso de alguns físicos, se torna muito perigosa quando vem, nas palavras de Anderson, "de biólogos moleculares que parecem determinados a reduzir qualquer coisa sobre o organismo a 'apenas' química, de um resfriado comum, ou das doenças mentais até o instinto religioso"³⁷.

CONCLUSÕES

Aplicar a noção de perfil conceitual ao conceito de molécula coloca em questão a universalidade e independência de contexto de uma idéia central em química. A necessidade de visões complementares para a estrutura molecular, aplicáveis a contextos diferentes, traz a tona importantes questões para o entendimento e para o ensino da química.

Tratar os conceitos químicos, da mesma forma como o fizemos em relação ao conceito de molécula, como dispersões conceituais ao longo de um perfil contendo várias zonas, nos dá a vantagem de perceber porque a maneira como abordamos o mundo é fortemente influenciada pelo contexto com o qual estamos lidando. No perfil específico de molécula, a interpretação realística parece ser uma obstáculo recorrente. Desde os velhos tempos de Lemery, quando as partículas eram miniaturas de substâncias, nós passamos a considerar os edifícios moleculares como algo real. Após a descoberta do elétron e o impacto da química quântica, nós continuamos a tentar nos apoiar em interpretações realísticas das ligações químicas ou dos próprios orbitais moleculares. Um bom exemplo de como isso acontece mesmo com químicos quânticos experimentados é a passagem de C.A. Coulson, em que ele diz:

*"Eu descrevi uma ligação, uma ligação química simples; eu forneci vários detalhes de seu caráter (e poderia der dado muitos mais). Às vezes me parecia que uma ligação entre dois átomos tinha se tornado tão real, tão tangível, tão amigável, que eu quase poderia vê-la. E então eu despertava com um pequeno choque: pois uma ligação química não é uma coisa real; ela não existe; ninguém jamais a viu, nem jamais verá. É uma ficção da minha própria imaginação"*³⁸.

Essa recorrência a interpretações realísticas pode ser entendida se nos lembrarmos que existe uma forte tendência a recorrer à visões familiares quando se enfrenta novos problemas, o que permite que o novo seja traduzido no velho esquema. Além disso, o perfil conceitual de molécula fornece evidências de que abordagens realísticas à problemas moleculares podem coexistir com outras interpretações mais complexas e dinâmicas. Numa dimensão cultural mais ampla, mesmo práticas médicas alternativas, como a dinamização em homeopatia, podem ser consideradas como aceitáveis por alguns cientistas quando enfrentam problemas de saúde. Nós não somos cientistas em todos os momentos de nossa existência, e visões aparentemente contraditórias podem existir num perfil individual, já que nós não as usamos no mesmo contexto.

O realismo parece ser um obstáculo bidimensional, tanto epistemológico como ontológico. As considerações realísticas sobre os orbitais atômicos de valência do carbono retardam o entendimento e a aceitação de resultados contemporâneas, como por exemplo a possibilidade de se sintetizar compostos de carbono penta- e hexa-coordenados, como os clusters de ouro (I) $\{[R_3PAu]_4CR\}^+$, $\{(C_6H_5)_3PAu_5C\}^+$, and $\{(C_6H_5)_3PAu_6C\}^{2+}$, preparados por Schmidbaur e colaboradores³⁹. Os mesmos pesquisadores também divulgaram a síntese de clusters de ouro (I) que incluem um átomo de nitrogênio penta-coordenado. Assim, a noção de que os quatro elétrons de valência do carbono limitam as possibilidades desse átomo em formar ligações, tanto estequiométrica como geometricamente, nos parece um grande obstáculo ontológico. Por outro lado, a substancialização de propriedades químicas parece ser um obstáculo mais de natureza epistemológica, como discutido por Bachelard em *La formation de l'esprit scientifique*⁴⁰.

A tomada de consciência de seu próprio perfil pode ajudar um químico a ter uma melhor entendimento das diferentes formas usadas pela ciência quando enfrenta problemas diferentes. Isso é particularmente importante quando pensamos no ensino de química, uma vez que o estudante dificilmente admite essa multiplicidade de significados como algo natural na ciência. Pelo contrário, influenciados por anos de convívio com uma cultura escolar que aponta para outra direção, os estudantes tendem a admitir que conceitos científicos são únicos e bem definidos. Isso pode levá-los a interpretar todas as entidades químicas como objetos reais. Os livros didáticos normalmente apresentam a química como povoada por orbitais, ligações e anéis, todos reais. Ao mostrar que o realismo sozinho não pode explicar todas as propriedades químicas nós poderemos ajudar os estudantes a terem a mente aberta para outras direções frutíferas.

A noção de perfil conceitual é uma contribuição desenvolvida dentro da área de ensino que pode ajudar a entender a dinâmica evolutiva dos conceitos químicos. Aplicar essa noção ao ensino de química em todos os níveis pode ajudar os estudantes a entender a diversidade e favorecer seus contatos com as fronteiras da química. Pensar as linhas evolutivas dos conceitos químicos, como dissemos no início desta conferência, significa pensar a Química para além de suas fronteiras em duas direções. Numa delas nos deparamos com a vida cotidiana e sua "ciência" automática, quase inconsciente, dispersa, ao mesmo tempo útil, porque culturalmente enraizada. Na outra direção encontraremos o novo e o desconhecido. Cabe ao ensino da química, nos diversos níveis, tentar construir os elos que conectem essas fronteiras, reduzindo a distância entre a vida cotidiana e a ciência contemporânea.

AGRADECIMENTOS

Esse trabalho foi realizado com suporte financeiro do CNPq, CAPES (PADCT-SPEC) e Pró-Reitoria de Pesquisa da UFMG.

REFERÊNCIA E NOTAS

1. Conferência apresentada na 19ª Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Química. Poços de Caldas, MG, 27 a 30 de maio de 1996.
2. Mortimer, E. F.; *Science & Education* **1995**, *4*, 267.
3. Mortimer, E. F. e Amaral, L. O. F.; 1996 Conceptual Profile of Molecule and Molecular Structure. Proceedings of the International Conference on Philosophy of Chemistry and Biochemistry and Adjacent Historical Problems. Atenas, Grécia, 04 a 07 de abril de 1996 (*in press*).
4. Regis, E.; *Nano - the emerging science of nanotechnology: remaking the world - molecule by molecule*. Boston: Little, Brown and Company, 1995.
5. Perutz, M. F.; *Scientific American* **1978**, *239*, 68.

6. Van Melsen, A. G.; *From atomos to atom: The History of the Concept Atom*. Pittsburg, Duquesne University Press, 1952.
7. Schutz, A.; *The phenomenology of the social world*. New York: Northwestern University Press, 1967. Translated from *Der Sinnhafte Aufbau der Sozialen Welt*, 1932, by Geroge Walsh and Frederick Lehnert. p. 139.
8. Berger, P. L. e Luckmann, T.; *The Social Construction of Reality: A Treatise in the Sociology of Knowledge*, London, Allen Lane, 1967.
9. Durkheim, E.; *Selected Writings*, Cambridge University Press, Cambridge, 1972 (original work published in 1895).
10. Kozulin, A.; *Vygotsky's Psychology: A biography of ideas*, Harvester Wheatsheaf, New York, 1990.
11. Marton, F.; *Instructional Science* **1981**, *10*, 177.
12. Bachelard, G.; *The philosophy of No*, New York, The Orion Press, 1968. Translated from *La philosophie du non*, 1940, by G. C. Waterston. p. 34.
13. Vide nota 2.
14. Tulviste, 1986, p. 19, apud Werstch, 1991, p. 96.
15. Wertsch, J. V.; *Voices of the mind: a sociocultural approach to mediated action*. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1991, p. 97.
16. Physics, I-v.; in Aristotle. *Physics: books I-IV*. Cambridge, Ma, Harvard University Press; London, Heinemann, 1980. Translated by P. H. Wicksteed and F. M. Cornford.
17. Physics, I-vi.
18. Physics, I-vii.
19. Physics, I-ix.
20. Hannaway, O.; *The chemists and the World: The Didactic Origins of Chemistry*. Baltimore/London, Johns Hopkins University Press, 1975.
21. Christie, J. e Golinski, J. V.; *History of Science* **1982**, *20*, 235-266.
22. Physics, I-vi., in Aristotle. *Physics: books I-IV*. Cambridge, Ma, Harvard University Press; London, Heinemann, 1980. Translated by P. H. Wicksteed and F. M. Cornford.
23. Van Melsen, A. G.; *From atomos to atom: The History of the Concept Atom*. Pittsburg, Duquesne University Press, 1952.
24. Averroes; *Phys. viii*, comm. 44, apud Van Melsen, 1952.
25. Scaliger, apud Van Melsen, 1952, p. 75.
26. Leicester, H. M. e Klickstein, H. S.; *A Source Book in Chemistry: 1400 - 1900*. New York: McGraw-hill, 1952.
27. Há uma grande quantidade de artigos que relatam como as crianças e adolescentes usam idéias substancialistas na explicação de fenômenos físicos e químicos. Ver, por exemplo: Piaget, J. e Inhelder, B. *Le développement des quantités chez l'enfant. Conservation et atomisme*. Neuchâtel et Paris: Delachaux & Niestlé, 1941.; Doran, R.; Misconceptions of selected science concepts held by elementary school children. *Journal of Research in Science Education* **1972**, *9*, 127-137.; Nussbaum, J. and Novick, S. Junior High School Pupils' Understanding of the Particulate Nature of Matter: An Interview Study. *Science Education* **1978**, *62*, 273-281.; Nussbaum, J. The Particulate Nature of Matter in the Gaseous Phase. In Driver, R.; Guesne, E.; Tiberghien, A. (Ed.) *Children's Ideas in Science*. Milton Keynes: Open University Press, 1985.; Driver, R. Beyond appearance: The Conservation of Matter under Physical and Chemical Transformations. In Driver, R.; Guesne, E. e Tiberghien, A. (Eds.) *Children's Ideas in Science*. Milton Keynes: Open University Press, 1985.; Ben-Zvi, R. Eylon, B. e Silberstein, J. Is an atom of copper malleable? *J. Chem. Educ.* **1986**, *63*, 64-66.
28. Democritus Quot. 589, apud Kirk, G. S e Raven, J. E.; *The Presocratic Philosophers: A Critical History with a Selection of Texts*. Cambridge, Cambridge University Press, 1957, p. 422.

29. Apud Rheinboldt, H.; *História da Balança. A vida de J. J. Berzelius*. São Paulo, Nova Stella/EDUSP, 1988, p. 80.
30. Apud Rheinboldt, 1988, p.124.
31. Paoloni, L.; *Quim. Nova* **1980**, 3, 164.
32. Perutz, 1978, op. cit.
33. Steggerda, J. J.; Bour, J. J e Van Der Velden, J. W. A.; *Recl. Trav. Chim. Pays Bas* **1982**, 101, 164.
34. Wooley, R. G. J.; *Am. Chem. Soc.* **1978**, 100, 1073.
35. Weininger, S. J.; *Chemi. Educ.* **1984**, 61, 939.
36. Anderson, P. W.; **1972**, 177, 393.
37. Anderson, 1972, op. cit., p. 396.
38. Coulson, C. A.; *J. Chem. Soc.* 1955, p. 2084.
39. Grohmann, A.; Riede, J. e Schmidbaur, H.; *Nature* **1990**, 345, 140.
40. Bachelard, G.; *La formation de l'esprit scientifique: contribution a une psychanalyse de la connaissance objective*, Paris Vrin, 1938.