

# Uma Breve História da Geometria Molecular sob a Perspectiva Didático-Epistemológica de Guy Brousseau

**Kleyfton Soares da Silva**  
**Laerte Silva da Fonseca**  
**Johnnatan Duarte de Freitas**

## RESUMO

O objetivo desta pesquisa foi analisar a evolução histórica da Geometria Molecular (GM), de modo a apresentar discussões, limitações, dificuldades e avanços associados à concepção do saber em jogo e, através disso, contribuir com elementos para análise crítica da organização didática em livros e sequências de ensino. Foi realizado um levantamento histórico na perspectiva epistemológica defendida por Brousseau (1983), em que a compreensão da evolução conceitual do conteúdo visado pelo estudo é alcançada quando há o entrelaçamento de fatos que ajudam a identificar obstáculos que limitaram e/ou limitam a aprendizagem de um dado conteúdo. Trata-se de uma abordagem inédita tanto pelo direcionamento do conteúdo como pela metodologia adotada. A análise histórica permitiu traçar um conjunto de oito obstáculos que por um lado estagnou a evolução do conceito de GM e por outro impulsionou cientistas a buscarem alternativas teóricas e metodológicas para resolver os problemas que foram surgindo ao longo do tempo. O estudo mostrou que a questão da visualização em química e da necessidade de manipulação física de modelos moleculares é constitutiva da própria evolução história da GM. Esse ponto amplifica a necessidade de superação contínua dos obstáculos epistemológicos e cognitivos associados às representações moleculares.

**Palavras-chave:** Análise Epistemológica. Geometria Molecular. História da Química.

## A Brief History of Molecular Geometry from the Epistemological Perspective of Guy Brousseau

### ABSTRACT

The objective of this research was to analyze the historical evolution of Molecular Geometry in order to present discussions, limitations, difficulties and advances associated to the conception of the referred knowledge and, through this, contribute with elements for critical analysis of

---

**Kleyfton Soares da Silva** é Doutorando em Ensino de Ciências (modalidade Química) na Universidade de São Paulo (USP), Mestre em Ensino de Ciências e Matemática pela Universidade Federal de Sergipe (UFS) e Licenciado em Química pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Alagoas (IFAL). ORCID: 0000-0002-8526-961X. E-mail: kley.soares@hotmail.com

**Laerte Silva da Fonseca** é Pós-Doutor e Doutor em Educação Matemática, Professor Titular da Área de Educação Matemática do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Sergipe (IFS), Docente e Orientador do Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências e Matemática da Universidade Federal de Sergipe (PPGECIMA/UFS). ORCID: 0000-0002-0215-0606. E-mail: laerte.fonseca@ifs.edu.br

**Johnnatan Duarte de Freitas** é Doutor e Mestre em Química e Biotecnologia (Química Orgânica) pela Universidade Federal de Alagoas (UFAL), Docente do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Alagoas (IFAL). Departamento de Química. ORCID: 0000-0002-6977-3322. E-mail: johnnatandf@gmail.com

Recebido para publicação em 09 dez 2017. Aceito, após revisão, em 26 jul. 2018.

**DOI:** <https://doi.org/10.17648/acta.scientiae.v20iss4id3716>.

Acta Scientiae	Canoas	v.20	n.4	p.626-647	jul./ago. 2018
----------------	--------	------	-----	-----------	----------------

didactic organization in textbooks and sequences of teaching. A historical survey was made in the epistemological perspective defended by Brousseau (1983), in which the understanding of the conceptual evolution of the content targeted by the study is achieved when there is the interweaving of facts that help to identify obstacles that limited and / or limit the learning of a given content. This is an unprecedented approach both in terms of the content and methodology adopted. The historical analysis allowed us to draw a set of eight obstacles that on one hand stagnated the evolution of the concept of GM and on the other impelled scientists to seek theoretical and methodological alternatives to solve the problems that have arisen over time. The study showed that the issue of visualization in chemistry and the need for physical manipulation of molecular models is constitutive of GM's own evolution history. This point amplifies the need to continually overcome the epistemological and cognitive obstacles associated with molecular representations.

**Keywords:** Epistemological Analysis. History of Chemistry. Molecular Geometry.

## INTRODUÇÃO

Pesquisas que tratam da questão da visualização em química têm revelado a necessidade cada vez mais crescente da utilização de recursos pedagógicos capazes de representar a natureza tridimensional de conceitos abstratos da forma mais convincente possível. É o que tem ocorrido, por exemplo, em investigações de fenômenos didáticos sobre Geometria Molecular (GM), cuja utilização de modelos físicos alternativos e *softwares* diversos faz parte da maioria das metodologias de ensino aplicadas para fins de pesquisa (Gibin & Ferreira, 2010; Melo & Neto, 2012).

A tentativa de muitos pesquisadores parece repousar no argumento de que através do acesso a evidências científicas o professor possa mudar suas atitudes e passe a adotar estratégias que privilegiem o desenvolvimento de competências e habilidades não só relacionadas com o conteúdo semântico das representações químicas, mas também com a questão cognitiva.

Com efeito, Charbonneau (2013) chama a atenção para o fato da materialização de representações moleculares servir como uma facilitação cognitiva, em que a memória de trabalho é menos comprometida, levando a uma simplificação da visualização tridimensional.

No currículo da Educação Básica brasileira, o conteúdo de GM é comumente abordado no primeiro ano do Ensino Médio, provendo o aluno com a primeira experiência formalizada que subsidia o entendimento das moléculas como entidades pertencentes a um plano tridimensional.

Ao analisar trabalhos científicos recentes acerca do ensino e aprendizagem de GM (Bouson, 2015; Ramos, 2015; Silva, 2016), incluindo teses, dissertações e livros didáticos aprovados no Plano Nacional do Livro Didático de 2017, deparou-se com uma gama de discussões teóricas e metodológicas que visam à minimização das dificuldades dos alunos, como as destacadas a seguir:

1. Há uma preocupação importante quanto aos aspectos cognitivos envolvidos na aquisição de competências representacionais, como o desenvolvimento de habilidades visuoespaciais;

2. Alguns livros didáticos não consideram mecanismos cognitivos de aprendizagem de múltiplas representações referentes a modelos moleculares (não ilustram representações variadas e seus significados);

3. As dificuldades de aprendizagem e erros conceituais recorrentes derivam da falta de recursos pedagógicos que potencializem a visualização de fenômenos microscópicos;

4. As justificativas históricas e contextualização são pouco satisfatórias.

Nesse sentido, percebeu-se que abordagens históricas focadas na evolução dos conceitos da GM são pouco contempladas nas pesquisas desenvolvidas. Portanto, entender as características do saber em questão através da história é o principal objetivo deste estudo, que busca trazer à tona as principais discussões, limitações, dificuldades e avanços associados à concepção de GM.

Este texto é também uma contribuição àqueles que almejam conhecer os fundamentos históricos do conteúdo em tela e, através disso, olhar criticamente para a questão da organização didática em livros didáticos e sequências de ensino.

Quanto aos aspectos metodológicos, o levantamento histórico foi realizado na perspectiva epistemológica defendida por Brousseau (1983), em que a compreensão da evolução conceitual do conteúdo visado pelo estudo é alcançada quando há o entrelaçamento de fatos que ajudam a identificar obstáculos que limitaram e/ou limitam a aprendizagem de um dado conteúdo.

## **CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS E METODOLÓGICAS PARA A ANÁLISE HISTÓRICA**

A organização do conhecimento em torno das noções de geometria molecular passou por diversas reformulações até findar nos modelos apresentados pelos livros didáticos atuais. A evolução desse conhecimento dependeu, principalmente, do desenvolvimento de técnicas de investigação que resultassem em evidências empíricas acerca da estrutura da matéria, mais especificamente, em esclarecimentos das concepções de ligação química e arranjo espacial dos átomos e moléculas (estereoquímica).

Segundo Almouloud (2007), a análise epistemológica auxilia o pesquisador a entender melhor as relações entre os objetos de estudo e “controlar as variáveis didáticas relacionadas com o processo de ensino e aprendizagem de tais objetos” (Almouloud, 2007, p.156).

A análise do contexto histórico nesta pesquisa limita-se à realização de alguns procedimentos metodológicos apresentados por Brousseau (1983), cujo objetivo é a identificação de obstáculos epistemológicos que podem eventualmente estar relacionados com dificuldades conceituais recorrentes de um dado conteúdo. O autor enfatiza que a identificação e caracterização de um obstáculo são essenciais para a análise e construção de situações didáticas.

A noção de obstáculo epistemológico foi primeiramente discutida pelo francês Gaston Bachelard, caracterizando-o como a causa da estagnação do conhecimento científico. Em defesa do desenvolvimento de um espírito científico, Bachelard (1996, p.17) enfatiza que “o ato de conhecer dá-se contra um conhecimento anterior, destruindo conhecimentos mal estabelecidos, superando o que, no próprio espírito, é obstáculo à espiritualização”.

As ideias de Bachelard em torno das noções de obstáculos epistemológicos nortearam os estudos de Guy Brousseau sobre os obstáculos didáticos, levando-o a colocar os problemas de ensino e aprendizagem de conteúdos matemáticos em termos de questões históricas e epistemológicas do conhecimento. Ademais, os pressupostos teóricos de Piaget (1975) sobre o equilíbrio cognitivo e o papel do erro no processo de superação de um momento de desequilíbrio foram primordiais, junto com a noção de obstáculo epistemológico, para o desenvolvimento das pesquisas em didática da matemática.

Diante do exposto, Almouloud enfatiza que

[...] os conhecimentos saem de um estado de equilíbrio e passam por fases transitórias, nas quais os conhecimentos anteriores não funcionam bem. A superação desse momento de desequilíbrio, para um novo estágio de equilibração, significa que houve uma reorganização dos conhecimentos em que as novas aquisições foram integradas ao saber antigo. (Almouloud, 2007, p.129)

Com efeito, a produção de materiais didáticos e estratégias pedagógicas visando à aprendizagem efetiva pode ser pensada a partir da análise dos erros dos alunos (Almouloud, 2007). Os erros podem ser, portanto, importantes elementos de análise por trazer incoerências decorrentes da aprendizagem anterior, não sendo necessária a tentativa desesperadora de eliminação do erro sem antes considerar os fatores de ordem psicológica, didática e epistemológica envolvidos no processo de aquisição dos conhecimentos.

Brousseau (1983) ressalta que o erro considerado obstáculo não é aquele que é somente o efeito da ignorância, mas também de um conhecimento anterior que teve sua importância em um dado tempo e espaço, mas que agora pode ser inapto para o que se pretende alcançar. Para o referido autor, os obstáculos de origem epistemológica são, portanto, caracterizados como aqueles que “não se pode e nem se deve fugir pelo papel constitutivo que eles representam no conhecimento visado” (Brousseau, 1983, p.108).

Desse modo, um estudo dos obstáculos a partir de uma análise histórica é possível graças às evidências científicas construídas ao longo do tempo e institucionalizadas como conhecimentos relevantes para cada época.

Segundo Brousseau (1983), levando em consideração as discussões de Bachelard e Piaget, os obstáculos em didática podem ser: identificados na história; traçados a partir das dificuldades dos alunos; estudados visando à superação no contexto de sala de aula.

Tomando como inspiração as orientações de Brousseau (1989, 1998) para o estudo dos obstáculos a partir da história, buscou-se:

- a) descrever o conhecimento em torno da noção de geometria molecular e entender o seu uso;
- b) explicar quais vantagens ele trouxe em relação às utilizações anteriores, a quais práticas sociais e técnicas está associado, e se possível a quais concepções do campo da química;
- c) identificar essas concepções em relação a outras possíveis, especialmente aquelas que as sucederam, a fim de compreender as limitações, dificuldades e, finalmente, as causas do fracasso dessas concepções, mas ao mesmo tempo as razões de um equilíbrio que parece ter durado o tempo suficiente.
- d) identificar o momento e as razões para a quebra desse equilíbrio e, em seguida, considerar vestígios de resistência à rejeição por explicar possíveis sobrevivências de práticas ou concepções.
- e) procurar possíveis ressurgências, retornos inesperados, senão em sua forma inicial, pelo menos em formas similares e ver o motivo. (Brousseau, 1989, p.45, adaptação e tradução nossa)

Por fim, é importante frisar que discorrer acerca da história da química e, em especial, da evolução de um conteúdo específico, não é uma tarefa fácil. Por diversos motivos, nem sempre o reconhecimento popular de um determinado achado científico é atribuído a todos os estudiosos que se debruçaram sobre o problema.

Além disso, buscar a origem e evolução de determinado conhecimento é se deparar com várias interpretações possíveis dentro de um dado contexto político, social e histórico. Para minimizar tal risco, fontes primárias e secundárias (Quadro 1) foram priorizadas para transpor em ordem cronológica os principais eventos históricos e seus protagonistas.

Quadro 1. *Principais fontes consultadas e estratégias de busca.*

Fontes	
<i>Primárias</i>	Gillespie & Nyholm, 1957; Hofmann, 1865; Ingold, 1938; Lewis, 1916; Pauling, 1931, 1960; Sidgwick, 1927; Sidgwick & Powell, 1940.
<i>Secundárias</i>	Asimov, 1965; Brown, 1959; Drayer, 2001; Knight, 1998; Leicester, 1959; Meyer & McGowan, 1906; Ramsay, 1975; Sutton, 2008.
Obs. Todas as fontes foram consultadas a partir de pesquisas na base de dados bibliográfica "google scholar", sob as palavras-chave: history of chemistry; history of molecular geometry; history of molecular structure/theory; stereochemistry; history of stereochemistry.	

## A EVOLUÇÃO HISTÓRICA DA GEOMETRIA MOLECULAR

O advento da química moderna é atribuído às descobertas de cunho experimental feitas por cientistas nas últimas décadas do século XVIII. Principalmente pelo francês Antoine Laurent Lavoisier (1743-1794), considerado o pai da química moderna por seus trabalhos experimentais e explicações contundentes relativas ao oxigênio, além da refutação da hipótese dos quatro elementos (terra, fogo, ar e água) e da teoria do flogisto, ainda difundida à época.

A história da química está imersa num mar de contradições. A evolução dos conhecimentos conta com uma mistura de ciência e misticismo, onde de um lado buscou-se compreender os fenômenos químicos com base numa organização sistemática, fundados em leis e procedimentos reprodutíveis e, do outro, disseminar ideias isentas de fundamentos científicos.

Com efeito, os alquimistas – praticantes de rituais místicos envolvendo ciência e magia – contribuíram para o desenvolvimento da química enquanto ciência, mas ao mesmo tempo estagnaram a evolução do conhecimento devido às constantes rejeições de novas ideias em detrimento de outras anteriores, quase nunca pautadas em evidências científicas. Na primeira metade do século XVII, o médico e alquimista belga Jan Baptista van Helmont (1579-1644), por exemplo, ampliou os conhecimentos sobre os três estados da matéria (sólido, líquido e gasoso) e generalizou que os gases são quimicamente inertes. “A hipótese de van Helmont limitaria, necessariamente, o domínio da Química aos fenômenos observados apenas nos estados sólidos e líquidos” (Filho, 1984, p.94).

O irlandês e químico cético Robert Boyle (1627-1691), em alusão à sua obra publicada em 1661, foi influenciado pelas concepções errôneas de que todo gás é inerte e procurou explicar a calcinação dos metais (oxidação) por meio da teoria corpuscular da matéria.

Considerava-se que o fogo é responsável pelo aumento da massa dos metais submetidos ao aquecimento, porque de alguma forma os corpúsculos agitados do fogo se incorporam ao metal sob chamas. Conforme relatado em Filho (1984), o próprio van Helmont realizou um experimento com duração de cinco anos em que investigou o crescimento de uma planta, realizando aferições constantes de massa da terra e água adicionadas, além da massa final obtida. Longe de considerar as interações gasosas no processo de crescimento da planta para explicar a alteração desprezível da massa da terra, o alquimista atribuiu à água o fenômeno de transmutação, afirmando que esta se transformava em matéria orgânica.

A situação acima é apenas um cenário que exemplifica algumas características históricas da química. O obstáculo causado pela generalização da concepção do gás inerte também é uma demonstração da resistência à rejeição de conhecimentos preestabelecidos. Levaram-se anos para a superação desse obstáculo.

Somente em 1756, o físico e químico escocês Joseph Black (1728-1799) publicou um estudo comprovando a relação química do ar atmosférico com a oxidação dos metais. De fato, “as interpretações de fenômenos químicos semelhantes em que o ar ou gases participavam eram, conseqüentemente, errôneas, em nada contribuindo para o desenvolvimento da química” (Filho, 1984, p.95).

A partir de então, a modernização da ciência química começa a tomar forma e teorias aristotélicas como a dos quatro elementos foram deixadas de lado, principalmente com a disseminação dos estudos de Lavoisier.

Os trabalhos dos cientistas do século XVIII foram primordiais para a transição da ciência química de um período obscuro, em termos de emprego de métodos científicos, para um cenário fértil, de onde grandes descobertas foram viabilizadas graças à necessidade de explicações e aplicações do conhecimento químico.

A busca pela compreensão minuciosa dos fenômenos macroscópicos levou os químicos e físicos a investigarem vigorosamente a natureza microscópica das substâncias e suas interações. A melhor compreensão dos mecanismos de reações químicas e das propriedades dos materiais não seria possível sem a investigação da estrutura molecular e atômica. Conforme ressalta Brown (1959), hoje os construtos teóricos em torno do entendimento de átomos e moléculas são tão valiosos que a interpretação do comportamento das mais variadas moléculas orgânicas se dá em termos de suas estruturas, ou seja, de suas constituições moleculares e configurações.

Chegar à concepção atual da GM foi um desafio que perdurou até 1957, quando o químico britânico Ronald Gillespie e o químico australiano Ronald Sydney Nyholm apresentaram uma refinação da relação entre a disposição espacial de moléculas e o número de elétrons de valência no átomo central. Essa concepção teórica foi proposta em 1939 pelo japonês Ryutarō Tsuchida e divulgada pelos ingleses Nevil Sidgwick e Herbert Powell, em 1940, tendo como base os estudos de ligações covalentes de Lewis (Sidgwick & Powell, 1940).

Interessantemente, a concepção de GM e, em especial, da disposição tetraédrica do carbono já havia sido marcada pelo químico holandês Jacobus Henricus van't Hoff (1852-1911) e francês Joseph Le Bel (1847-1930), em 1874, quando propuseram que o arranjo espacial do carbono não é planar, mas mantém os grupos ligados ao átomo central direcionados para os quatro vértices de um tetraedro (Drayer, 2001).

Tal assunção teve como ponto de partida a noção de carbono tetravalente, como sugerido pelo químico alemão Friedrich August Kekulé (1857–58), que primeiramente postulou uma teoria da estrutura molecular para explicar como os átomos de carbono se ligam entre si para formar longas cadeias em compostos orgânicos.

O conhecimento de GM se sustentou, inicialmente, no entendimento do átomo como entidade elementar da matéria e seu poder de combinação fixa (Teoria de Valência), seguido pelos estudos de atividade óptica em enantiômeros (moléculas que são imagens no espelho uma da outra e não são sobreponíveis); pelo aprofundamento da teoria de

ligação de valência encabeçada por Lewis; pelos resultados experimentais de cristalografia de raios X a partir do início do século XX.

Após a enunciação da teoria atômica do inglês John Dalton, em 1808, iniciou-se uma busca intensiva pela elucidação de fenômenos químicos no nível microscópico. Porém, o embate entre pesquisadores de abordagens teóricas opostas culminou em um período de confusão na organização do conhecimento químico. No campo dos compostos orgânicos, por exemplo, os cinquenta anos anteriores à fundação da Teoria Estrutural, em 1858, foram considerados o “período escuro da química orgânica” (Brown, 1959).

Com efeito, conforme ressaltam Meyer e McGowan (1906), para que a química orgânica pudesse ter uma posição de desenvolvimento própria duas condições tiveram que ser satisfeitas: a determinação empírica da composição de substâncias orgânicas – que deixou rapidamente de ser um problema em decorrência do avanço de análises quantitativas – e a prova de que os compostos orgânicos seguiam as mesmas leis atômicas dos inorgânicos.

O químico sueco Jöns Jacob Berzelius (1779-1848) difundiu a ideia de que os radicais orgânicos eram como entidades elementares intocáveis, assim como o átomo é em compostos inorgânicos. Influenciado pelos estudos eletroquímicos do britânico Humphry Davy (1778-1829), Berzelius concluiu que todas as combinações químicas dependem unicamente de duas forças opostas, uma positiva e outra negativa. Devido a generalizações e incoerências essas considerações foram aos poucos sendo abandonadas (Brown, 1959).

O químico francês August Laurent (1807-53) foi de encontro aos postulados de Berzelius, afirmando que os radicais não eram indestrutíveis. Suas pesquisas passaram a influenciar as teorias vindouras acerca da estrutura molecular.

Laurent sugeriu que as moléculas orgânicas são constituídas de um núcleo (átomo) ligado a diferentes radicais. Pela Teoria dos Tipos, os dois hidrogênios da molécula de água ( $H_2O$ ) podem ser substituídos por diferentes radicais para gerar diferentes tipos de compostos como o metanol ( $CH_3OH$ ). A dificuldade surgiu, no entanto, na tentativa de transpor os resultados analíticos para fórmulas estruturais (Asimov, 1965).

As observações experimentais levaram os químicos a caracterizarem alguns padrões que puderam ser estendidos para o nível atômico. Em 1850, o químico alemão August Wilhelm von Hofmann (1818-1892) chegou ao raciocínio de que os hidrogênios na molécula de amônia ( $NH_3$ ) podem ser substituídos por um número correspondente de radicais (até três). No mesmo período, o químico inglês Alexander William Williamson comparou algumas propriedades da água, álcool e éter, observando que o oxigênio tem um poder fixo de ligação igual a dois. Juntamente com as contribuições de outros cientistas como o químico alemão Kolbe e o químico inglês Frankland, a concepção de Valência – da palavra “poder” em Latim – passou a servir de fundamento para a organização estrutural dos compostos químicos (Asimov, 1965; Brown, 1959).

Em 1858, Kekulé e o escocês Archibald Scott Couper (1831-92) publicaram o que ficou conhecido como Teoria Estrutural, dando-lhes o *status* de fundadores da química estrutural moderna. A noção de carbono tetravalente permitiu afirmar que os compostos orgânicos são constituídos de cadeias de carbonos ligados entre si. Couper foi o primeiro a adotar diagramas com traços (Figura 1) para representar arranjos moleculares (Sutton, 2008).

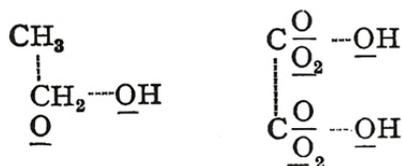


Figura 1. Estruturas moleculares de Couper (1858) para álcool e ácido oxálico (Domínio público).

Com a expansão das análises químicas algumas questões foram sendo levantadas. Como átomos e moléculas estão organizados no espaço? Sutton (2008) enfatiza que cientistas como Berzelius tinham descoberto pares de substâncias com a mesma composição química, mas diferentes propriedades. O termo cunhado para esse fenômeno foi “isomerismo” e vários outros cientistas, incluindo o francês Joseph Gay-Lussac, sugeriram que os pares de moléculas dessas substâncias continham os mesmos átomos, porém arranjos diferentes.

Na década de 1860, o químico russo Butlerov mostrou como o uso de fórmulas estruturais poderia explicar a existência de isômeros. Foi ele quem definiu o termo “estrutura química” como o resultado de um arranjo químico derivado da combinação de átomos com diferentes e limitadas forças químicas – afinidades ou valência (Leicester, 1959). Ainda que não fosse possível prever com exatidão a organização espacial dos átomos, os químicos sempre viram nas fórmulas estruturais um caminho para compreender as estruturas das moléculas e assim aplicar tais conhecimentos em problemas práticos da química orgânica.

A primeira exposição pública de modelos moleculares físicos que se tem registro é atribuída a von Hofmann, que em 1865 proferiu uma palestra sobre o poder de ligação dos átomos, demonstrando experimentalmente como algumas reações químicas seguem regras que podem ser representadas estruturalmente.

O ponto chave de sua discussão residiu nas capacidades de ligações fixas dos átomos de carbono (4), oxigênio (2), nitrogênio (3) e hidrogênio (1). Segundo von Hofmann (1865), a peculiaridade de cada átomo citado poderia ser representada através de demonstrações mecânicas (modelos físicos).

Utilizando bolas do jogo *croquet*, ele montou uma série de moléculas para ilustrar o efeito da adição de outros átomos à estrutura base. Baseado na teoria da estrutura

molecular, von Hofmann utilizou modelos físicos para explicar a razão pela qual o ácido clorídrico (HCl) poderia ser transformado em ácido hipocloroso (HClO) pela adição de 1 oxigênio, ácido cloroso pela adição de 2 oxigênios, ácido clórico pela adição de 3 oxigênios e ácido perclórico pela adição de 4 oxigênios à molécula (Figura 2).

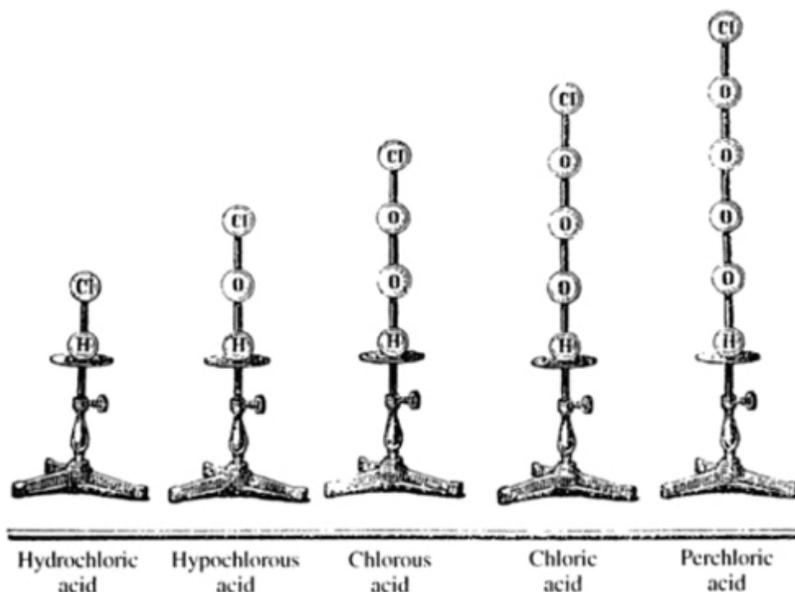


Figura 2. Estruturas moleculares de alguns ácidos apresentadas por von Hofmann em 1865 (Knight, 1998).

Percebe-se que cada estrutura tem o oxigênio contemplando seu número de combinação fixa (2). Segundo Meyer e McGowan (1906), alguns químicos eram contrários à exposição de fórmulas baseadas na teoria estrutural como indicadores da disposição espacial das moléculas, pois não havia recurso eficiente para esse fim. Com efeito, as quatro últimas estruturas (Figura 2) destoam dos arranjos espaciais conhecidos atualmente para essas moléculas, enquanto que as três últimas diferem também na ordenação dos átomos. Sabe-se hoje que há uma centralização do átomo de cloro.

O químico von Hofmann seguiu o mesmo raciocínio e ilustrou como as moléculas de etano, propano, pentano, entre outras, poderiam ser construídas a partir do metano (Figura 3), mas agora com uma diferença: Para cada carbono adicionado haveria a necessidade de adicionar mais dois hidrogênios, devido ao seu poder de combinação fixa igual a quatro.

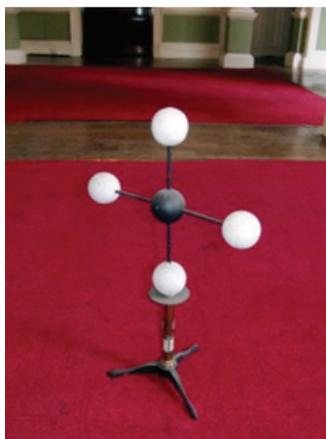


Figura 3. Modelo molecular do metano apresentado por von Hofmann em 1865 (Domínio público).

A representação molecular da Figura 3 é mais um exemplo da aplicação da teoria estrutural molecular derivada de Kekulé e Couper, mas dessa vez de forma mecânica. Se comparado com o que se sabe e com o que se costuma representar hoje, a molécula ilustrada possui irregularidades geométricas, além da desproporção em termos de raio atômico do carbono e hidrogênio. As técnicas de análises químicas da época eram capazes de elucidar muitas fórmulas moleculares, mas a questão da estrutura molecular em três dimensões tomaria mais tempo para ser elucidada.

O problema da tridimensionalidade das moléculas começou a ser resolvido a partir de 1879, com as descobertas da estereoquímica (Sutton, 2008), ramo da química que estuda o arranjo espacial nas moléculas. Os estereoisômeros com diferentes propriedades ópticas não podiam ser explicados unicamente pela teoria estrutural de Kekulé, pois suas estruturas se diferenciam apenas na organização espacial das moléculas e não na ordem dos átomos em si.

Os estudos da natureza e propriedades da luz foram cruciais para o desenvolvimento da estereoquímica. A identificação da atividade óptica – capacidade de uma substância rotacionar o plano da luz polarizada – de alguns materiais foi possível graças ao conhecimento das características e comportamento da luz polarizada (Drayer, 2001).

Em 1815, o físico francês Jean Baptiste Biot (1774-1862) mostrou que a passagem de luz polarizada através de certos cristais causava uma rotação – às vezes para direita e às vezes para a esquerda – no plano da onda eletromagnética polarizada. Percebeu-se também que algumas soluções orgânicas se diferenciavam apenas em suas propriedades ópticas, sugerindo que a estrutura molecular da substância deveria ser a razão para esse fenômeno, que passou a ser chamado de estereoisomeria (Asimov, 1965).

O problema dos estereoisômeros com propriedades ópticas começou a ser resolvido a partir dos trabalhos do francês Louis Pasteur (1822-95), que em 1848 sugeriu que a atividade óptica de certos compostos tem relação com a assimetria das moléculas que os constituem (Asimov, 1965). Ele chegou a essa conclusão depois de examinar duas substâncias especiais: ácido tartárico ordinário e ácido paratartárico (também chamado de ácido racêmico).

Desde 1820, sabia-se que ambas as substâncias possuem a mesma composição química, e em 1844 o químico alemão Eilhard Mitscherlich observou que o comportamento frente à atividade óptica é diferente. Quando cristais do ácido tartárico eram dissolvidos e submetidos à análise óptica, o plano da luz polarizada se desviava, enquanto que para o ácido paratartárico o desvio não acontecia.

Pasteur demonstrou que a diferença entre os compostos citados está no arranjo espacial dos átomos na molécula. No caso das substâncias em questão, esse fenômeno se apresentava também macroscopicamente, permitindo a separação dos cristais com lentes de aumento e pinça. Através de vários experimentos, Pasteur concluiu que o ácido paratartárico (racêmico) é, na verdade, a mistura de duas formas assimétricas do ácido tartárico.

Atualmente, o ácido tartárico pode ser identificado em sua forma dextrógira (+), porque desvia a luz polarizada à direita e levógira (-), porque desvia para a esquerda. Já a mistura racêmica antes chamada de ácido paratartárico é hoje conhecida como (+)-(-)-ácido tartárico (Vollhardt & Schore, 2013).

Embora Pasteur tenha sugerido que o desvio da luz polarizada se dá em consequência do arranjo tridimensional das moléculas, ele não desenvolveu essa ideia. Então, baseados na noção de carbono tetravalente proposto por Kekulé e na noção de assimetria molecular de Pasteur, van't Hoff e Le Bel desenvolveram a “teoria do carbono tetraédrico”, demonstrando esquematicamente como uma molécula orgânica pode apresentar assimetria e resultar em pelo menos duas configurações dos átomos ligados ao carbono central, apresentando, dessa forma, estruturas não superponíveis, onde uma é imagem especular da outra.

As quatro ligações do átomo de carbono são, assim, arranjadas simetricamente sobre o átomo, e assimetria é introduzida apenas quando cada uma das quatro ligações é ligada a um diferente tipo de átomo ou grupo de átomos. Depois as quatro ligações podem ser arranjadas em exatamente duas formas, uma sendo imagem especular da outra. Esse padrão promove exatamente o tipo de assimetria que Pasteur tinha encontrado em seus cristais. (Asimov, 1965, p.120, tradução nossa)

Conforme relatado por Drayer (2001), Le Bel não se preocupou em explicar a natureza tridimensional de substâncias que possuem atividade óptica em termos de ligações químicas ou carbono tetraédrico, mas da assimetria do material como um todo,

assim como fez Pasteur. Embora a atividade óptica esteja comumente relacionada com a presença de carbonos assimétricos, existem compostos que desviam o plano da luz polarizada mesmo sem apresentar carbono assimétrico.

A apropriação de modelos físicos e diagramas era quase que indispensável para discutir os achados no campo da estereoquímica (Ramsay, 1975). A limitação tecnológica não permitia uma rápida aceitação das considerações teóricas em torno da disposição dos átomos no espaço, pois eram basicamente de origem qualitativa. Na verdade, a própria concepção de átomo era questionada à época.

Conforme ressaltam Ramsay (1975), Meyer e McGowan (1906), vários cientistas se opuseram a tomar como válidas as relações existentes entre um resultado empírico e uma representação molecular. Com efeito, o problema do benzeno foi um exemplo claro das controvérsias e tentativas muitas vezes frustradas para explicar a estabilidade desse composto através de modelos físicos e diagramas, mas por outro lado gerou oportunidades para a investigação da natureza das ligações químicas.

O problema surgiu com a identificação da composição do benzeno ( $C_6H_6$ ) e suas propriedades químicas. Sabia-se que se a estrutura fosse uma cadeia aberta, esta conteria duplas e triplas ligações entre os carbonos, pois a quantidade de hidrogênios não seria capaz de saturar a cadeia. Porém, era consensual que cadeias com duplas e triplas ligações possuem alta reatividade, o que não tem a ver com o benzeno.

Kekulé sugeriu que a cadeia do benzeno deveria ser fechada e conter duplas ligações alternadas. Por conta da dificuldade em conciliar a estabilidade do núcleo benzênico com suas transformações químicas, várias estruturas foram propostas ao longo do tempo, como as indicadas na Figura 4.

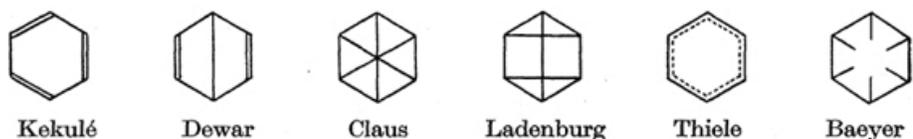


Figura 4. Representações para o benzeno (Ingold, 1938).

A Figura 5 mostra uns dos primeiros modelos moleculares físicos com referência ao carbono tetraédrico publicados por van't Hoff em 1877. Ramsay (1975) explica que os tetraedros apresentados não são regulares porque para van't Hoff o tetraedro só seria regular se todos os grupos ligados ao carbono assimétrico fossem idênticos.

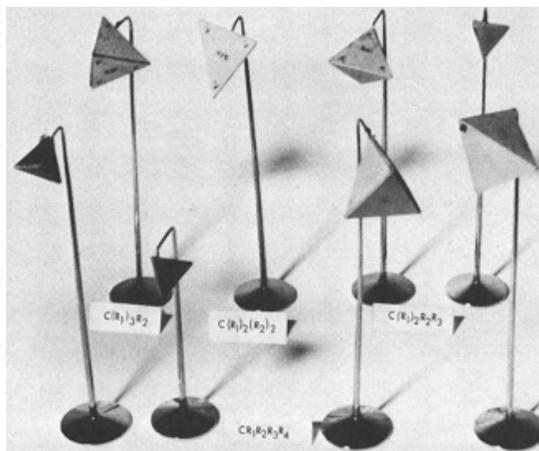


Figura 5. Modelos físicos de moléculas tetraédricas criados por van't Hoff (Ramsay, 1975).

O estudo do químico alemão Adolf von Baeyer (1835-1917) sobre a tensão causada pelas ligações entre os carbonos desencadeou uma série de hipóteses sobre as forças de atração dos átomos e estabilidade das moléculas. Modelos moleculares como os mostrados na Figura 6 foram usados para representar moléculas tridimensionais a partir de 1885, sendo comercializado na Europa até a década de 1930 (Ramsay, 1975).

Essas estruturas foram chamadas de modelo de Kekulé-von Bayer e é possível perceber que para manter a geometria tetraédrica do carbono, as ligações precisam ser tensionadas, o que explicaria a facilidade de quebra da ligação no eteno e dificuldade de formação do clicopropano.

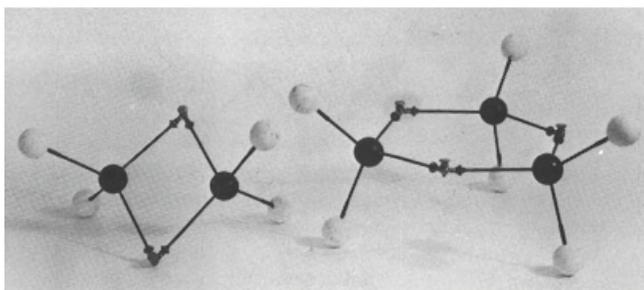


Figura 6. Modelo molecular com ligações tensionadas para obedecer à orientação tetraédrica do carbono (Ramsay, 1975).

A primeira metade do século XX marcou o desenvolvimento de teorias atômicas e, conseqüentemente, abriu portas para a compreensão das ligações químicas. De fato, a resolução de muitos problemas da época dependia do aperfeiçoamento de técnicas

analíticas e reformulações teóricas. A evolução da concepção de molécula tridimensional não poderia ser alcançada sem os esforços dedicados à investigação da natureza das ligações químicas e seus efeitos sobre a configuração espacial das moléculas, sejam elas orgânicas ou inorgânicas.

A teoria da valência foi o ponto de partida para a identificação de padrões de ligações entre os átomos. Sidgwick ressalta que “nós podemos aprender sobre a natureza da valência a partir de evidências químicas” (Sidgwick, 1927, p.53, tradução nossa). A sugestão da tabela periódica organizada pelo russo Dmitri Mendeleiev em 1869, inclusive, foi construída com base no valor numérico da valência dos átomos. Embora a teoria estrutural clássica de Kekulé tenha tomado a atenção da comunidade científica, outras teorias emergiram a partir da descoberta do elétron para explicar as interações atômicas.

A teoria de Berzelius baseada nas ligações por atração eletrostática voltou à tona com os estudos de dissociação eletrolítica conduzidos pelo químico sueco Svante Arrhenius em 1884, mas enquanto a natureza das ligações iônicas ia sendo vagarosamente compreendida, o problema das ligações em compostos apolares permanecia.

Segundo o químico quântico americano Linus Pauling (1960), as representações de ligações químicas da teoria estrutural clássica satisfaziam muitos fatos químicos, mas possuíam significância qualitativa em termos de estrutura molecular. O autor enfatizou também que a química estrutural moderna se diferencia da clássica pela exploração de detalhes de moléculas graças ao desenvolvimento de técnicas de difração de raios X e espectrometria.

Em 1916, o químico americano Gilbert Newton Lewis (1875-1946) publicou um artigo intitulado “*the atom and the molecule*” que se tornou referência para a evolução da noção de ligação química covalente. Nesse artigo (Lewis, 1916), as propriedades das substâncias polares e apolares são tratadas como consequência das interações eletrônicas nas camadas de valência dos átomos envolvidos. As forças das ligações e interações intermoleculares são explicadas levando-se em consideração a bipolaridade das moléculas e afinidade eletrônica inerente a cada átomo.

Lewis (1916) argumentou que as propriedades das substâncias podiam ser explicadas através da “teoria do átomo cúbico”. Em 1904, o químico alemão Richard Abegg havia observado que “a diferença total entre o máximo número de valência ou número polar negativo e positivo de um elemento é frequentemente 8” (Lewis, p.767, tradução nossa), o que resultou em indícios para que Lewis formulasse o seu conceito de ligação covalente pautada na regra do octeto. Na ocasião, Lewis apresentou seis postulados para explicar algumas leis que governam o comportamento das reações químicas.

Tais postulados consideraram descobertas recentes da época. Até 1916, a tabela periódica já havia sido reorganizada por ordem de número atômico e já se considerava que o número de elétrons era igual ao número de partículas positivas no núcleo do átomo. Os trabalhos de Rutherford e Bohr sobre a estrutura atômica e organização dos elétrons ao redor do núcleo atômico também tinham recebido grande aceitação do público.

Além disso, já havia uma teoria sobre as ligações iônicas condizente com a teoria eletrolítica e aplicável a átomos ionizáveis, mas o problema, no entanto, se concentrava nos compostos em que não havia transferência de elétrons, como no HCl ou CH<sub>4</sub>. Em 1927, Sidgwick escreveu:

O problema não é meramente descobrir um mecanismo que faz com que os átomos possam se unir sem a transferência de elétrons, mas também explicar porque o valor numérico da valência é o mesmo, de qualquer forma em casos simples, para ambos os tipos de ligação. Assim, hidrogênio e cloro são univalentes, e o oxigênio é divalente, sejam eles combinados com carbono, com metais ou com um ao outro e se as moléculas resultantes são ionizadas ou não. (Sidgwick, 1927, p.55, tradução nossa)

A resposta para esse problema foi dada por Lewis, quando sugeriu que as combinações químicas acontecem de modo a redistribuir os elétrons dos átomos envolvidos para adquirirem um arranjo mais estável. Segundo ele, numa combinação química poderá existir uma variação de zero a oito elétrons.

Nesse sentido, a ligação pode acontecer por meio do compartilhamento de elétrons entre dois átomos, em que de alguma forma a estabilidade é alcançada para ambos, ou seja, a valência de ambos os átomos é satisfeita, por isso o termo ligação covalente. A representação desses conceitos são as famosas estruturas de pares de elétrons de Lewis usadas até hoje.

Como resultado dos esforços dos químicos orgânicos para elucidar o problema da disposição espacial dos átomos em compostos opticamente ativos, os arranjos espaciais de muitas substâncias orgânicas e inorgânicas já haviam sido descobertos até a década de 1930.

Sidgwick contribuiu significativamente para a compreensão das ligações químicas e os arranjos moleculares. Em 1927, ele publicou o livro “*the electronic theory of valence*”, cujas teorias atômicas de Rutherford e Bohr e, principalmente, a noção de ligação química de Lewis foram complementarmente utilizadas para explicar os fenômenos químicos no nível microscópico e estabelecer relações entre as teorias e a organização da tabela periódica.

Nesse livro, a discussão acerca da estrutura tridimensional das moléculas inorgânicas se limita aos exemplos do campo da estereoquímica e análise de substâncias opticamente ativas. O autor revela na apresentação do livro que evitou ao máximo discutir qualquer hipótese física que ainda não tivesse sido sancionada por aqueles que estavam mais qualificados para julgar.

Com efeito, as repostas mais convincentes para a natureza da ligação química e a influência dos elétrons na configuração da molécula começaram a surgir com o avanço das pesquisas em mecânica quântica.

Linus Pauling (1901-1994) se apropriou da mecânica quântica para explicar uma série de problemas que cercavam a concepção de ligação química. Pauling (1931) ampliou os conhecimentos da ligação por par de elétrons e introduziu novas informações como a hibridização de orbitais atômicos, forças de ligações entre diferentes átomos (eletronegatividade), ângulos entre as ligações, livre rotação em ligações simples e falta de rotação em ligações duplas, entre outros.

A evolução do conceito de ligação química contribuiu para a predição de estruturas químicas e propriedades dos materiais. Cálculos quânticos permitiram definir os ângulos de ligações de moléculas como  $H_2O$ ,  $H_2O_2$ ,  $NH_3$ , levando em consideração os efeitos dos elétrons em termos de função de onda e assumindo que um átomo com camada de valência completa (contando com pares ligantes e não ligantes) tende a tomar a configuração de um tetraedro.

As previsões da organização espacial de outras moléculas eram condizentes com as evidências de estudos cristalográficos por difração de raios X. Em seu famoso artigo de 1931, Pauling sumariza ressaltando que com a ajuda da mecânica quântica um conjunto de regras relacionadas com pares de elétrons ligantes e não ligantes acabara de ser formulado.

O primeiro estudo cujo objetivo foi categorizar os arranjos espaciais das moléculas de acordo com o número de ligações do átomo central foi publicado em 1939 pelo japonês Ryutarō Tsuchida. Sob o argumento de que é possível determinar algumas propriedades e mecanismos de reações químicas através do conhecimento da geometria molecular, Sidgwick e Powell (1940) também apresentaram a configuração espacial de átomos polivalentes em função do número de ligações correspondente à suas respectivas valências. Em 1940, os autores diziam que

[...] a determinação experimental das posições relativas espaciais dos átomos em uma molécula agora pode ser efetuada através de uma variedade de métodos, dos quais a medida de difração de raios-X em sólidos e elétrons em vapores, espectro de absorção e espectro de Raman, e em casos particulares atividade óptica e momento de dipolo elétrico, estão entre os mais importantes. (Sidgwick & Powell, 1940, p.154, tradução nossa)

A organização conceitual das diferentes geometrias moleculares – chamadas pelos autores de tipos estereoquímicos – incluiu muitos termos hoje já consolidados, tais como configuração linear, tetraédrica, octaédrica, quadrática planar. Outras configurações, como as mostradas na Figura 7, foram posteriormente chamadas de formas “trigonal bipiramidal” e “piramidal quadrática”, respectivamente.

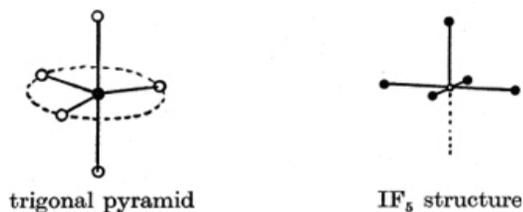


Figura 7. Configurações espaciais com a nomenclatura antiga (Sidgwick & Powell, 1940).

O canadense Gillespie e australiano Nyrolm foram os químicos responsáveis pela refinação dos conceitos por trás da forma como as moléculas se organizam tridimensionalmente. O modelo de Sidgwick e Powell não respondeu alguns problemas mais específicos sobre a ligação covalente, tais como detalhar os mecanismos de formação de uma ligação entre as camadas de valências e explicar como os pares de elétrons se distanciam uns dos outros.

Em 1957, Gillespie e Nyrolm apresentaram um modelo que se constituiu na “Teoria da Repulsão dos Pares de Elétrons da Camada de Valência” – *VSEPR*, do inglês *Valence Shell Electron Pair Repulsion Theory* – com fundamentos consolidados da mecânica quântica. Com o objetivo de explicar a repulsão dos pares ligantes e não ligantes de um átomo central e os efeitos desses na configuração espacial da molécula, os autores utilizam os conceitos de hibridização de orbitais atômicos, ligações múltiplas (dupla e tripla), princípio da exclusão.

Embora o raciocínio empregado para a previsão das disposições espaciais das moléculas não tenha dependido integralmente dos estudos da mecânica quântica, Gillespie e Nyholm ressaltam que:

Parece que a teoria simples das repulsões de pares de elétrons recebe uma justificativa considerável da mecânica quântica e quando refinada para levar em conta as diferenças entre as repulsões entre pares solitários e pares de ligações de elétrons fornece uma teoria muito satisfatória da estereoquímica de moléculas inorgânicas. (Gillespie & Nyholm, 1957, p.1, tradução nossa)

Basicamente, a diferença entre os modelos de Sidgwick-Powell e Gillespie-Nyholm é que no último a geometria molecular pode ser prevista a partir do conhecimento da hibridização dos orbitais correspondentes e do número de pares ligantes e não ligantes da camada de valência. Enquanto a orientação dos pares de elétrons é determinada pela quantidade de orbitais atômicos envolvidos na ligação, a geometria molecular é definida pela quantidade de pares ligantes e não ligantes do átomo central.

O trabalho de Gillespie-Nyholm também reuniu conceitos do princípio da exclusão e de orbitais atômicos, contribuindo para o entendimento das geometrias de metais de transição e complexos iônicos.

Por fim, a breve análise histórica permitiu traçar um conjunto de oito obstáculos (Quadro 2) que por um lado estagnou a evolução do conceito de GM e por outro impulsionou cientistas a buscarem alternativas teóricas e metodológicas para resolver os problemas que foram surgindo ao longo do tempo.

Quadro 2. Principais obstáculos identificados para o desenvolvimento do conceito da GM.

Obstáculo	Principais autores que superaram
1. Teorias contrárias à concepção de átomo como entidade elementar da matéria.	Dalton
2. Dificuldade para determinar fórmulas estruturais a partir de resultados empíricos, levando em consideração a valência dos átomos.	Kekulé – Couper
3. Explicar isômeros em termos de estrutura molecular.	Butlerov
4. Limitação para a representação tridimensional de estruturas moleculares.	von Hofmann
5. Dificuldade para elucidar o problema dos estereoisômeros com propriedades ópticas.	van't Hoff – Le Bel
6. Inexistência de uma teoria para as ligações químicas que não dependem da transferência de elétrons (ligação covalente).	Lewis
7. Dificuldade para estabelecer relações entre a teoria atômica vigente e a configuração espacial de moléculas inorgânicas.	Sidgwick – Powell
8. Limitação teórica para explicar os mecanismos de ligação covalente e de repulsão dos pares eletrônicos.	Gillespie – Nyholm

Quando vistos do ponto de vista didático, os obstáculos sumarizados são importantes para a reflexão acerca do ensino habitual, uma vez que é possível identificar os fatores que interferem no processo de ensino e aprendizagem através de relatos de pesquisadores da área, sendo inevitável o enquadramento das dificuldades dos alunos dentro de um ou mais intervalos definidos no Quadro 2, como consequência da carência de conhecimentos relevantes para a compreensão da GM.

O Quadro 3 destaca os principais apontamentos levantados na análise histórica com base nas recomendações de Brousseau (1989).

Quadro 3. *Resumo dos principais resultados da análise histórica da geometria molecular.*

Itens de análise	Principais apontamentos
a) descrever o conhecimento em torno da noção de geometria molecular e entender o seu uso.	<p>- A geometria molecular é fundamentada pelas concepções de estrutura da matéria, ligações químicas e estereoquímica.</p> <p>- O seu uso está associado à explicação e previsão do comportamento da matéria nas mais diversas interações físico-químicas.</p>
b) explicar quais vantagens ele trouxe em relação às utilizações anteriores, a quais práticas sociais e técnicas está associado, e se possível a quais concepções do campo da química.	<p>- As vantagens do conhecimento em torno da noção de geometria molecular consistiram de elementos teóricos que puderam desvendar os "mistérios" por trás do mundo macroscópico, que por muito tempo havia sido interpretado sem fundamentos científicos.</p> <p>- Tal conhecimento permitiu o desenvolvimento de técnicas de espectrometria e difração de raios X e esteve atrelado ao desenvolvimento de medicamentos, descoberta de estruturas de proteínas e do DNA, entre outros.</p> <p>- O átomo como entidade elementar da matéria, o poder de ligação dos átomos e a tridimensionalidade das moléculas são as principais concepções do campo da química que explicam a geometria molecular.</p>
c) identificar essas concepções em relação a outras possíveis, especialmente aquelas que as sucederam, a fim de compreender as limitações, dificuldades e, finalmente, as causas do fracasso dessas concepções, mas ao mesmo tempo as razões de um equilíbrio que parece ter durado o tempo suficiente.	<p>- A concepção de átomo como entidade elementar evoluiu com a descoberta das partículas subatômicas, permitindo a interpretação da geometria molecular em termos de interações eletrônicas.</p> <p>- Durante o desenvolvimento da noção de geometria molecular houve equilíbrio teórico entre os achados científicos, justificado pela necessidade de sobrevivência de técnicas e concepções interligadas entre si, o que não quer dizer que algumas concepções não ficaram obsoletas.</p>
d) identificar o momento e as razões para a quebra desse equilíbrio e, em seguida, considerar vestígios de resistência à rejeição por explicar possíveis sobrevivências de práticas ou concepções.	<p>- O equilíbrio teórico entre os obstáculos identificados teve a sua quebra quando o desenvolvimento de técnicas e métodos de experimentação tornou possível a criação de novas teorias, causando tensões entre frentes teóricas opostas.</p> <p>- As resistências às rejeições foram constantes devido à instabilidade da ciência Química que perdurou até a primeira metade do século XX.</p>
e) procurar possíveis ressurgências, retornos inesperados, senão em sua forma inicial, pelo menos em formas similares e ver o motivo.	<p>- Os principais retornos associados aos conhecimentos da geometria molecular foram marcados pela apropriação das noções de ligações químicas da teoria estrutural e das noções de tridimensionalidade das moléculas, desenvolvidas no século XIX. Essas concepções foram mais bem explicadas no âmbito da mecânica quântica, no século XX.</p>

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

O levantamento histórico considerou a perspectiva epistemológica discutida por Guy Brousseau com o objetivo de identificar obstáculos que podem estar associados às dificuldades de aprendizagem dos alunos.

Esse estudo dá suporte às investigações que visam analisar a organização dos conteúdos de materiais didáticos, permitindo o seu questionamento e/ou entendimento. Também traz implicações para a sala de aula na forma de novas práticas a serem pensadas

a partir da incorporação de elementos históricos a elementos teóricos que fundamentam as escolhas de recursos didáticos e metodologias de ensino.

Em suma, o estudo mostrou que a questão da visualização em química e da necessidade de manipulação física de modelos moleculares é constitutiva da própria evolução história da geometria molecular. Esse ponto amplifica a necessidade de superação dos obstáculos epistemológicos e cognitivos associados às representações moleculares.

## AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

## REFERÊNCIAS

- Almouloud, S. A. (2007). *Fundamentos da didática da matemática*. Curitiba: UFPR.
- Asimov, I. (1965). *A short history of chemistry*. New York: Anchor Books.
- Bachelard, G. (1996). *A formação do espírito científico: contribuição para uma psicanálise do conhecimento*. Tradução Estela dos Santos Abreu – Rio de Janeiro: Contraponto.
- Bouson, J. D. (2015). *Metodologias didáticas alternativas para o ensino de geometria molecular e soluções: estratégias para a construção do conhecimento* (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal Fluminense – UFF, Niterói, RJ, Brasil.
- Brousseau, G. (1989). Les obstacles épistémologiques et la didactique des mathématiques. Nadine Bednarz, Catherine Garnier. Construction des savoirs obstacles et conflits, *CIRADE Les éditions Agence d'Arc inc.*, pp.41-63.
- Brousseau, G. (1983). Les obstacles épistémologiques et les problèmes en mathématiques. *RDM*, 4(2), 164-198.
- Brousseau, G. (1998). Les obstacles épistémologiques, problèmes et ingénierie didactique. Guy Brousseau. La théorie des situations didactiques, *La pensée sauvage*, Recherches en Didactiques des Mathématiques, 115-160.
- Brown, H. C. (1959). Foundations of the structural theory. *Journal of Chemistry Education*, 36(3), 104-110.
- Charbonneau, M. (2013). The cognitive life of mechanical molecular models. *Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences*, 44, 585-594.
- Drayer, D. E. (2001). The early history of stereochemistry: from the discovery of molecular asymmetry and the first resolution of a racemate by Pasteur to the asymmetrical chiral carbon of van't Hoff and Le Bel\*. *Clinical Research and Regulatory Affairs*, 18(3), 181-203.
- Filho, M. C. (1984). A evolução da química: de Boyle a Lavoisier. *Revista Química Nova*, 7(2), 93-95.
- Gibin, G. B. & Ferreira, L. H. (2010). A formação inicial em química baseada em conceitos representados por meio de modelos mentais, *Química Nova*, 33(8), 1809-1814.
- Gillespie, R. J. & Nyholm, R. S. (1957). Inorganic stereochemistry. *Quarterly Reviews, Chemical Society*, 11(4), 339-380.

- Hofmann, A. W. (1865). On the combining power of atoms. *Proceedings of the Royal Institution*, 4, 401-430.
- Ingold, C. K. (1938). The structure of benzene. *Proceedings of the Bakerian Lecture*, 169, 149-173.
- Knight, D. M. (1998). *The Development of Chemistry, 1789-1914: Selected essays*. Abingdon: Taylor & Francis.
- Leicester, H. M. (1959). Contributions of Butlerov to the development of structural theory. *Journal of Chemistry Education*, 36(7), 328-329.
- Lewis, G. N. (1916). The Atom and the Molecule. *Journal of the American Chemical Society*, 38, 762-785.
- Melo, R. M. & Neto, E. G. (2012). Dificuldades de ensino e aprendizagem dos modelos atômicos em química. *Química Nova na Escola*, 35(2), 112-122.
- Meyer, E. V. & McGowan, G. (1906). *A history of chemistry: from the earliest times to the present day*. New York: The Macmillan Company.
- Pauling, L. (1960). *The nature of the chemical bond and the structure of molecules and crystals: an introduction to modern structural chemistry* (3<sup>a</sup> ed). New York: Cornell University Press.
- Pauling, L. (1931). The nature of the chemical bond. Application of results obtained from the quantum mechanics and from a theory of paramagnetic susceptibility to the structure of molecules. *Journal of the American Chemical Society*, 53(4), 1367-1400.
- Piaget, J. (1975). *L'équilibration des structures cognitives*. Paris: PUF.
- Ramos, A. F. (2015). *Estudo da influência da utilização de software de modelagem molecular no processo de aprendizagem de conceitos químicos por estudantes do Ensino Médio e Superior* (Tese de Doutorado). Universidade Luterana do Brasil – ULBRA, Canoas, RS, Brasil.
- Ramsay, O. B. (1975). Molecular Models in the Early Development of Stereochemistry: I. The van't Hoff Model. II. The Kekulé Models and the Baeyer Strain Theory. van't Hoff-Le Bel Centennial. *American Chemical Society: Symposium Series*, Washington, EUA, 74-96.
- Sidgwick, N. V. (1927). *The electronic theory of valence*. Oxford: Oxford University Press.
- Sidgwick, N. V. & Powell, H. M. (1940). Stereochemical types and valency groups. *Proceedings of the Royal Institution*, 176(965), 153-180.
- Silva, A. M. (2016). *Geometria molecular: elaboração, aplicação e avaliação de uma sequência didática envolvendo o lúdico* (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal Fluminense – UFF, Niterói, RJ, Brasil.
- Sutton, M. (2008). A forgotten triumph. *Chemistry World*. Recuperado de <https://www.chemistryworld.com/feature/a-forgotten-triumph/3004463.article>.
- Vollhardt, P. & Schore, N. (2013). *Química orgânica: estrutura e função* (6<sup>a</sup> ed.). Porto Alegre: Bookman.