



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
CENTRO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DA NATUREZA
INSTITUTO DE QUÍMICA

PATRICK ANDERSSON BARRETO FRASÃO

A CONSTRUÇÃO DE UM PERFIL EPISTEMOLÓGICO PARA
O CONCEITO DE INTERAÇÃO INTERMOLECULAR

Rio de Janeiro

2024

PATRICK ANDERSSON BARRETO FRASÃO

**A CONSTRUÇÃO DE UM PERFIL EPISTEMOLÓGICO PARA
O CONCEITO DE INTERAÇÃO INTERMOLECULAR**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro (PEQui-UFRJ) como requisito à obtenção do título de Mestre em Ensino de Química.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Volcan Almeida

Coorientador: Prof. Dr. Marcelo Hawrylak Herbst

Rio de Janeiro

2024

CIP - Catalogação na Publicação

F841c Frasão, Patrick Anderson Barreto
A construção de um perfil epistemológico para o
conceito de interação intermolecular / Patrick
Anderson Barreto Frasão. -- Rio de Janeiro, 2024.
233 f.

Orientador: Rodrigo Volcan Almeida.
Coorientador: Marcelo Hawrylak Herbst.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do
Rio de Janeiro, Instituto de Química, Programa de Pós
Graduação em Ensino de Química, 2024.

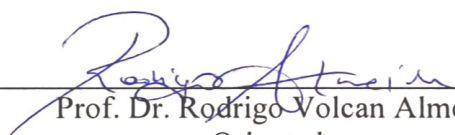
1. Gaston Bachelard. 2. Perfil epistemológico. 3.
Interação intermolecular. 4. Concepções docentes. I.
Almeida, Rodrigo Volcan, orient. II. Herbst,
Marcelo Hawrylak, coorient. III. Título.

PATRICK ANDERSSON BARRETO FRASÃO

**A CONSTRUÇÃO DE UM PERFIL EPISTEMOLÓGICO PARA
O CONCEITO DE INTERAÇÃO INTERMOLECULAR**

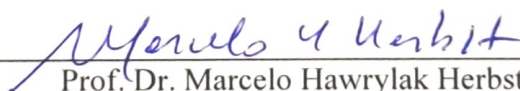
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro (PEQui-UFRJ) como requisito à obtenção do título de Mestre em Ensino de Química.

Rio de Janeiro, 28 de novembro de 2024.



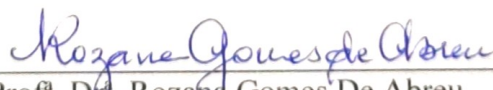
Prof. Dr. Rodrigo Volcan Almeida
Orientador

Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ
Programa de Pós-Graduação em Ensino de Química – PEQui



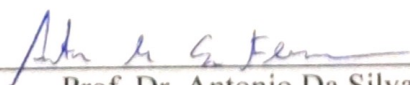
Prof. Dr. Marcelo Hawrylak Herbst
Coorientador

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro – UFRRJ



Profª. Dr. Rozana Gomes De Abreu

Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ
Programa de Pós-Graduação em Ensino de Química – PEQui



Prof. Dr. Antonio Da Silva Florencio
Instituto Federal do Rio de Janeiro – IFRJ

Àquele que é Criador e Sustentador de todo o universo.
Àquele que primeiro me amou, quem morreu num madeiro para que eu pudesse ter vida.
Àquele que é Conselheiro, Ajudador e Consolador.
A Deus, dedico este trabalho.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Carlos Frasso e Gedalia Barreto, pelo amor incondicional, que se expressa até mesmo nas atitudes mais simples.

Ao meu irmão mais novo, Carlos William, pelo bom humor com o qual me reabasteceu em muitos momentos desta pesquisa.

À minha namorada, Rafaela Amaro, por acreditar em mim e me incentivar com o jeito mais empolgado e doce. Agradeço também pela ajuda com o *abstract*!

Aos meus orientadores, Rodrigo Volcan e Marcelo Hawrylak, pela enorme paciência e pela gentileza com as quais me conduziram nessa jornada. Cada reunião e conversa contribuíram muito para o meu desenvolvimento!

Aos meus amigos, Diana Rangel, Adriana Barboza, Angela Silveira, Marcus Barcelos e Guilherme Christo, por me apoiarem sempre. Vocês são muito especiais para mim!

Ao meu psicanalista, André Nascimento, pela escuta sensível e pelas sábias palavras de encorajamento.

Aos meus colegas de trabalho do Colégio Pedro II – em especial, à minha equipe do *campus* Duque de Caxias, Camila Coimbra, Gabriela Werneck e Renata Macedo –, pela parceria e pelas falas de ânimo.

À minha professora e orientadora na Licenciatura, Fátima Gomes, pela inspiração. Os fundamentos desta dissertação se encontram em suas aulas, inesquecíveis para mim.

Aos meus professores no PEQui-UFRJ, por tornarem essa caminhada possível.

Aos meus alunos do Colégio Pedro II, que alegram o meu cotidiano profissional e dão sentido às minhas pesquisas no campo do ensino de química.

Aos professores que participaram da pesquisa relatada nesta dissertação. Muito obrigado por compartilharem os seus saberes!

Pois sabe-se que os corpos agem uns sobre os outros pelas ações da gravidade, do magnetismo e da eletricidade; e esses exemplos mostram o teor e o curso da natureza, e não tornam improvável que possa haver *mais poderes atrativos* além desses.

Porque a natureza é muito consonante e conforme a si mesma.
[...] As atrações da gravidade, do magnetismo e da eletricidade alcançam distâncias bem perceptíveis, e assim têm sido observadas pelos olhos comuns, podendo haver *outras* que alcançam distâncias tão pequenas que escaparam à observação até aqui

(NEWTON, 2017, p. 274-275).

RESUMO

FRASÃO, Patrick Andersson Barreto. *A construção de um perfil epistemológico para o conceito de interação intermolecular*. Dissertação (Mestrado em Ensino de Química) – Programa de Pós-Graduação em Ensino de Química, Instituto de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

Gaston Bachelard (1884-1962), em sua obra intitulada *A Filosofia do Não*, cunhou a noção de perfil epistemológico a fim de defender uma epistemologia centrada na análise dos conceitos científicos. Para ele, os conceitos científicos amadurecem, ao longo da história, de acordo com uma ordem genética, na qual cada estágio de desenvolvimento, demarcado por rupturas epistemológicas, compreende um compromisso filosófico distinto. Bachelard elencou cinco compromissos filosóficos, que demonstram que um conceito científico pode ser concebido de diferentes maneiras: o realismo ingênuo, o empirismo, o racionalismo clássico, o racionalismo completo e o racionalismo discursivo. Um perfil epistemológico faz uma síntese dessas ideias, sendo um gráfico de barras que relaciona os compromissos filosóficos (na forma de cinco zonas) com suas frequências de uso. De posse desses fundamentos, esta dissertação relata a construção de um perfil epistemológico para o conceito de interação intermolecular, bem como a utilização desse perfil na caracterização de como docentes de química compreendem esse conceito. Na construção, primeiramente, fez-se uma definição ampla desse conceito, que passou a ser entendido como “todo processo que ocorre entre entidades moleculares com a preservação de suas composições químicas”. Em seguida, realizou-se uma pesquisa historiográfica sobre sua evolução no Ocidente, desde os atomistas gregos antigos, no século V a.C., até a atualidade. Desse modo, constatou-se que o conceito sob estudo possui as cinco zonas supracitadas, todas elas em uso no discurso científico vigente. A zona realista concebe as interações como modalidades de contato (colisão, encaixe e entrelaçamento); a empirista aborda as interações segundo dados obtidos da análise das propriedades e das transformações dos materiais. As zonas racionalistas clássica e completa concebem as interações como processos de atração e de repulsão mediados por forças de atuação à distância, destoando apenas na definição do momento dipolar das entidades interagentes. E a racionalista discursiva, por fim, compreende as interações como interferências de onda de matéria. A utilização do perfil proposto ocorreu junto a docentes de química da Educação Básica e Superior. Foi aplicado um formulário com o intuito de saber como esses docentes concebem as interações intermoleculares e explicam fenômenos associados a elas. E, nessa pesquisa, constatou-se que os docentes usam com muito mais frequência, as concepções racionalistas clássica e completa. Em seguida, observou-se o realismo e, por último, o empirismo e o racionalismo discursivo. Dessa forma, com o perfil epistemológico em mãos, o produto educacional da dissertação pôde ser confeccionado. Visando contribuir para um ensino de química mais crítico, significativo e lúdico, fez-se um *e-book* intitulado “Coesão: cinco histórias sucintas sobre as interações intermoleculares” com histórias sobre esse conceito, habilitado para ser usado por docentes e estudantes de química.

Palavras-chave:

Gaston Bachelard. Perfil epistemológico. Interação intermolecular. Concepções docentes.

ABSTRACT

FRASÃO, Patrick Andersson Barreto. *The construction of an epistemological profile for the concept of intermolecular interaction*. Dissertação (Mestrado em Ensino de Química) – Programa de Pós-Graduação em Ensino de Química, Instituto de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

Gaston Bachelard (1884-1962), in his work entitled *The Philosophy of No*, coined the notion of epistemological profile in order to defend an epistemology centered on the analysis of scientific concepts. For him, scientific concepts mature, throughout history, according to a genetic order, in which each stage of development, demarcated by epistemological ruptures, comprises a distinct philosophical commitment. Bachelard listed five philosophical commitments, which demonstrate that a scientific concept can be conceived in different ways: naive realism, empiricism, classical rationalism, complete rationalism and discursive rationalism. An epistemological profile summarizes these ideas, being a bar graph that relates philosophical commitments (in the form of five zones) with their frequencies of use. Based on these foundations, this dissertation reports the construction of an epistemological profile for the concept of intermolecular interaction, as well as the use of this profile in characterizing how chemistry teachers understand this concept. In the construction, firstly, a broad definition of this concept was made, which came to be understood as “every process that occurs between molecular entities with the preservation of their chemical compositions”. Next, a historiographical study was carried out on its evolution in the West, from the ancient Greek atomists in the 5th century BC to the present day. Thus, it was found that the concept in research has the five aforementioned zones, all of which are in use in current scientific discourse. The realist zone conceives interactions as forms of contact (collision, fitting and intertwining); the empiricist zone approaches interactions according to data obtained from the analysis of the properties and transformations of materials. The classical and complete rationalist zones conceive interactions as processes of attraction and repulsion mediated by forces acting at a distance, differing only in the definition of the dipole moment of the interacting entities. And the discursive rationalist, finally, understands interactions as interferences of matter waves. The proposed profile was used with chemistry teachers from Basic and Higher Education. A questionnaire was applied with the aim of finding out how these teachers conceive of intermolecular interactions and explain phenomena associated with them. And, in this research, it was found that teachers use the classical and complete rationalist conceptions much more constantly. Furthermore, realism was observed and, finally, empiricism and discursive rationalism. In this way, with the epistemological profile in hand, the educational product of the dissertation could be created. Aiming to contribute to a more critical, meaningful and playful teaching of chemistry, an e-book entitled “Cohesion: five succinct stories about intermolecular interactions” was created with stories about this concept, enabled for use by chemistry teachers and students.

Keywords:

Gaston Bachelard. Epistemological profile. Intermolecular interaction. Teacher conceptions.

LISTA DE FIGURAS

Figura 0.1 -	Uma representação equivocada do senso-comum e do conhecimento científico	17
Figura 0.2 -	Uma representação mais adequada do senso-comum e do conhecimento científico	18
Figura 0.3 -	Frequência do conceito de interação intermolecular e de conceitos relacionados (como polaridade das moléculas, solubilidade mútua de substâncias químicas etc.) nas provas do Exame Nacional do Ensino Médio (ENEM) de 2014 a 2023	19
Figura 1 -	Os cientistas e os filósofos: Dois polos epistemológicos distintos	38
Figura 2 -	Entre os extremos, uma terceira via epistemológica	39
Figura 3 -	Diversas representações para a molécula de água ao longo da história do simbolismo químico	42
Figura 4 -	Os dois tipos de abordagem da história da ciência	43
Figura 5 -	O sentido da maturação filosófica dos conceitos científicos	45
Figura 6 -	(a) A equação de Dirac e (b) a fotografia feita por Anderson, mostrando a formação de um “chuveiro” de 3 elétrons e 3 pósitrons a partir de raios cósmicos	47
Figura 7 -	Exemplos de funções matemáticas crescentes, mas diferentes quanto à continuidade: (a) Uma função contínua e (b) uma função descontínua	49
Figura 8 -	Uma perspectiva epistemológica intermediária, dinâmica e “polifilosófica”	52
Figura 9 -	Perfil epistemológico pessoal de Bachelard quanto ao conceito de massa	53
Figura 10 -	Perfil epistemológico pessoal de Bachelard quanto ao conceito de energia	57
Figura 11 -	Relação conceitual entre as “forças intermoleculares” e as “interações intermoleculares”	65
Figura 12 -	Mapa conceitual com a definição de “interação intermolecular”	67
Figura 13 -	O <i>kósmos</i> de Aristóteles	72
Figura 14 -	O movimento dos átomos no universo epicurista, com destaque para o <i>clínamen</i>	73
Figura 15 -	Uma talha de mina movida por uma roda d'água reversível, uma ilustração de Georgius Agricola (1494-1555)	78
Figura 16 -	Alguns fenômenos explicados pela pressão hidrostática: (a) A projeção dos fluidos de um recipiente perfurado e (b) o funcionamento dos vasos comunicantes	79
Figura 17 -	Barômetros de Torricelli (1608-1647)	80

Figura 18 -	Algumas aparelhagens experimentais aprimoradas por Robert Boyle (1627-1691): (a) Itens de sua bomba de vácuo e (b) seu tubo em “J”	82
Figura 19 -	Algumas formas atribuídas aos átomos por Nicolas Hartsoeker (1656-1725) para explicar algumas propriedades e transformações da matéria	85
Figura 20 -	Ascensão capilar da água entre lâminas de vidro muito próximas	86
Figura 21 -	Observação de Borelli (1608-1679) sobre o efeito da inclinação do tubo capilar na altura da coluna de água em seu interior	87
Figura 22 -	Vasos comunicantes com alguns dos “braços” em dimensões capilares	88
Figura 23 -	Representação atomista de Francis Hauksbee (1660-1713) para a ascensão capilar da água	91
Figura 24 -	Experimentos de James Jurin (1684-1750)	96
Figura 25 -	Representação da ascensão capilar com algumas das variáveis da lei de Jurin	97
Figura 26 -	Ascensão capilar da água e depressão capilar do mercúrio	98
Figura 27 -	A causa molecular da tensão superficial da água	99
Figura 28 -	Gráfico de Boscovich (1711-1787)	100
Figura 29 -	Representação feita por Euler (1707-1783) em seu artigo <i>Recherches sur la courbure des surfaces</i> (Pesquisa sobre a curvatura de superfícies), de 1767	103
Figura 30 -	Representação de uma gota esférica atraindo um tubo capilar externo e perpendicular à sua superfície	104
Figura 31 -	(a) Isotermas obtidas empiricamente por Thomas Andrews (1813-1885), para o CO ₂ , e (b) algumas curvas teóricas correspondentes, previstas pela equação de van der Waals	115
Figura 32 -	Aparelhagens experimentais utilizadas por Michael Faraday na liquefação de gases (a) em 1823 e (b) em trabalhos posteriores	117
Figura 33 -	Comparação dos pontos experimentais da isoterma do gás carbônico, a 15 °C, com algumas curvas da equação de estado do virial	120
Figura 34 -	Fotografias de Heike Kamerlingh Onnes (a) com sua equipe de trabalho e (b) com van der Waals (à direita)	122
Figura 35 -	Curvas da função de energia potencial de Gustav Mie	125
Figura 36 -	Erwin Schrödinger e Fritz London (à direita) em Berlim, em 1928	127
Figura 37 -	Gráfico das temperaturas de ebulição dos hidretos dos calcogênios em função de seus números de elétrons	130
Figura 38 -	Polimorfos da hidrona de acordo com Armstrong, em 1923	131
Figura 39 -	Representações estruturais do hidróxido de trimetilamônio (à esquerda) e do hidróxido de tetrametilamônio (à direita) feitas por Moore e Winmill, em 1912	132

Figura 40 -	Representações estruturais atualizadas do hidróxido de trimetilamônio (à esquerda) e do hidróxido de tetrametilamônio (à direita)	132
Figura 41 -	Representação da molécula de água feita por W. Kossel, em 1916	133
Figura 42 -	Representações moleculares de Latimer e Rodebush, em 1920	134
Figura 43 -	A estrutura cristalina da água, proposta por William Bragg em 1922	135
Figura 44 -	Arranjo tetraédrico de cinco moléculas de água no gelo	136
Figura 45 -	Ligações hidrogênio intermoleculares (à esquerda) e intramoleculares (à direita) realizadas por ácidos carboxílicos, numa representação de Linus Pauling	137
Figura 46 -	(a) As estruturas de ressonância e (b) o híbrido das amidas	139
Figura 47 -	(a) As estruturas de ressonância e (b) o híbrido de uma ligação hidrogênio genérica $X-H \cdots Y$	139
Figura 48 -	Ilustração do fenômeno de interferência de onda na formação de uma ligação química	140
Figura 49 -	Primeira imagem de uma ligação hidrogênio, obtida através da técnica de microscopia de força atômica em 2013	141
Figura 50 -	Imagens retiradas de livros de química recentes, da Educação Básica e Superior, e que apresentam as interações intermoleculares como processos de contato – colisão, encaixe e entrelaçamento	150
Figura 51 -	Imagens retiradas de literaturas de química recentes e que apresentam as interações intermoleculares segundo concepções racionalistas	152
Figura 52 -	Capa do <i>e-book</i> elaborado como produto educacional da dissertação	154
Figura 53 -	Perfil epistemológico dos docentes na explicação da compressibilidade dos gases	168
Figura 54 -	(a) As estruturas de ressonância e (b) o híbrido de uma ligação hidrogênio entre moléculas de HCl	170
Figura 55 -	Modelo criado por estudantes do Ensino Médio para explicar como as colas são capazes de colar papeis	173
Figura 56 -	Perfil epistemológico dos docentes na explicação da solubilidade mútua entre as substâncias químicas	175
Figura 57 -	Representações materiais das ligações químicas	178
Figura 58 -	Representações materiais das ligações químicas e das interações intermoleculares	179
Figura 59 -	Resultados da pesquisa com docentes: questão B3-Q5a	181
Figura 60 -	Resultados da pesquisa com docentes: questão B3-Q5b	182
Figura 61 -	Resultados da pesquisa com docentes: questão B3-Q5c	184
Figura 62 -	Previsão de resultados para a questão B3-Q5d	185
Figura 63 -	Resultados da pesquisa com docentes: questão B3-Q5d	187

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Trabalhos publicados com propostas originais de perfis epistemológicos	61
Tabela 2 -	Livros didáticos de química voltados à Educação Básica e que tratam o termo “interação intermolecular” como equivalente ao termo “força intermolecular”	64
Tabela 3 -	Constantes de van der Waals	114
Tabela 4 -	Substâncias liquefeitas antes de 1873	118
Tabela 5 -	Substâncias liquefeitas depois de 1873	121
Tabela 6 -	Forma matemática dos potenciais das forças de van der Waals	128
Tabela 7 -	Contribuições percentuais das energias potenciais intermoleculares de Keesom, de Debye e de London na coesão de duas moléculas idênticas de diferentes substâncias químicas a 300 K, interagindo no vácuo a uma distância de 20 Å	129
Tabela 8 -	Resultados da questão B1-Q1 da pesquisa com docentes: Qual foi o seu curso de graduação?	157
Tabela 9 -	Resultados da questão B1-Q2 da pesquisa com docentes: Fez ou faz especialização ou aperfeiçoamento? Se sim, qual a sua área de especialização ou aperfeiçoamento?	158
Tabela 10 -	Resultados da questão B1-Q3 da pesquisa com docentes: Fez ou faz mestrado? Se sim, qual a sua área de mestrado?	159
Tabela 11 -	Resultados da questão B1-Q4 da pesquisa com docentes: Fez ou faz doutorado? Se sim, qual a sua área de doutorado?	159
Tabela 12 -	Resultados da questão B1-Q6 da pesquisa com docentes: Quantos anos de experiência você possui no ensino de química na Educação Básica?	160
Tabela 13 -	Resultados da questão B1-Q7 da pesquisa com docentes: Quantos anos de experiência você possui no ensino de química na Educação Superior?	161
Tabela 14 -	Resultados da questão B1-Q8 da pesquisa com docentes: Em qual(is) rede(s) de ensino você já atuou ou atua como docente?	162
Tabela 15 -	Resultados da questão B2-Q2 da pesquisa com docentes: Com qual frequência você ensina sobre as interações intermoleculares?	163
Tabela 16 -	Resultados da questão B2-Q3 da pesquisa com docentes: Motivos pelos quais o estudo das interações intermoleculares é relevante	164
Tabela 17 -	Resultados da questão B2-Q4 da pesquisa com docentes: Como os docentes de química buscam se atualizar e/ou se aprofundar sobre o conceito de interação intermolecular	165
Tabela 18 -	Resultados da questão B3-Q1 da pesquisa com docentes, sobre a compressibilidade dos gases	167
Tabela 19 -	Resultados da questão B3-Q2 da pesquisa com docentes, sobre a solubilidade mútua entre o H ₂ O e o O ₂	174

Tabela 20 -	Resultados da questão B3-Q3 da pesquisa com docentes, sobre a relação do tipo de interação intermolecular com a fórmula e a estrutura moleculares	176
Tabela 21 -	Resultados da questão B3-Q4 da pesquisa com docentes, sobre a classificação ontológica das interações intermoleculares	179
Tabela 22 -	Resultados da questão B3-Q5d da pesquisa com docentes, sobre a observação das ligações hidrogênio	188

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	16
OBJETIVOS	21
METODOLOGIA	22
 1 - CAPÍTULO I – GASTON BACHELARD E A NOÇÃO DE PERFIL EPISTEMOLÓGICO	 28
1.1 - UM BREVE PANORAMA DA EUROPA DO SÉCULO XX	29
1.2 - O PROTAGONISMO DA CIÊNCIA NO SÉCULO XX	32
1.3 - GASTON BACHELARD: UMA PEQUENA BIOGRAFIA	35
1.4 - A FUNDAMENTAÇÃO DE UMA EPISTEMOLOGIA DO PORMENOR	37
1.4.1 - A maturação filosófica dos conceitos científicos	41
1.4.2 - O racionalismo aplicado	46
1.4.3 - As rupturas epistemológicas	49
1.5 - OS PERFIS EPISTEMOLÓGICOS	52
1.5.1 - O valor pedagógico dos perfis epistemológicos	58
 2 - CAPÍTULO II – AS ORIGENS DO CONCEITO DE “INTERAÇÃO INTERMOLECULAR”	 64
2.1 - UMA DEFINIÇÃO AMPLA DO CONCEITO DE “INTERAÇÃO INTERMOLECULAR”	64
2.2 - A EVOLUÇÃO HISTÓRICA DO CONCEITO DE “INTERAÇÃO INTERMOLECULAR”	68
2.2.1 - A elaboração do atomismo na Grécia antiga e o seu regresso na Europa do século XV	70
2.2.2 - A mescla entre a teoria atômica e a física dos fluidos nos séculos XVI e XVII	77
2.2.3 - Os estudos sobre a capilaridade do século XVII ao XIX	85
2.2.3.1 - <i>Século XVII</i>	86
2.2.3.2 - <i>Século XVIII</i>	89
2.2.3.3 - <i>Século XIX</i>	101
2.2.4 - Johannes Diderik van der Waals	109
2.2.4.1 - <i>A liquefação dos gases permanentes e a equação de estado do virial</i>	117
2.2.4.2 - <i>As “moléculas elétricas”</i>	123
2.2.5 - A água e as ligações hidrogênio	130

3 -	CAPÍTULO III – O PERFIL EPISTEMOLÓGICO DO CONCEITO DE INTERAÇÃO INTERMOLECULAR E AS CONCEPÇÕES DOS DOCENTES DE QUÍMICA	143
3.1 -	O PERFIL EPISTEMOLÓGICO DO CONCEITO DE INTERAÇÃO INTERMOLECULAR	143
3.1.1 -	O perfil em uso hoje	149
3.2 -	O PRODUTO EDUCACIONAL DA DISSERTAÇÃO	153
3.3 -	A UTILIZAÇÃO DO PERFIL EPISTEMOLÓGICO JUNTO A DOCENTES DE QUÍMICA	155
3.3.1 -	BLOCO 1 – A formação acadêmica e a experiência profissional dos docentes	156
3.3.1.1 -	<i>A formação acadêmica</i>	156
3.3.1.2 -	<i>A experiência profissional</i>	159
3.3.2 -	BLOCO 2 – A experiência dos docentes no ensino das interações intermoleculares	162
3.3.3 -	BLOCO 3 – Como os docentes de química concebem as interações intermoleculares e explicam fenômenos associados a elas	166
	CONCLUSÃO	190
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	193
	APÊNDICE A – Formulário aplicado a docentes de química da educação básica e/ou superior sobre as interações intermoleculares	214
	APÊNDICE B – Dados brutos obtidos com o formulário aplicado a docentes de química sobre as interações intermoleculares	218

Introdução

Para que um novo instrumento lógico se construa, é preciso sempre instrumentos lógicos preliminares; quer dizer que a *construção* de uma nova noção suporá sempre substratos, subestruturas anteriores (PIAGET, 1983b, p. 215, grifo nosso).

Esta é a máxima construtivista. O conhecimento e as estruturas que o possibilitam não são obtidos prontos e acabados. Eles são resultados de um processo paulatino de construção, no qual as novas formas só se estabelecem a partir de formas anteriores, já consolidadas (COLL et al., 2009). Como disse Bachelard (1996): “Nada é evidente. Nada é gratuito. Tudo é construído” (p. 18). E, nessa perspectiva, é preciso dizer que *a construção de um perfil epistemológico para o conceito de interação intermolecular* possui uma história, que, por sua vez, está intimamente ligada à formação acadêmica e profissional de seu autor.

Durante a minha licenciatura em química, realizada na Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ) no período de 2012 a 2017, tive o privilégio de cursar uma iniciação à docência vinculada ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação à Docência (PIBID), administrado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). E, em 2015, um dos anos da minha estadia nesse programa, pude desenvolver um projeto no Colégio Estadual Professor Ernesto Faria – situado no bairro de São Cristóvão, no município do Rio de Janeiro (RJ) – com a finalidade de apresentar seus produtos na “Feira do Conhecimento”¹ promovida por essa instituição escolar.

O projeto, denominado pelos estudantes participantes de “Projeto Atmosfera”, tinha o propósito de abordar alguns problemas ambientais, como a destruição da camada de ozônio, o efeito estufa e o aquecimento global. Porém, na primeira reunião com os estudantes, decidi fazer uma pesquisa de suas concepções alternativas sobre o estado gasoso da matéria. E os dados obtidos nessa pesquisa deram origem ao meu trabalho de conclusão de curso da graduação, intitulado *O estado gasoso na concepção de estudantes do Ensino Médio*.

Nesse trabalho, pude constatar que, apesar do conceito de “estado gasoso” ser explanado desde os primeiros anos da Educação Básica, ele ainda suscita muitas concepções

¹ A Feira do Conhecimento era um evento tradicional do Colégio Estadual Professor Ernesto Faria, no qual os estudantes expunham e apresentavam trabalhos na forma de cartazes, banners, maquetes e experimentos. O evento ocorria anualmente, a partir da escolha de um tema comum a toda comunidade escolar. E, no ano de 2015, a temática escolhida pelo corpo docente da instituição foi “meio ambiente”.

conflitantes com o conhecimento científico em vigor. E mais... Muitas dessas concepções se alinham a perspectivas sobre os gases que, um dia, já foram adotadas pela Academia, através dos pensamentos de Anaxímenes de Mileto (585-528 a.C.) e de Aristóteles (384-322 a.C.).

No entanto, após a apresentação dessas conclusões, algo me incomodou. Ainda que eu não tenha dito isto, fiquei com a impressão de que, ao contrapor o conhecimento cotidiano (o senso-comum) ao conhecimento científico, associei a pluralidade ao primeiro tipo de conhecimento e a singularidade ao segundo. Em outras palavras, ao confrontar diferentes concepções alternativas com a ciência atual, dei a entender que o senso comum é naturalmente diverso, heterogêneo, enquanto que a ciência se constitui de uma perspectiva única, monolítica, consensual. É a ideia representada na Figura 0.1, na qual o número de pessoas (em ambos os lados) simboliza o número de concepções de um dado conceito.

Figura 0.1 – Uma representação equivocada do senso-comum e do conhecimento científico



Fonte: O autor, 2024

Contudo, não é adequado diferenciar o conhecimento cotidiano do conhecimento científico nesses termos. Esses conhecimentos são diferentes, sim, quanto à forma de empregar a razão, quanto ao rigor na verificação experimental de suas conclusões, quanto à sistematização de suas ideias, quanto à aderência por parte da população comum etc. (LAKATOS, MARCONI, 1991; COTRIM, FERNANDES, 2013; MOREIRA, MASSONI, 2016). Todavia, de maneira genérica, eles não se distinguem pelo número de concepções que reúnem sobre os diversos conceitos. E isso quer dizer que a ciência também pode ser plural! Nela, também podem coexistir, em uma harmonia refinada, variadas perspectivas sobre um mesmo objeto.

Desse modo, ao contrapor o senso-comum ao conhecimento científico, levando em consideração os seus conjuntos de concepções, a Figura 0.2 tornar-se-ia mais adequada do que a anterior.

Figura 0.2 – Uma representação mais adequada do senso-comum e do conhecimento científico



Fonte: O autor, 2024

Então, com a intenção de pleitear por essas ideias, retornei aos referenciais utilizados na fundamentação teórica do meu trabalho de conclusão de curso da graduação. Dentre eles, havia o epistemólogo francês Gaston Bachelard (1884-1962) e o educador brasileiro Eduardo Fleury Mortimer, ambos empregados a fim de defender a tese de que, em um mesmo sujeito, diferentes concepções sobre um mesmo conceito podem coabitar.

Bachelard, nos anos de 1940, propôs a noção de *perfil epistemológico*. Esse perfil consiste em um recurso gráfico no qual as variadas concepções de um conceito científico encontram-se dispostas em diferentes zonas, associadas a compromissos filosóficos particulares, e em uma sequência historicamente definida (BACHELARD, 1978a). E Mortimer, nos anos 90, propôs o chamado *perfil conceitual*, baseando-se nas proposições bachelardianas. Esse último perfil agrupa não somente as concepções científicas sobre um determinado conceito, mas também todas as concepções alternativas identificadas através de pesquisas sobre ele, sejam elas ontologicamente semelhantes ou não (MORTIMER, 1996).

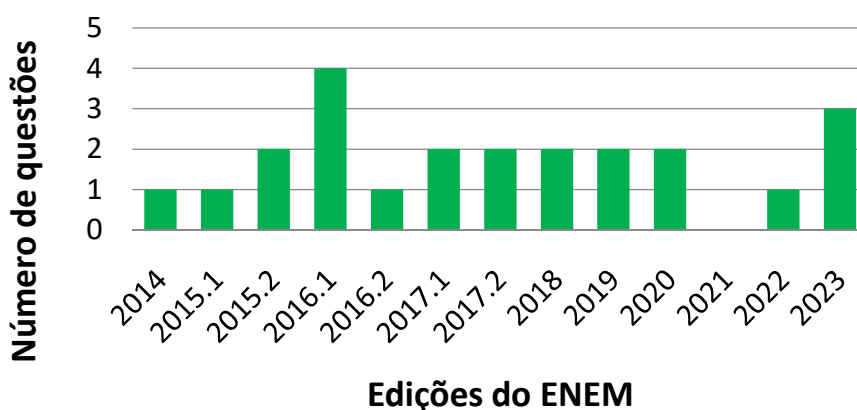
Em vista disso, uma vez que já havia trabalhado com concepções alternativas e desejei, posteriormente, demonstrar a pluralidade de perspectivas que também existe na ciência, resolvi me aprofundar em Bachelard. Assim, em meu projeto de trabalho de mestrado, decidi propor um perfil epistemológico para algum conceito científico da área da química. O próximo passo, então, foi escolher qual conceito se tornaria o alvo da minha nova

pesquisa. E partindo, outra vez, da monografia defendida por mim na licenciatura, busquei por conceitos que fossem subjacentes à descrição de quaisquer estados físicos. Daqui, veio a escolha das *interações intermoleculares*.

O conhecimento das interações intermoleculares é de grande valia na explicação de diversas propriedades da matéria e de inúmeros fenômenos, como, por exemplo, o estado de agregação das substâncias, suas temperaturas de fusão e de ebulição, suas solubilidades mútuas, tensões superficiais, viscosidades, molhabilidades, adesões a diferentes materiais etc. (ATKINS, JONES, 2012; ROCHA, 2001; SAMPAIO et al., 2015).

E a relevância desse conceito também pode ser inferida a partir da sua incidência nos exames de ingresso às universidades. Uma análise das provas do Exame Nacional do Ensino Médio (ENEM), compreendidas entre os anos de 2014 e 2023, revela a alta frequência com a qual o conceito de interação intermolecular é avaliado. Observe o gráfico que compõe a Figura 0.3:

Figura 0.3 – Frequência do conceito de interação intermolecular e de conceitos relacionados (como polaridade das moléculas, solubilidade mútua de substâncias químicas etc.) nas provas do Exame Nacional do Ensino Médio (ENEM) de 2014 a 2023



Fonte: O autor, 2024

Muitos outros pesquisadores brasileiros já se debruçaram na construção de perfis epistemológicos (MARTINS, 2004; SANTOS, 2009; SOUZA FILHO, 2009; BARROS, 2010; COLOMBO JUNIOR, 2010; SILVA JUNIOR, 2011; BUSCATTI JUNIOR, 2014; JUSTINA, CALDEIRA, 2014; CEDRAN, 2015; PAZINATO, 2016; TREVISAN, ANDRADE, 2016; ANDRADE et al., 2017; MAIA, 2017; TRINTIN, 2018; DORIGON et

al., 2019; MELO, 2020; SILVA, 2021). E esse número se explica quando enumeramos os potenciais benefícios dos perfis epistemológicos para o ensino de ciências.

Os perfis epistemológicos são ferramentas que permitem analisar em qual condição as estruturas cognitivas dos indivíduos estão na apreensão de um determinado conceito científico, e a identificação desse estágio é de grande valia para compreender quais obstáculos epistemológicos ainda precisam ser superados no processo de ensino-aprendizagem. Dessa maneira, os perfis se tornam indicadores dos caminhos que a educação científica ainda precisa trilhar.

Além disso, os perfis epistemológicos constituem-se de uma base teórica consistente e relativamente acessível para a compreensão da natureza da ciência, entendendo-a não de forma dogmática, mas como um tipo de conhecimento dinâmico – em constante processo de (re)construção – e crítico, dotado de historicidade. Nesse sentido, acredita-se que um perfil epistemológico para o conceito de interação intermolecular pode trazer importantes contribuições para um ensino mais significativo e para uma abordagem menos classificatória desse conceito, como o estudo de Junqueira (2017) demonstrou ser necessário.

Isto posto, no **capítulo 1** desta dissertação, apresentaremos o seu referencial teórico: o epistemólogo francês Gaston Bachelard, com sua noção de perfil epistemológico. Uma vez que a construção de um perfil epistemológico requer uma revisão histórica sobre o “conceito alvo” da pesquisa, retrataremos, no **capítulo 2**, a evolução do conceito de interação intermolecular na história do Ocidente. E, no **capítulo 3**, finalmente, construiremos o perfil epistemológico das interações intermoleculares e, a partir dele, justificaremos o produto educacional desta dissertação e, em seguida, apontaremos os resultados de uma pesquisa feita com docentes de química a fim de compreender como eles concebem as interações que ocorrem entre as entidades moleculares da matéria e os fenômenos associados.

Como se dá o progresso do conhecimento científico? O que a ciência dos séculos XX e XXI tem de diferente de outras épocas da história da Humanidade? O que são interações intermoleculares? Quando esse conceito começou a ser pensado? Como ele se desenvolveu, no âmbito do conhecimento científico ocidental, até os dias atuais? Quantas concepções das interações intermoleculares coexistem no discurso científico vigente? Quando (e como) os professores de química expressam essas concepções sobre as interações intermoleculares? São algumas das perguntas norteadoras desta dissertação.

Objetivos

Objetivo geral

Propor, segundo a epistemologia histórica de Gaston Bachelard, um perfil epistemológico para o conceito de interação intermolecular e, por fim, utilizá-lo para compreender como docentes de química concebem esse conceito.

Objetivos específicos

- ✓ Fazer uma revisão bibliográfica sobre Gaston Bachelard e sobre a sua noção de perfil epistemológico;
- ✓ Definir, numa acepção ampla, o que são interações intermoleculares;
- ✓ Elaborar uma narrativa histórica sobre a evolução do conceito de interação intermolecular no Ocidente, do século V a.C. até a atualidade;
- ✓ Analisar a história do conceito de interação intermolecular à luz das categorias filosóficas adotadas por Bachelard e, a partir disso, identificar e caracterizar as zonas do perfil epistemológico desse conceito;
- ✓ Investigar, a partir do perfil epistemológico construído, como docentes de química da Educação Básica e/ou Superior concebem as interações intermoleculares e explicam fenômenos associados a elas.
- ✓ Elaborar, como um produto educacional da pesquisa desta dissertação, um *e-book* que aborda, de maneira sucinta e lúdica, as diferentes perspectivas do conceito de interação intermolecular segundo seu perfil epistemológico;

Metodologia

A construção desta dissertação ocorreu em três partes, que compreendem três pesquisas inter-relacionadas:

PARTE 1 – Apropriação do referencial teórico: Gaston Bachelard

PARTE 2 – Investigação sobre a história do conceito de interação intermolecular

PARTE 3 – Investigação sobre como docentes de química concebem as interações intermoleculares

O procedimento metodológico adotado em cada uma delas segue abaixo.

PARTE 1 - Apropriação do referencial teórico: Gaston Bachelard

A primeira parte do trabalho da dissertação consistiu em uma pesquisa de abordagem qualitativa e de fim descritivo, enquadrando-se, metodologicamente, como uma pesquisa bibliográfica.

Com os objetivos de (i) fazer uma pequena biografia do epistemólogo francês Gaston Bachelard, levando em consideração seu contexto espaço-temporal, a Europa do século XX; de (ii) relatar como ele desenvolveu sua noção de perfil epistemológico e de (iii) demonstrar o valor pedagógico dos perfis epistemológicos, seguiu-se as orientações de Gil (2022) sobre como elaborar uma pesquisa bibliográfica após a escolha do tema e a formulação do problema de pesquisa. Gil (2022) estabelece as seguintes etapas para esse tipo de pesquisa:

- a. *Identificação, localização e obtenção das fontes*, ou seja, a aquisição dos materiais de interesse para a pesquisa;
- b. *Leitura dos materiais*;
- c. *Tomada de apontamentos*, o destaque de pontos importantes (ou não) para a pesquisa nos materiais lidos;
- d. *Fichamento*, que envolve a identificação das obras consultadas, o registro dos conteúdos relevantes para a pesquisa, o registro das ideias que surgiram durante a leitura e a sistematização dessas informações para a organização lógica do trabalho;
- e. *Organização lógica do trabalho*, isto é, a organização das ideias a fim de atender aos objetivos da pesquisa, o que inclui a estruturação do trabalho para que ele possa ser entendido como uma “unidade dotada de sentido” (p. 57);
- f. *Redação do texto*.

Desse modo, vale frisar que, nessa primeira parte do trabalho da dissertação, foram utilizadas fontes primárias (da autoria de Bachelard) e secundárias (de comentadores). Dentre as fontes primárias, a obra *A Filosofia do Não* (1940) se destaca, pois foi nela que a noção de perfil epistemológico foi inaugurada. E quanto às fontes secundárias (que incluem artigos científicos, monografias, dissertações, teses etc.), é preciso mencionar que muitas foram extraídas de bibliotecas e de bancos virtuais de pesquisa (como o Google Acadêmico, o Portal de Periódicos da CAPES e a *Scientific Eletronic Library Online* - SciELO), usando as palavras-chave (ou descritores) “Bachelard” e “perfil epistemológico”.

Os resultados dessa primeira pesquisa deram fruto ao capítulo 1 desta dissertação, que também traz uma revisão bibliográfica dos trabalhos brasileiros, realizados de 2004 a 2021, que se propuseram a construir perfis epistemológicos sobre diversos conceitos científicos. Trabalhos com esse objetivo e que, eventualmente, foram publicados em outros anos não foram encontrados nessa revisão “livre”.

PARTE 2 - Investigação sobre a história do conceito de interação intermolecular

A segunda parte do trabalho da dissertação consistiu em uma pesquisa de abordagem qualitativa e de fim exploratório, enquadrando-se, metodologicamente, como uma pesquisa bibliográfica de cunho historiográfico.

Sabendo que a epistemologia de Gaston Bachelard é tida como uma “epistemologia histórica”, a construção do perfil epistemológico para o conceito de interação intermolecular teve que considerar, inevitavelmente, o desenvolvimento histórico desse conceito. Dessa forma, primeiramente, buscou-se definir o que são as interações intermoleculares numa acepção ampla e científica. E, posteriormente, com a posse dessa definição, deu-se início à pesquisa histórica sobre esse conceito. Aqui, além das orientações de Gil (2022) para a elaboração de uma pesquisa bibliográfica, somaram-se as considerações de Kragh (1987) e de Luca (2023)² sobre as práticas de pesquisa em história.

Assim, de posse do problema de *como o conceito de interação intermolecular evoluiu ao longo da história do Ocidente*, que se tornou o objeto da pesquisa historiográfica, a próxima medida foi realizar a sua periodização – isto é, delimitar o período histórico sobre o qual a pesquisa se debruçaria. E, para isso, respondendo à pergunta de quando o conceito de

² Kragh (1987) e Luca (2023) não dão orientações rígidas (como um “passo a passo”) sobre como elaborar uma pesquisa historiográfica. Os autores trazem apenas problematizações ancoradas em algumas categorias, como as de problema (ou objeto) de pesquisa; periodização; meios (ou fontes) de pesquisa; perspectivas (ou abordagens) historiográficas etc.

interação intermolecular (numa acepção ampla) começou a ser pensado na história do Ocidente, foi feita a seguinte hipótese: "as interações intermoleculares, enquanto processos que ocorrem entre entidades moleculares sem que haja a formação de novas substâncias, começaram a ser pensadas no mesmo momento em que se concebeu que a matéria é descontínua".

Essa hipótese conduziu a pesquisa à leitura de materiais sobre os atomistas gregos antigos, com ênfase para Leucipo de Mileto (século V a.C.) e Demócrito de Abdera (460 – 370 a.C.). E, com base no material coletado, pôde-se confirmar a hipótese e, por fim, delimitar o período histórico sob investigação: do século V a.C. até a atualidade. Esse período é, sem sombra de dúvidas, muito amplo, compreendendo cerca de vinte e seis séculos. Entretanto, os resultados encontrados na pesquisa adquirem consistência quando (i) o tempo dedicado ao trabalho de mestrado; (ii) os tipos de fontes e (iii) as perspectivas (ou abordagens) historiográficas adotadas na pesquisa são considerados.

Tanto fontes primárias como secundárias foram utilizadas. E, evidentemente, quanto mais distante uma personalidade ou um tema estavam dos dias atuais, mais as fontes secundárias sobre eles se sobrepuseram às primárias. Além disso, a narrativa histórica construída adotou uma abordagem mista entre a horizontal (internalista) e a vertical (externalista), com ênfase para a primeira (KRAGH, 1987; POMBO, 2022). Isto é, centrou-se a investigação nos significados que as interações intermoleculares foram adquirindo, desde o século V a.C., no âmbito científico (principalmente da física e da química). Todavia, com o intuito de minimizar as lacunas históricas, alguns cenários políticos, econômicos e culturais foram considerados e descritos, principalmente quando se tratavam de períodos que demarcam importantes mudanças sociais.

No mais, é preciso dizer que, durante todo esse processo de pesquisa, novas questões foram surgindo, demandando a elaboração de novas hipóteses e conduzindo à busca por novas fontes. E os resultados desse vagaroso processo deram origem à narrativa registrada no capítulo 2 da dissertação, que permitiu, finalmente, (i) a construção do perfil epistemológico do conceito de interação intermolecular, à luz das categorias epistemológicas utilizadas por Bachelard, e (ii) a confecção do produto educacional da dissertação. Esses dois últimos frutos da pesquisa historiográfica foram relatados no capítulo 3.

PARTE 3 - Investigação sobre como docentes de química concebem as interações intermoleculares

A terceira (e última) parte do trabalho da dissertação consistiu em uma pesquisa de abordagem qualitativa e de fim exploratório, enquadrando-se, metodologicamente, como um levantamento.

Gaston Bachelard, em sua obra intitulada *A Filosofia do Não* (1940), fez questão de utilizar os perfis epistemológicos dos conceitos de massa e de energia após construí-los. Desde então, tornou-se comum que trabalhos que se debruçam na construção de perfis epistemológicos também se encarreguem de utilizá-los (MARTINS, 2004; SOUZA FILHO, 2009; BARROS, 2010; COLOMBO JUNIOR, 2010; SILVA JUNIOR, 2011; BUSCATTI JUNIOR, 2014; JUSTINA, CALDEIRA, 2014; CEDRAN, 2015; PAZINATO, 2016; TREVISAN, ANDRADE, 2016; MAIA, 2017; TRINTIN, 2018; DORIGON et al., 2019; MELO, 2020; SILVA, 2021).

Nesses usos dos perfis, observa-se que prevalece o emprego de questionários, formulários e/ou entrevistas. O público costuma ser de discentes da Educação Básica (em geral, do ensino médio) (MARTINS, 2004; PAZINATO, 2016; MELO, 2020) e de discentes da graduação (principalmente, das licenciaturas) (SOUZA FILHO, 2009; BARROS, 2010; COLOMBO JUNIOR, 2010; BUSCATTI JUNIOR, 2014; JUSTINA, CALDEIRA, 2014; CEDRAN, 2015; TREVISAN, ANDRADE, 2016; SILVA, 2021). Os trabalhos com docentes ainda são poucos, num comparativo (SILVA JUNIOR, 2011; PAZINATO, 2016; SILVA, 2021). E o segundo meio mais empregado na aplicação dos perfis é a análise de livros didáticos, sejam eles da Educação Básica ou Superior (CEDRAN, 2015; PAZINATO, 2016; MAIA, 2017; TRINTIN, 2018; DORIGON et al., 2019).

Logo, com o objetivo de aplicar o perfil epistemológico construído para o conceito de interação intermolecular, buscou-se investigar como docentes de química (da Educação Básica e/ou Superior) concebem as interações intermoleculares e explicam alguns dos fenômenos associados a elas. Nesse intuito, seguiu-se as orientações de Gil (2022) sobre como elaborar um levantamento. Esse autor estabelece a seguinte sequência, após a especificação dos objetivos da pesquisa:

- a. *Elaboração do instrumento de coleta de dados*, que pode ser um questionário, um formulário, uma entrevista etc.
- b. *Pré-teste do instrumento*, ou seja, “sua aplicação na versão preliminar [...] [a fim de] identificar perguntas problemáticas, que justifiquem modificação da redação, alteração do formato ou mesmo sua eliminação na redação final” (p. 102).

- c. *Seleção da amostra*, isto é, a quantidade e o perfil dos respondentes;
- d. *Coleta e verificação de dados*;
- e. *Análise dos dados*;
- f. *Redação do texto*.

Assim, para os fins desta dissertação, foi elaborado um formulário como instrumento de coleta de dados (Apêndice A).

O formulário foi estruturado em três blocos, contendo questões objetivas e discursivas. No Bloco 1 (B1), foram elencadas 8 questões (B1-Q1, B1-Q2, (...), B1-Q8) com o propósito de conhecer a formação acadêmica e a experiência profissional dos docentes. No Bloco 2 (B2), foram arroladas 4 questões (B2-Q1, (...), B2-Q4) a fim de conhecer, especificamente, a experiência dos docentes no ensino das interações intermoleculares. E, no Bloco 3 (B3), foram elencadas 5 questões (B3-Q1, (...), B3-Q5), nas quais o objetivo era saber como os docentes de química concebem as interações intermoleculares e explicam fenômenos associados (como a coesão da matéria, as transformações dos estados físicos e a solubilidade mútua entre as substâncias).

O formulário foi replicado para o Google Forms, um aplicativo de gerenciamento de pesquisas do Google, onde o tempo de preenchimento foi estimado em 25 minutos. E, com o intuito de que os respondentes se sentissem ainda mais à vontade para expor seus conhecimentos de química, o preenchimento do formulário se deu de forma anônima, mesmo que um termo de consentimento livre e esclarecido tenha sido assinado por todos os participantes.

O pré-teste desse formulário foi feito com 4 docentes. E os resultados obtidos permitiram, além de ajustes no instrumento de coleta de dados, uma participação em um evento da área de ensino de química em 2021, a III Jornada de Ensino de Química do Colégio Pedro II, com a publicação do trabalho intitulado “Como professores de química entendem as interações intermoleculares: Prólogo de uma pesquisa”.

A versão final do formulário, por sua vez, foi divulgada em grupos de docentes de química de diferentes redes sociais. E, ao todo, num período de 6 semanas, foram coletadas 20 (vinte) respostas, que correspondem a 20 (vinte) docentes de química³. Na continuação da

³ Bachelard (1978a), após a construção dos perfis epistemológicos de massa e de energia, aplicou-os a si mesmo, mediante uma “autoanálise”. Isso demonstra que as utilizações dos perfis, desde as suas primeiras ocorrências, não se reservam a uma quantidade específica de indivíduos. Tais utilizações podem ser feitas a um grupo ou a apenas uma pessoa (seja ela o outro ou a si).

pesquisa, devido ao anonimato, esses respondentes foram identificados pelos códigos D01, D02, (...), D20 (na ordem em que preencheram o formulário).

Dessa forma, após a coleta de dados através do formulário, foi a vez de analisá-los objetivamente. E, nessa análise, empregou-se o conjunto de técnicas definido por Bardin (1977). Esse autor estabelece três fases para uma análise de conteúdo (p. 121):

- a. *Pré-análise*;
- b. *Exploração do material*;
- c. *Tratamento dos resultados*.

Na pré-análise, os dados recebem uma primeira organização. É feita uma leitura flutuante dos dados a fim de escolher quais deles comporão o *corpus* da pesquisa – ou seja, o material que seguirá sob análise. Depois da preparação do *corpus*, segue-se a exploração desse material. E, nessa fase de exploração, os dados “brutos” são agregados, sistematicamente, em unidades dotadas de sentido. Por fim, essas “unidades dotadas de sentido” são tratadas. Isto é, elas são categorizadas, descritas, quantificadas (permitindo a leitura de incidências) e interpretadas.

Desse modo, com os resultados obtidos através da análise das respostas do formulário, foi possível concluir o capítulo 3 desta dissertação.

Capítulo I –

Gaston Bachelard e a noção de perfil epistemológico

O desenvolvimento humano é um tema que, há séculos, atravessa diversas áreas do conhecimento (como a filosofia, a biologia, a psicologia, a antropologia e a educação). E sobre esse tema, diversas perspectivas já foram apresentadas. Alguns pensadores já defenderam que somos mera expressão de nossa “essência individual”, do nosso “instinto” ou, ainda, da nossa hereditariedade. Segundo eles, já nasceríamos com as nossas identidades e potencialidades definidas; e viver seria apenas o manifestar desses atributos particulares. Outros, reagindo de forma repulsiva a esse pensamento, se resguardaram no extremo oposto: defenderam que somos simples produtos do meio. Desse modo, nasceríamos como “folhas em branco”, completamente passivos às inscrições da vida (PORTO, 2006).

No entanto, há uma terceira abordagem sobre o desenvolvimento humano, segundo a qual não nascemos prontos, como diriam os inatistas, nem vazios, como diriam os ambientalistas. De acordo com essa nova abordagem, somos o resultado de uma contínua inter(ação), onde nosso “eu” se encontra numa permanente equilibração com o meio que nos insere; em um processo no qual construímos o outro à medida que, por ele, somos construídos. E é nesse processo, também conhecido como interacionismo, que transformamos a história, a sociedade e a cultura; e, inevitavelmente, como um revés, somos transformados por elas (CATHARINO, 20--; PORTO, 2006; QUEIROZ, 1998)⁴. Essa última perspectiva, de cunho mais dialético, é de grande valia para uma melhor compreensão da pessoa e da obra de Gaston Bachelard (1884-1962), o referencial teórico deste trabalho.

Nesse sentido, fica claro que não há qualquer pretensão de se referir ao poeta, filósofo, epistemólogo e professor francês segundo o estereótipo do “gênio iluminado”, consagrado para revelar à Humanidade, um conhecimento à frente de sua época⁵. Assim como, obviamente, não há qualquer anseio de diminuir a importância e o ineditismo do autor, tratando-o como se fosse um simples e imparcial “reverberador” dos pensamentos correntes em sua terra e em seu tempo⁶. Espera-se que Bachelard seja lido em consonância com o seu

⁴ Essas perspectivas sobre o desenvolvimento humano também foram abordadas por Bachelard. No tópico 1.5.1, que trata sobre o valor pedagógico dos perfis epistemológicos, essas perspectivas voltarão a ser comentadas.

⁵ Ideia inatista.

⁶ Ideia ambientalista.

influyente (e influenciado) contexto⁷. Por essa razão, antes de adentrarmos na síntese de algumas de suas ideias, faremos um breve panorama da Europa do século XX e uma pequena biografia desse pensador francês.

1.1. UM BREVE PANORAMA DA EUROPA DO SÉCULO XX

Se uma sinopse do século XX fosse entregue a um jovem parisiense da década de 1900, muito provavelmente ele pensaria que se tratava de uma distopia, uma composição futurista elaborada por alguma mente oscilante entre a melancolia e a cólera. Isso porque, no alvorecer do século, a vida cotidiana nos países europeus parecia um tanto incompatível com as tragédias que se sucederiam. Para muitos, as guerras pareciam ser compreendidas como medidas ultrapassadas, não civilizadas, pois, finalmente, difundia-se uma esperança na Humanidade.

De 1871 a 1914, os países europeus compartilharam de um grande avanço nos campos das artes e das ciências. Enquanto o impressionismo se consolidou como um estilo artístico, nasceu a *art nouveau*. Diversas tecnologias foram apresentadas à sociedade, como o cinema, o telefone, os automóveis semelhantes aos atuais e o avião. E esse florescimento intelectual, acompanhado do crescimento econômico de diversas nações, criaram uma sensação de prosperidade e de progresso que, nos grandes centros urbanos europeus, se refletia na promoção de diversos eventos: exposições, feiras, bailes etc. (LIMA, 2018). Esse clima inspirador e festivo marcou esse período como a *belle époque*, que, em francês, significa “época bela”.

No entanto, essa paz mascarava uma série de tensões que se intensificavam no tecido político europeu. A guerra franco-prussiana (1870-1871) havia ocorrido recentemente entre a França e os países que, logo após o conflito, se unificaram na constituição do Estado alemão. A França, derrotada nos campos de batalha, também perdeu o território da Alsácia-Lorena (rico em carvão e ferro⁸) e foi humilhada ao ter que declarar formalmente a vitória alemã em um dos maiores símbolos da história francesa, o palácio de Versalhes. Essa humilhação

⁷ Ideia alinhada à perspectiva interacionista sobre o desenvolvimento humano.

⁸ O carvão e o ferro eram matérias primas fundamentais para o desenvolvimento econômico dos Estados europeus em um contexto pós-primeira revolução industrial (que, geralmente, é datada de 1760 a 1850).

aumentou ainda mais o ressentimento entre os dois governos, despertando uma forte onda nacionalista⁹ que se espalharia sorrateiramente por toda a Europa (FIGUEIRA, 2005).

Além disso, a consolidação do capital industrial, responsável pelo surpreendente crescimento econômico da Europa no final do século XIX e no início do XX, também guardava suas mazelas. A lógica capitalista vigente, caracterizada pela abertura das indústrias para o mercado mundial, apropriava-se de políticas imperialistas, onde os países europeus subordinavam países de outros continentes (principalmente da África e da Ásia) à condição de colônias e as explorava (HOBSBAWN, 1988). Segundo Hobsbawn (1988), "entre 1876 e 1915, cerca de um quarto da superfície continental do globo foi distribuído ou redistribuído, como colônia, entre meia dúzia de Estados" (p. 91). E essas divisões não eram igualitárias entre as potências europeias, o que alavancou uma série de disputas.

Desse modo, o nacionalismo extremado que se avolumava às disputas imperialistas deu origem a dois blocos de nações: a Tríplice Aliança (que reunia a Itália, a Austro-Hungria e a Alemanha; nações mais novas e, portanto, menos beneficiadas com a distribuição das terras de outros continentes) e a Tríplice Entente (que, a princípio, reunia a Inglaterra, a Rússia e a França, nações mais antigas). Criava-se, então, o ambiente perfeito para a eclosão da Primeira Guerra Mundial, que só veio a ser deflagrada em 1914. O estopim: o assassinato do herdeiro do trono austríaco por um estudante sérvio, na capital da Bósnia (FIGUEIRA, 2005). Assim que a Áustria declarou guerra contra a Sérvia, os blocos se posicionaram segundo suas alianças político-econômicas e receberam a adesão de diversos outros Estados.

A guerra só terminou em 1918, quando a condição militar da Alemanha se tornara insustentável. E o prejuízo humanitário foi estrondoso. Segundo Figueira (2005), "a Primeira Guerra Mundial deixou um saldo de 9 milhões de mortos na Europa". O governo alemão, com o fim dos combates, além de se ver obrigado a devolver a região da Alsácia-Lorena para a França, sofreu mais intervenções no seu território (com o chamado corredor polonês) e ainda foi punido com rigorosas indenizações (HOBSBAWM, 1995). No entanto, essas medidas que tinham o objetivo de evitar retaliações só se tornaram "fonte de ódios e ressentimentos entre o povo alemão. Criava-se assim, nesse país, um clima propício ao despertar de sentimentos extremistas, alimentados pelo ultranacionalismo germânico e pelo espírito de revanche" (FIGUEIRA, 2005, p. 290).

⁹ Na França, a onda nacionalista que surgiu no início do século XX, motivada pelo ônus da guerra franco-prussiana, ficou conhecida como *revanchismo*, fazendo alusão ao sentimento de vingança e ao desejo por uma revanche (FIGUEIRA, 2005).

Durante a Primeira Guerra, uma ocorrência de grande relevância e que também vale ser citada é o início da Revolução Russa. A Rússia, além de lidar com os conflitos internacionais, também teve que administrar uma série de revoluções internas a partir de 1917. E foi na sucessão dessas revoluções que se criou a União das Repúblicas Socialistas Soviéticas (URSS) em 1922¹⁰ (HOBSBAWM, 1995).

A Primeira Guerra deixou boa parte do território europeu em ruínas, e os países, em geral, acumulavam dívidas altíssimas. As economias europeias precisavam de apoio; e as nações pertencentes à Tríplice Entente receberam esse incentivo dos Estados Unidos da América (EUA), que, apesar de ter participado do conflito, não teve o seu território atingido. Isso permitiu que a economia norte-americana crescesse extraordinariamente, atingindo o seu clímax no ano de 1920 (quando as economias europeias já se restabeleciam e voltavam a competir no mercado internacional) (FIGUEIRA, 2005). Porém, a superprodução americana de bens de consumo teve uma consequência devastadora no ano de 1929: o *crack* da Bolsa de Valores de Nova York, que iniciou uma das maiores crises do capitalismo.

A crise, também conhecida como a Grande Depressão, perdurou por toda a década de 1930 (FIGUEIRA, 2005). E com a miséria estabelecida, a demanda social por uma maior intervenção do Estado na economia, atrelada ao nacionalismo febril que ultrapassou a Primeira Guerra, abriu margem para a ascensão de regimes totalitários em diversas nações europeias. O continente se encontrava novamente como um “campo minado”.

A Segunda Guerra Mundial eclodiu em 1939. Outra vez, dois blocos rivais se constituíram: os países do Eixo (liderados pela Itália, a Alemanha e o Japão) e os Aliados (comandados pela Inglaterra, a URSS, os EUA e a França), estendendo a guerra até o ano de 1945, quando houve o ataque nuclear americano às cidades japonesas de Hiroshima e Nagasaki. Mazower (2001, p. 214) afirma que “a intensidade do sofrimento e da destruição que se abateram sobre os civis ao longo de seis anos [da Segunda Guerra] transformou profundamente as sociedades europeias”.

De fato, essa guerra se encerrou com um saldo de, aproximadamente, 50 milhões de mortos e mudou consideravelmente o mapa político europeu (FIGUEIRA, 2005). A Alemanha, mais uma vez derrotada, teve seu território dividido em duas partes: a ocidental (sob domínio da Inglaterra, dos EUA e da França) e a oriental (sob a égide da URSS)¹¹. E o

¹⁰ A URSS só foi dissolvida no ano de 1991.

¹¹ A reunificação do território alemão só ocorreu no ano de 1990.

mundo, por sua vez, encontrava-se agora com duas grandes potências econômicas (e bélicas), os EUA e a URSS, que influenciaram a repartição dos demais Estados em dois blocos ideologicamente adversários: o capitalista e o socialista, respectivamente.

E foi com essa cisão que o século XX passou praticamente todo o restante dos seus anos, em um estado de tensão marcado pelo terror de uma nova guerra mundial. Esse período ficou conhecido como “guerra fria”, pois não sediou nenhum conflito de grande escala (das dimensões das duas grandes guerras), mas teve toda preparação político-econômica, midiática, técnico-científica e militar necessárias para tal. Nas palavras de Mazower (2001, p. 247): “a paz brutal da guerra fria proporcionou à Europa o bem mais precioso – tempo –, que permitiu uma extraordinária e inesperada regeneração de sua vida econômica e uma ampla transformação de seus hábitos políticos”.

1.2. O PROTAGONISMO DA CIÊNCIA NO SÉCULO XX

De acordo com HOBSEBAWM (1995, p. 504), “nenhum período da história foi mais penetrado pelas ciências naturais¹² nem mais dependente delas do que o século XX”. Nesse século, um grande número de teorias foi proposto, trazendo não só elaborações racionais completamente inéditas, como, também, procedimentos experimentais extremamente sofisticados. Outro marco da ciência desse tempo é a velocidade com a qual se convertia em novas tecnologias. “Por mais esotéricas e incompreensíveis que fossem as inovações da ciência, assim que eram feitas, se traduziam quase imediatamente em tecnologias práticas [que não exigiam qualquer compreensão dos usuários finais]” (HOBSEBAWN, 1995, p. 508). E esse alvoroço técnico-científico também contou com um expressivo aumento de pessoal especializado.

Em 1910, todos os físicos e químicos alemães e britânicos juntos chegavam talvez a 8 mil pessoas. Em fins da década de 1980, o número de cientistas e engenheiros de fato empenhados em pesquisa e desenvolvimento experimental no mundo era estimado em cerca de 5 milhões, dos quais quase 1 milhão se achava nos EUA, principal potência científica, e um número ligeiramente maior nos Estados da Europa (HOBSEBAWN, 1995, p. 504).

¹² As ciências naturais, como o nome já dá a entender, são aquelas que se debruçam na compreensão da natureza, como a astronomia, a física, a química, a geologia, a biologia etc.

No entanto, fazendo jus às inúmeras polarizações que caracterizaram o século XX, a euforia promovida pelo progresso científico também esteve acompanhada de um grande medo ou desconfiança (HOBSBAWN, 1988). As teorias propostas não eram apenas “metodologicamente ousadas”. Elas também impactaram bruscamente na forma de apreender a realidade. Um bom exemplo é a teoria da relatividade geral, proposta pelo físico alemão Albert Einstein (1879-1955) em 1915.

Ela não contou, simplesmente, com uma rebuscada matemática e com uma validação experimental audaciosa (que demandou a observação de eclipses solares¹³ transcontinentais). A teoria da relatividade de Einstein abalou o paradigma da física newtoniana vigente desde o século XVIII, mudando radicalmente a compreensão de conceitos fundamentais, como o de espaço, tempo e massa. Não por outra razão, a relatividade degenerou-se, no discurso corrente, em um pronunciado relativismo¹⁴ – que, diante das inseguranças do século, foi amplamente acolhido. Esse foi o mesmo impacto promovido pela teoria quântica, inaugurada por Max Planck (1858-1947) por volta de 1900.

Em 1924, Louis de Broglie (1892-1987) atribuiu propriedades ondulatórias às partículas da matéria. A compreensão dessa dualidade da matéria (como partícula-onda) ficou ainda mais consistente em 1926, com a publicação da equação de Erwin Schrödinger (1887-1961). E brindando essa mudança no paradigma sobre a natureza da matéria, Werner Heisenberg (1901-1976) formulou, em 1927, o seu famoso Princípio da Incerteza, que comprova que a precisão na medida da posição de uma partícula subatômica é inversamente proporcional à precisão na medida de seu momento linear¹⁵. Assim, apesar de alargar a fronteira da ciência, a teoria quântica adicionou o “jogo das probabilidades” na descrição físico-matemática da natureza, que até então era reconhecida pela sua exatidão e pelo seu poder de previsibilidade.

¹³ O experimento que validou a teoria da relatividade geral foi conduzido pelo astrofísico britânico Arthur Stanley Eddington (1882-1944) em 29 de maio de 1919.

¹⁴ Bachelard criticou os filósofos que se aproveitavam dos exemplos científicos (dos objetos, dos métodos e das conclusões da ciência) para, tão somente, justificarem suas elaborações feitas *a priori*. De acordo com Bachelard (1978), quando os exemplos científicos são comentados longe dos seus princípios – isto é, em um contexto com princípios não-científicos –, esses comentários “suscitam metáforas, analogias, generalizações” (p. 4). E, para o autor, “é assim que, no discurso filosófico, a Relatividade degenera muitas vezes em relativismo, a hipótese degenera em suposição, o axioma em verdade primeira” (p. 4).

¹⁵ O momento linear (p) é o produto da massa de um corpo (m) com a sua velocidade (v). Ou seja: $p=m.v$.

Dessa forma, com o avanço da teoria da relatividade e da teoria quântica, o século que iniciou com o conhecimento de apenas uma partícula elementar da matéria – o elétron¹⁶ –, terminou com dezenas de partículas (e anti-partículas) conhecidas.

A partir da década da 1950, com o advento dos grandes aceleradores, formou-se um verdadeiro zoológico de novas partículas. Cada uma ganhou uma letra grega. Eram tantas que, nas palavras de um físico, temeu-se que o alfabeto grego não fosse suficiente. Em 1955, o físico norte-americano Willis Lamb Jr. descreveu o espanto de seus colegas: “[...] O descobridor de uma nova partícula elementar costumava ser agraciado com o prêmio Nobel, mas agora deveria ser punido com uma multa de \$10 mil [dólares]”. [...] Em meados da década de 1970, os físicos já tinham uma listagem completa das partículas elementares da natureza, mesmo que muitas ainda estivessem por ser detectadas [...]. Esse esquema teórico ganhou o nome de “modelo padrão de partículas e interações (ou forças) fundamentais” (CENTRO BRASILEIRO DE PESQUISAS FÍSICAS, 2008, p. 40, 43).

O mundo submicroscópico demonstrava-se extremamente complexo. E, enquanto grande parte da comunidade científica se engrandecia frente a esses pequenos objetos de estudo, outra descoberta chacoalhou a Humanidade, fazendo-nos olhar para algo muito maior e que integra a todos nós: o universo. Em 1929, o físico Edwin Hubble (1889-1953) publicou evidências experimentais de que o universo não era estático (como se acreditava), mas que se encontrava numa grande expansão – popularizada como “Big-Bang”. E, com isso, muitos deixaram de conceber o universo como um *lócus* eterno, passando a interpretá-lo como um ente dotado de início.

Ou seja, a natureza que parecia ter sido esgotada pelo conhecimento científico até o século XIX revelava-se cada vez mais misteriosa e perspicaz no século XX, evocando sentimentos muitas vezes incompatíveis – como já foi dito. E a mesma ambivalência pôde ser percebida em resposta aos avanços tecnológicos.

As tecnologias produzidas em rápida escala, apesar de facilitarem a vida cotidiana, também despertavam fortes suspeitas quanto aos seus reais benefícios. Afinal, muitas delas se baseavam em fenômenos que, além de serem completamente incompreendidos pela população comum, estavam sendo amplamente explorados em prol dos objetivos políticos e econômicos das guerras (HOBSBAWN, 1995). É o que se observa no estudo das radiações (e, aqui, tomando a perspectiva do senso comum, generalizam-se as radiações eletromagnéticas e as radiações nucleares). O século das máquinas portáteis de raio-X (que trouxeram grandes contribuições nos tratamentos médicos) é o mesmo das bombas nucleares.

¹⁶ O elétron, partícula subatômica de carga elétrica negativa, foi descoberto por Joseph John Thomson (1856-1940) em 1897.

Portanto, não é de se surpreender que, no século XX, defronte a esse impressionante desenvolvimento técnico-científico, questões de cunho epistemológico¹⁷ tenham sido revisitadas e novas perguntas tenham sido elaboradas. “O que é ciência afinal?” “Como se dá o progresso científico?” “Até onde a ciência pode nos levar? Quais as suas limitações?” Em resposta, muitos sistemas teóricos foram elaborados, trazendo diferentes perspectivas de análise. E uma das respostas possíveis é a de Gaston Bachelard¹⁸.

1.3. GASTON BACHELARD: UMA PEQUENA BIOGRAFIA

Gaston Bachelard nasceu em 1884, na comuna francesa de Bar-sur-Aube. Ingressou no mercado formal de trabalho assim que concluiu sua formação acadêmica básica em 1903, indo trabalhar nos correios da cidade de Remiremont (também na França). Em 1906, no entanto, decidiu mudar-se para Paris, a fim de cursar uma licenciatura em matemática e, posteriormente, formar-se engenheiro. Sua licenciatura foi concluída em 1912, porém, seus planos na engenharia foram interrompidos em 1914, com a deflagração da Primeira Guerra Mundial, para a qual foi convocado.

Em 1918, com o término da guerra, Bachelard retornou à sua cidade natal, onde começou sua carreira no magistério ensinando física e química na Educação Básica. E foi sob a incumbência de ensinar ciências que Bachelard se deparou com a revolução científica e

¹⁷ A área da filosofia que se debruça sobre as questões do conhecimento é chamada de *teoria do conhecimento* ou *gnosilogia* (do grego “gnosis”, que quer dizer “conhecimento”, e “logos”, que quer dizer “discurso”, “estudo”, dentre outras traduções) (COTRIM, FERNANDES, 2013). Dela, destacam-se: a *doxologia* (do grego, “doxa”, “opinião”), que estuda o conhecimento comum (o senso-comum), e a *epistemologia* (do grego “episteme”, “conhecimento apurado”), que estuda o conhecimento obtido com rigor, de forma crítica, tal como pretende ser o conhecimento científico. Com o passar do tempo, a epistemologia passou a ser conhecida como a “filosofia da ciência”. Trata-se do “estudo dos postulados, conclusões e métodos dos diferentes ramos do saber científico, ou das teorias e práticas em geral, avaliadas em sua validade cognitiva, ou descritas em suas trajetórias evolutivas, seus paradigmas estruturais ou suas relações com a sociedade e a história” (HOUAISS; VILLAR; FRANCO, 2001, p. 1180). Algumas questões epistemológicas atravessam a história da Humanidade, sendo debatidas desde a Antiguidade. Cotrim e Fernandes (2013) elencam quatro: (1) Quem é o determinante no processo do conhecimento: o sujeito conhecedor ou o objeto conhecido? (2) Qual é a fonte primeira do conhecimento: a razão ou a experiência? (3) Como se dá o processo do conhecimento? (4) E o que é possível conhecer de forma verdadeira? Dando respostas a essas questões, correntes filosóficas importantes foram fundadas. Em resposta à questão (1), divergiram os idealistas e os realistas. Em resposta à (2), os racionalistas, os empiristas e os aprioristas. Pode-se dizer que, para a questão (3), cada filósofo deu uma resposta singular. E, por fim, em resposta à questão (4), dividiram-se os dogmáticos e os céticos. No presente trabalho, doutrinas de algumas dessas correntes filosóficas foram abordadas.

¹⁸ Além da elaborada por Gaston Bachelard (1884-1962), epistemologias do século XX que também receberam grande destaque foram a de Karl Popper (1902-1994), Thomas Kuhn (1922-1996), Imre Lakatos (1922-1974) e Paul Feyerabend (1924-1994). Suas produções podem ser conhecidas de maneira geral e consistente em Chalmers (1993).

tecnológica que estava ocorrendo no século XX. Segundo Lima e Marinelli (2011, p. 395), “a teoria da relatividade deitou por terra as suas ideias no campo da física¹⁹, o que o levou a estudar filosofia, obtendo uma segunda licenciatura em letras em 1920”.

O interesse pelas questões filosóficas e intrínsecas do conhecimento científico levou-o, então, ao doutorado. Em 1927, aos 43 anos de idade, titulou-se doutor na Universidade Sorbonne (Paris) com a apresentação de duas teses: *Essai sur la Connaissance Approché* (Ensaio sobre o Conhecimento Aproximado) e *Étude sur l'Évolution d'un Problème de Physique: la Propagation Thermique dans les Solides* (Estudo sobre a Evolução de um Problema de Física: a Propagação Térmica nos Sólidos), ambas publicadas na forma de livros em 1928 (PESSANHA, 1978).

Com a popularização de suas ideias, em 1930, Bachelard foi convidado para ingressar no magistério superior. Desde então, lecionou na Faculdade de Letras da Universidade de Dijon (onde permaneceu por dez anos, de 1930 a 1940) e ensinou História e Filosofia das Ciências na Sorbonne (até 1954). Nesse período, que abarca a Grande Depressão e a Segunda Guerra Mundial, Bachelard publicou obras importantes de sua coletânea (BACHELARD, 2006). Para os fins dessa dissertação, destacam-se:

- *La Valeur Inductive de la Relativité* (O Valor Indutivo da Relatividade) (1929)
- *Le Pluralisme cohérent de la chimie moderne* (O pluralismo coerente da química moderna) (1932)
- *Le Nouvel Esprit Scientifique* (O Novo Espírito Científico) (1934);
- *La Formation de l'Esprit Scientifique* (A Formação do Espírito Científico) (1938)
- *La Philosophie du Non* (A Filosofia do Não) (1940)
- *Le Rationalisme Appliqué* (O Racionalismo Aplicado) (1949)
- *Le Matérialisme Rationnel* (O Materialismo Racional) (1953)

Num reconhecimento do volume e da profundidade de suas obras, Bachelard recebeu, em 1951, a condecoração francesa da Legião de Honra, entregue a personalidades com inquestionável destaque em suas áreas de atuação. Em 1955, foi convidado para integrar a

¹⁹ Bachelard (1996), ao rotular diferentes etapas da história do pensamento científico, distinguiu três grandes períodos, dando lugar de destaque à produção de Albert Einstein. “O primeiro período, que representa o *estado pré-científico*, compreenderia tanto a Antiguidade clássica quanto os séculos de renascimento e de novas buscas, como os séculos XVI, XVII e até XVIII. O segundo período, que representa o *estado científico*, em preparação no fim do século XVIII, se estenderia por todo o século XIX e início do século XX. Em terceiro lugar, consideraríamos o ano de 1905 como o início do *novo espírito científico*, momento em que a Relatividade de Einstein deforma conceitos primordiais que eram tidos como fixados para sempre” (p. 9).

Academia das Ciências Morais e Políticas da França. E, em 1961, foi laureado com o Grande Prêmio Nacional de Letras, quando definitivamente se consagrou como um grande pensador do século XX (PESSANHA, 1978; LIMA, MARINELLI, 2011).

Gaston Bachelard faleceu em 1962, na cidade de Paris, em um contexto mundial de Guerra Fria. Sua produção trouxe contribuições valiosas a diversas áreas do conhecimento. Não obstante, tendo vivido a maior parte de sua vida na “era dos extremos” – como Hobsbawm (1995) chama o século XX –, o próprio autor reconheceu que não foi fácil harmonizar, em sua consciência, seus múltiplos interesses. Em *La Poétique de la Rêverie* (A poética do Devaneio) (1961), escreveu:

Assim, pois, imagens e conceitos se formam nesses dois polos opostos da atividade física que são a imaginação e a razão. Há entre ambas uma polaridade de exclusão. Nada de comum com os polos do magnetismo. Aqui os polos opostos não se atraem — repelem-se. E [é] necessário amar os poderes psíquicos com dois amores diferentes quando se ama os conceitos e as imagens [...]. Compreendi isso tarde demais. *Tarde demais conheci a tranquilidade de consciência no trabalho alternado das imagens e dos conceitos, duas tranquilidades de consciência que seriam a do pleno dia e a que aceita o lado noturno da alma* (BACHELARD, 1988, p. 52, grifo nosso).

Por essa razão, os estudiosos de Bachelard costumam dividir sua coletânea em duas: a “diurna”, que raciocina sobre o conhecimento científico e se propõe a contribuir com outra perspectiva epistemológica, e a “noturna”, que mergulha nas particularidades do processo criativo para compreender a imaginação poética, os símbolos e os sonhos (LIMA, MARINELLI, 2011). A partir desse momento, serão sintetizadas algumas das ideias diurnas de Bachelard.

1.4. A FUNDAMENTAÇÃO DE UMA EPISTEMOLOGIA DO PORMENOR

Analisando as epistemologias de sua época, Bachelard concluiu que, por mais diversas que fossem, elas poderiam ser repartidas em dois polos: as dos cientistas e as dos filósofos (Figura 1). E, de acordo com Bachelard, ambos os polos apresentavam problemas.

Para Bachelard, os cientistas consideravam a filosofia da ciência como um trabalho *a posteriori*. Ou seja, somente depois de terem coletado os dados experimentais (isto é, somente depois do “trabalho efetivo”, na perspectiva do cientista), apropriavam-se do saber filosófico

para dar algum sentido às respostas da experiência. Assim, tendo em vista o caráter dinâmico da ciência, a cada conjunto de fatos detectados, uma epistemologia específica e conveniente se desenvolvia, “sempre mais ou menos eclética, sempre aberta, sempre precária” (BACHELARD, 1978a, p. 3). As epistemologias dos cientistas assemelhavam-se, portanto, a suntuosos “relatórios de trabalho”.

Por outro lado, os filósofos construía sistemas teóricos *a priori*. Dessa maneira, primeiro elaboravam suas teses a partir de suas faculdades racionais e, somente depois, apropriavam-se dos exemplos da ciência para validarem suas premissas e conclusões. E, desse modo, os exemplos científicos eram “sempre evocados e nunca desenvolvidos”; e, uma vez comentados num campo que não era o de origem, suscitavam artifícios linguísticos que os tornassem mais palatáveis, como “metáforas, analogias [e] generalizações” (BACHELARD, 1978a, p. 4). Bachelard ousou afirmar que, “para o filósofo, a filosofia da ciência nunca está totalmente no reino dos fatos” (BACHELARD, 1978a, p. 4).

Os cientistas, então, se colocavam em um extremo empirista; e os filósofos, por sua vez, em um extremo racionalista. Onde o empirismo é a doutrina filosófica que delega à experiência, o título de fonte primeira do conhecimento; e o racionalismo é a doutrina que confere esse título à razão (COTRIM, FERNANDES, 2013; JAPIASSÚ, MARCONDES, 2001).

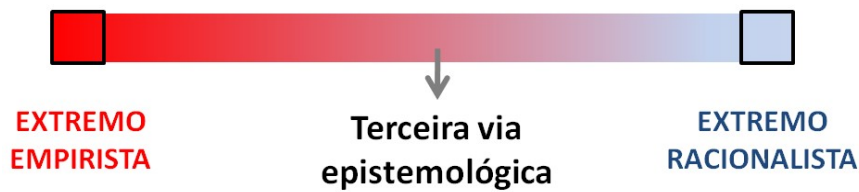
Figura 1 – Os cientistas e os filósofos: Dois polos epistemológicos distintos



Fonte: O autor, 2024

Então, foi a partir da percepção desses dois polos – o empirismo dos cientistas e o racionalismo dos filósofos – que Bachelard, numa postura um tanto pacifista, propôs uma terceira via epistemológica. Vide a Figura 2:

Figura 2 – Entre os extremos, uma terceira via epistemológica



Fonte: O autor, 2024

Segundo o epistemólogo francês,

[...] o empirismo precisa de ser compreendido; o racionalismo precisa de ser aplicado. Um empirismo sem leis claras, sem leis coordenadas, sem leis dedutivas não pode ser pensado nem ensinado; um racionalismo sem provas palpáveis, sem aplicação à realidade imediata não pode convencer plenamente. O valor de uma lei empírica prova-se fazendo dela a base de um raciocínio. Legítima-se um raciocínio fazendo dele a base de uma experiência. A ciência, soma de provas e de experiências, soma de regras e de leis, soma de evidências e de fatos, tem pois necessidade de uma filosofia com dois polos. Mais exatamente, ela tem necessidade de um desenvolvimento dialético, porque cada noção se esclarece de uma forma complementar segundo dois pontos de vista filosóficos diferentes (BACHELARD, 1978a, p. 4-5).

Ou seja, esses dois polos possuem valores a serem considerados. Logo, para Bachelard, esses polos não devem ser compreendidos como oponentes irreconciliáveis, e sim como o “complemento efetivo” um do outro (BACHELARD, 1978a, p. 5). Na perspectiva bachelardiana, a epistemologia (e, por conseguinte, o próprio saber científico) só se constitui efetivamente numa relação dialética, numa síntese gerada a partir da confluência de uma tese com sua antítese (que, apesar de opostas, não são contraditórias).

Segundo Bachelard (1978a),

[...] pensar cientificamente é *colocar-se no campo epistemológico intermediário entre* teoria e prática, *entre* matemática e experiência. Conhecer cientificamente uma lei natural é conhecê-la simultaneamente como fenômeno e como número (p. 5, grifo nosso).

Essa seria a essência da atividade científica. “A ciência é uma construção, que se alcança através da *cooperação* do racional e do técnico²⁰” (BULCÃO, 2009, p. 34, grifo

²⁰ Bachelard coloca a cooperação entre a razão e a experiência no cerne do conhecimento. Para ele, “a partir do momento em que se conhecem duas propriedades de um objeto, tenta-se constantemente relacioná-las. Um conhecimento mais profundo é sempre acompanhado de uma abundância de razões coordenadas. Por muito perto do realismo que se permaneça, a menor ordenação introduz fatores racionais; quando se avança no pensamento científico, aumenta o papel das teorias” (BACHELARD, 1978, p. 12).

nosso). A partir disso, Bachelard pediu licença tanto para os cientistas, como para os filósofos. Aos cientistas, reclamou o direito de desviar a ciência de seu foco positivista²¹. E aos filósofos, reclamou o direito de se servir dos elementos filosóficos (os conceitos) longe dos seus sistemas de origem – um procedimento assumidamente delicado e arriscado (BACHELARD, 1978a).

Assim, de posse dessas licenças, Bachelard amparou uma epistemologia que não tem a pretensão de normalizar a ciência na sua totalidade (como fazem as ditas *epistemologias generalistas*), mas que se preocupa com cada ciência em particular (a física, a química, a biologia etc.) e, principalmente, com as suas noções e com os seus conceitos. Pois é sabido que a ciência tem, no seu âmago, a complexidade. Logo, existem diversas formas de se estudar a natureza mantendo um espírito racional, sistemático e comprometido com a verificabilidade de suas conclusões (BACHELARD, 1978a). Isto é, existem diversas formas de se fazer ciência!

A epistemologia centrada nas ciências particulares é chamada de *regionalista*²²; e a que se debruça sobre as noções e os conceitos científicos é chamada de *epistemologia do pormenor* (POMBO, 2022). Acerca dessa última, diz Bachelard (1978a):

Cada hipótese, cada problema, cada experiência, cada equação reclamariam sua filosofia. Dever-se-ia criar uma filosofia do pormenor epistemológico, uma filosofia científica diferencial que contrabalançaria a filosofia integral dos filósofos. Esta filosofia diferencial estaria encarregada de analisar o devir de um pensamento. Em linhas gerais, o devir de um pensamento científico corresponderia [...] à transformação da forma realista em forma racionalista. Esta transformação nunca é total. Nem todas as noções estão no mesmo estágio das suas transformações metafísicas (p. 9).

Isto é, cada noção ou conceito científico deveria ser analisado na sua singularidade, uma vez que cada um desses “pensamentos” estaria em um estágio diferente de desenvolvimento ou, nas palavras do próprio Bachelard (1978a), em um estágio diferente de “maturidade filosófica”.

²¹ Segundo Bulcão (2009), a tradição positivista, desenvolvida por Auguste Comte (1798-1857) e muito forte na França do período de Bachelard, “negava a validade dos juízos metafísicos, defendendo que o único conhecimento verdadeiro era o científico, cujas proposições eram verificáveis e objetivas. [...] A afirmação de que as verdades científicas eram descrições objetivas de leis invariáveis levava à aceitação de que o progresso da ciência se fazia por acúmulo de conhecimento, havendo, portanto, uma evolução contínua do saber” (p. 19). Bachelard (1978) pediu licença aos cientistas para desviar a ciência “da sua vontade de objetividade, para descobrir o que permanece subjetivo nos métodos mais severos” (p. 8) e para propor uma epistemologia que nega a visão contínua do saber científico e denuncia, na natureza desse saber, as suas rupturas, a sua descontinuidade.

²² Na obra *A Epistemologia* (2006), duas epistemologias regionalistas foram publicadas: uma da física e uma da química – as duas ciências ministradas por Bachelard durante sua atuação na educação básica.

1.4.1. A maturação filosófica dos conceitos científicos

Em sua investigação epistemológica dos conceitos científicos, Bachelard se apropriou de, basicamente, três ferramentas:

- o entendimento dos conceitos nos seus locais de origem – ou seja, o que os conceitos significam dentro do discurso científico vigente;
- a história da construção dos conceitos – o que permite compilar toda a gama de significados que os conceitos já possuíram no discurso científico e, por consequência, o número de obstáculos epistemológicos²³ que superaram até alcançarem as suas elaborações mais recentes –; e
- as categorias de análise da filosofia da ciência (como Bachelard disse que faria na licença solicitada aos filósofos).

O uso dessas ferramentas fica claro, por exemplo, quando Bachelard discorre sobre os símbolos das ligações químicas em *A Epistemologia* (2006).

Ao tratar do simbolismo químico, Bachelard iniciou com uma distinção entre a eletrovalência (presente nos compostos iônicos) e a covalência (presente nos compostos covalentes). Essas definições iniciais não demonstram, simplesmente, a atualização de Bachelard acerca dos conceitos a serem tratados; elas também estabelecem um “marco linguístico” de análise.

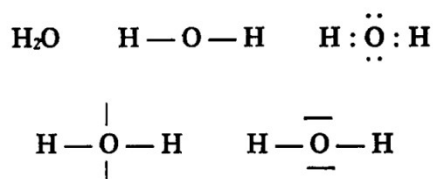
Pois, sabendo que as palavras podem possuir uma multiplicidade de sentidos, a escolha de um sentido é, antes de qualquer coisa, a escolha de um referencial. E é somente a partir da definição clara de um objeto que posso me perguntar sobre como esse objeto se construiu. Desse modo, ao definir “covalência”, o epistemólogo elencou um significado dentre os vários que o termo poderia oferecer em sua possível polissemia; e, a partir desse significado, garantiu um ponto de partida para a sua pesquisa histórica²⁴.

²³ Bachelard, em *A Filosofia do Não* (1940) – obra na qual desenvolveu a noção de perfil epistemológico –, diz ser plenamente possível “relacionar as duas noções, de obstáculo epistemológico e de perfil epistemológico; porque um perfil epistemológico guarda a marca dos obstáculos que uma cultura teve que superar” (1978a, p. 30). No entanto, os obstáculos epistemológicos foram definidos na obra *A formação do espírito científico*, como ideias mal interpretadas em uma época e que, por esse motivo, se tornaram obstáculos ao pensamento, “um contrapensamento” (1996, p. 22). Vide a nota 24.

²⁴ Bachelard (1996) diz que “numa mesma época, sob uma mesma palavra, coexistem conceitos tão diferentes! O que engana é que a mesma palavra tanto designa como explica. A designação é a mesma; a explicação é diferente. [...] O epistemólogo deve, pois, captar os conceitos científicos em sínteses psicológicas efetivas, isto é,

Assim, prosseguindo com uma ênfase na representação dos compostos covalentes, Bachelard elaborou uma sequência histórica com diversas propostas feitas, até sua época, para a molécula de água (Figura 3) (BACHELARD, 2006). E, a cada ponto de inflexão nas definições dos termos e dos caracteres da simbologia química, Bachelard teceu suas considerações do ponto de vista filosófico.

Figura 3 – Diversas representações para a molécula de água ao longo da história do simbolismo químico



Fonte: BACHELARD, 2006, p. 96

Sobre o tema do simbolismo químico, ele chegou a afirmar que

o novo simbolismo contém mais pensamento do que o antigo, contém não somente uma verdadeira história de progressos, mas traz ainda sugestões à pesquisa experimental. O simbolismo rectificado, enriquecido, tem assim uma certa espessura filosófica, uma profundidade epistemológica (BACHELARD, 2006, p. 97).

Como pôde ser observado, a história do desenvolvimento dos conceitos científicos é um dos pilares da epistemologia de Bachelard. Por essa razão, diz-se que sua perspectiva epistemológica consiste em uma “*epistemologia histórica*” – termo que o próprio Bachelard usou em *A Epistemologia* (2006, p. 124). Porém, vale pontuar que, em suas pesquisas historiográficas sobre as noções e os conceitos científicos, Bachelard se aproximou muito mais de uma abordagem internalista (ou horizontal) do que de uma abordagem externalista (ou vertical).

As designações internalista e externalista são atribuídas a Pombo (2022), que é enfática ao dizer que:

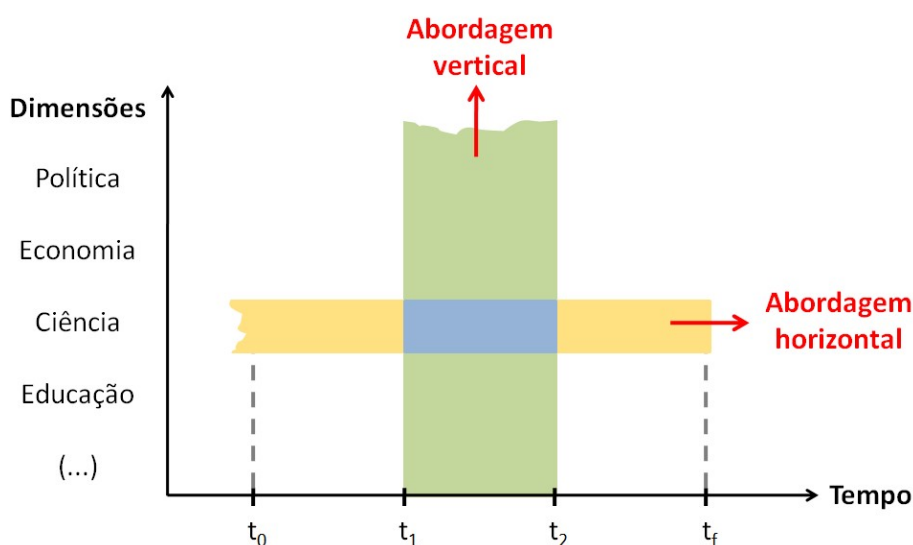
Para os internalistas, a ciência constitui uma forma autônoma do conhecimento. [...] A ciência deve ser pensada [...] em função do desenvolvimento dos seus próprios objetos, leis, métodos e processos. [...] *Bachelard tem claramente uma posição internalista*. Numa perspectiva externalista, a ciência é uma atividade humana que,

em sínteses psicológicas progressivas, estabelecendo, a respeito de cada noção, uma escala de conceitos, mostrando como um conceito deu origem a outro, como está relacionado a outro” (p. 22-23).

para ser compreendida, necessita de ser inserida no conjunto mais amplo de todas as atividades humanas. Ao estudar a ciência de uma determinada época, há que estudar a estrutura social, a relação das classes, o modo de produção, a personalidade dos cientistas, os sistemas artísticos e culturais dessa época (POMBO, 2022, p. única, grifo nosso).

Já as designações horizontal e vertical são atribuídas a Kragh (1987, p. 80-82). Observe a Figura 4:

Figura 4 – Os dois tipos de abordagem da história da ciência



Fonte: KRAGH, 1987, p. 81 (adaptado)

Na abordagem horizontal, o tema de pesquisa é investigado de um tempo inicial (t_0) até um tempo final (t_f) (que pode ser o tempo presente, a atualidade) tendo como foco uma única dimensão do próprio. Geralmente, essa dimensão circunscreve os elementos intrínsecos do tema escolhido. Por exemplo: A abordagem horizontal da história da geometria se reserva a analisar apenas as modificações no entendimento dos elementos geométricos (as noções de ponto, de reta, de plano etc.), sem a precisão de buscar o que provocou e o que influenciou tais mudanças (KRAGH, 1987).

A abordagem vertical, em contrapartida, extrapola os elementos que são próprios do tema investigado e procura compreendê-los dentro de um contexto, muitas vezes tocando dimensões políticas, econômicas, socioculturais, educacionais etc. Essa abordagem é, essencialmente, interdisciplinar. De volta ao exemplo: A abordagem vertical da história da

geometria levaria o pesquisador, necessariamente, ao estudo concomitante da história das civilizações, das tecnologias, das artes e das religiões (KRAGH, 1987).

Por isso, é comum que, nas pesquisas historiográficas, o período histórico investigado de acordo com uma abordagem horizontal (de t_0 a t_f) seja maior do que o período elencado para uma abordagem vertical (de t_1 a t_2 , na Figura 4). Ocorre uma compensação entre o tamanho do período histórico e o número de dimensões examinadas sobre o tema. Além de que, na comparação entre as abordagens, a horizontal torna-se mais suscetível a anacronismos e à criação de hipóteses para a conexão dos fatos (KRAGH, 1987).

Essas desvantagens da abordagem historiográfica internalista ou horizontal são, portanto, “pontos fracos” da metodologia bachelardiana. E é por isso que, na apresentação de um novo perfil epistemológico (ideia que será revelada mais adiante), o perfil costuma ser dado com força de proposta. Isso porque, na continuidade e/ou no aprofundamento das pesquisas históricas, novos fatos podem ser trazidos à tona, modificando o perfil²⁵.

No entanto, foi a partir dessa metodologia, aplicada a diversos conceitos (como os conceitos de massa, energia, substância etc.), que Bachelard propôs um sentido comum para o progresso (ou a maturação) de todos os conceitos científicos (BACHELARD, 1978a). Pois é um fato que “o conhecimento tem uma história” (BACHELARD, 2006, p. 125). E, uma vez dotado de historicidade, o conhecimento científico carrega transformações. Logo, se a ciência progride, evolui, se transforma, vale questionar de onde seus conceitos partiram e, igualmente, para onde eles tendem a ir.

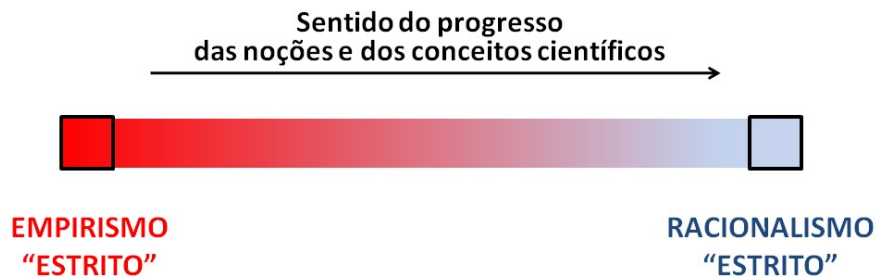
Esse sentido, construído segundo categorias epistemológicas, seria tão potente que pleitearia a capacidade de se voltar contra a própria filosofia e organizá-la, gerando uma espécie de dialética estrutural entre os conhecimentos científico e filosófico – ainda que, para um filósofo, a ideia de “progresso filosófico” fizesse pouco sentido. Diz Bachelard (1978a):

O sentido da evolução filosófica dos conceitos científicos é tão claro que se torna necessário concluir que o conhecimento científico ordena a própria filosofia. O pensamento científico fornece, pois, um princípio para a classificação das filosofias e para o estudo do progresso da razão (p. 12).

²⁵ No presente trabalho, buscou-se uma abordagem historiográfica moderada entre a internalista e a externalista, com a prevalência da primeira.

Essa maturação filosófica dos conceitos científicos partiria do empirismo e caminharia na direção do racionalismo²⁶ (BACHELARD, 1978a). Observe a Figura 5:

Figura 5 – O sentido da maturação filosófica dos conceitos científicos



Fonte: O autor, 2024

E, nesse percurso, à medida que o conceito se “esvaziaria” de uma compreensão realista, se “abasteceria” de uma compreensão idealista. O realismo é a concepção epistemológica de que o conhecimento, sendo determinado pelo objeto conhecido, é uma realidade desse objeto; e o idealismo, por outro lado, é a concepção de que o conhecimento, sendo determinado pelo sujeito conhecedor, é apenas um modelo, uma ideia elaborada sobre o objeto de investigação (COTRIM, FERNANDES, 2013). Na epistemologia de Bachelard, “o *imediato* deve, em todas as circunstâncias, ceder o passo ao *construído*” (BACHELARD, 2006, p. 125, grifo do autor).

De acordo com Bachelard (1978a):

Uma filosofia das ciências, mesmo se se limita ao exame de uma ciência particular, é necessariamente uma ciência dispersa. Tem, no entanto, uma coesão, a da sua dialética, a do seu progresso. Todo progresso de uma filosofia das ciências se faz no sentido de um *racionalismo crescente* [...] (p. 30, grifo nosso).

Cada noção ou conceito científico estaria, portanto, em um grau de maturação. E, nesses termos, alguns conceitos estariam mais impregnados de aspectos racionalistas do que outros. Além disso, é completamente viável que um conceito possa ficar estagnado em uma mesma concepção, sem nunca progredir, ainda que os estádios seguintes de maturidade sejam teoricamente previsíveis. Por esse motivo, Bachelard foi enérgico na recusa de uma

²⁶ Nas palavras de Bachelard (1978a), “o dever de um pensamento científico corresponderia [...] à transformação da forma realista em forma racionalista” (p. 9).

epistemologia generalista e na defesa de epistemologias do pormenor. Pois, segundo o epistemólogo:

É evidente que os conceitos científicos não atingiram todos o mesmo estágio de maturidade; muitos permanecem ainda implicados num realismo mais ou menos ingênuo; muitos são ainda definidos na orgulhosa modéstia do positivismo; o que faz com que, examinada nos seus elementos, a filosofia do espírito científico não possa ser uma filosofia homogênea. Se as discussões filosóficas acerca da ciência permanecem confusas, é porque se pretende dar uma resposta de conjunto, ao mesmo tempo que se está obnubilado por um comportamento particular (BACHELARD, 1978a, p. 11).

No entanto, ao defender um sentido comum para a maturação filosófica dos conceitos científicos – o sentido de um racionalismo²⁷ crescente –, parece que Bachelard pôs em xeque uma de suas premissas básicas: a interdependência entre a experiência e a razão. Acaso seria o “racionalismo estrito”, o racionalismo filosófico, o fim de todos os conceitos científicos? Definitivamente, não. “Bachelard não aceita a radicalização de qualquer posição filosófica, mesmo a racionalista” (BULCÃO, 2009, p. 115). E é nesse ponto que Bachelard considera indispensável para o conhecimento científico, um *racionalismo aplicado*.

1.4.2. O racionalismo aplicado

Ao concluir que os conceitos científicos se desenvolvem mediante um progresso da razão, Bachelard não concorda que o fim da atividade científica seja o racionalismo puro, independente da experiência. Isso seria, na perspectiva epistemológica de Bachelard, uma contradição em termos, pois, para ele, não há ciência sem experiência. Se a ciência, porventura, a abandonar, deixará de ser o que é. Até mesmo as formulações mais ousadas e abstratas do século XX precisaram de comprovações experimentais para se validarem como teorias científicas.

Em 1928, por exemplo, o físico Paul Dirac (1902-1984) publicou uma equação de onda relativística que previa a existência da anti-matéria – mais precisamente, da anti-partícula do elétron. Essa anti-partícula teria a mesma massa (em módulo) do elétron, mas teria carga elétrica oposta, o que fez com que fosse nomeada de pósitron. No momento de sua publicação, a equação de Dirac (Figura 6a) era apenas um produto da razão, uma matemática

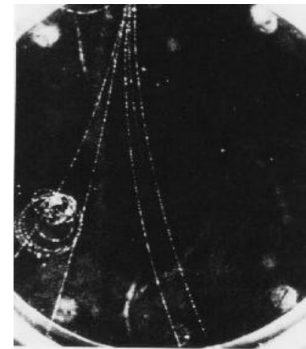
²⁷ Ou de um idealismo.

apurada; e, em 1932, ela permaneceria nessa categoria se os pósitrons não fossem descobertos por Carl David Anderson (1905-1991) (Figura 6b) (CARUSO, 1997).

Figura 6 – (a) A equação de Dirac e (b) a fotografia feita por Anderson, mostrando a formação de um “chuveiro” de 3 elétrons e 3 pósitrons a partir de raios cósmicos

$$\left\{ i\hbar \left(\frac{\partial}{c \cdot \partial t} + \alpha_1 \frac{\partial}{\partial x} + \alpha_2 \frac{\partial}{\partial y} + \alpha_3 \frac{\partial}{\partial z} \right) + \alpha_4 mc \right\} \Psi(\vec{x}, t) = 0$$

(a)



(b)

Fonte: CARUSO, 1997, p. 4,8

Este é o cerne do racionalismo aplicado: por mais intangível que um pensamento possa ser, ele, a fim de demonstrar sua cientificidade, não deve temer a aplicação. E “se um dos termos faltar, por melhor que se façam experiências, por melhor que se façam matemáticas, não se participará na atividade científica” (BACHELARD, 2006, p. 121). Ou seja:

Para este racionalismo prospector, muito diferente por isso do racionalismo tradicional, a aplicação não é uma mutilação [...], a aplicação não é uma derrota, um compromisso. Ele quer aplicar-se. Se se aplica mal, modifica-se. Não nega por isso os seus princípios, dialetiza-os (BACHELARD, 1978a, p. 5).

Essa aplicação, no entanto, significa muito mais do que uma atividade posterior, confirmatória, validadora da razão. Ela também é um fator a ser considerado na própria formulação dos conceitos. Inclusive, para Bulcão (2009), esse é um dos diferenciais dos conceitos denominados “científicos” – eles contêm em suas próprias estruturas teóricas, as coordenadas para os seus ensaios experimentais.

Antes mesmo de serem experimentados, os conceitos devem conter as condições de sua aplicação. [Desse modo] [...], a ideia não é um sumário ou um símbolo da experiência; ela é um programa que contém, em si, as determinações de sua aplicação. *Podemos concluir que cada noção deve ser provada em dois sentidos: o teórico e o técnico*, pois nela mesma estão as determinações teóricas que a explicam

e as terminações técnicas que a aplicam. *Se desprezamos um dos sentidos, a noção deixa de ser científica* (BULCÃO, 2009, p. 116, grifo nosso).

Com isso, se a maturação filosófica dos conceitos científicos estabelece um vetor da experiência à razão, o princípio do racionalismo aplicado aponta um vetor no sentido contrário – da razão à experiência –, criando uma espécie de “dupla seta” ($\Rightarrow$) que expressa o caráter dinâmico do saber científico.

E quanto a esse progresso do racionalismo na história da ciência (principalmente a partir do século XX), Bachelard afirma que um dos maiores impactos foi a proeminência da realização sobre a realidade. “A *realização* leva a melhor sobre a realidade” (BACHELARD, 1978a, p. 21, grifo do autor). Pois a ciência (em especial, a de hoje) não se limita mais à mera descrição dos objetos que podem ser facilmente acessados pelos sentidos – os chamados “objetos imediatos” –; ela constrói os seus próprios objetos, através da razão e segundo a experiência, concatenando o abstrato e o concreto²⁸ (BACHELARD, 2006; BULCÃO, 2009; LIMA, MARINELLI, 2011).

Os fenômenos recentemente estudados, por exemplo, não se apresentam ao sujeito conhecedor de forma “espontânea”, como se a natureza tivesse, em si, um ímpeto a revelar-se. Agora, os fenômenos são produzidos, provocados a partir do confinamento da natureza em rígidas condições de contorno, delimitadas pelos instrumentos (cada vez mais sofisticados, diga-se de passagem). E a orientação do novo espírito científico, marcado por um rebuscado racionalismo, é esta, de que “é preciso forçar a natureza a ir tão longe quanto o nosso espírito” (BACHELARD, 1978a, p. 21). Por isso, diz-se que uma fenomenologia imediata deu lugar à *fenomenotécnica*²⁹ (BARBOSA, 2003; BULCÃO, 2009), que “se distancia da natureza comum ao instituir uma ‘natureza artificial’” (ARAÚJO, 2017, p. 92).

Desse modo, Bachelard revela compreender a ciência não simplesmente como um saber em movimento, em evolução; mas, também, como um conhecimento dotado de rupturas, de mudanças paradigmáticas.

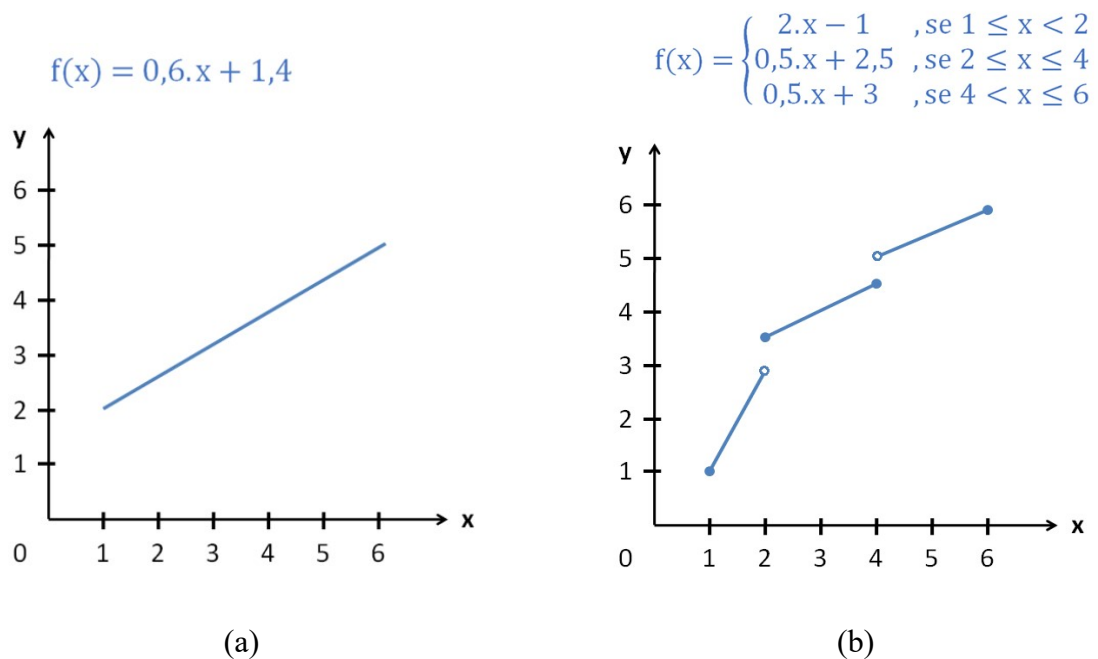
²⁸ Bulcão (2009) diz que “o objeto científico é um objeto abstrato-concreto, pois é constituído pela razão e pela técnica, ao longo do processo do conhecimento científico” (p. 90).

²⁹ De acordo com Barbosa (2003), “o conceito de fenomenotécnica, em Gaston Bachelard, é o mediador entre natureza e cultura. O fenômeno natural não mais se apresenta como aquele que pode ser observado pelos sentidos, mas esse fenômeno é produto de aparelhos, é produto de técnicas altamente elaboradas” (p. 35).

1.4.3. As rupturas epistemológicas

Na fundamentação de uma epistemologia do pormenor, Bachelard não se preocupou apenas em (1) caracterizar a ciência como um conhecimento dinâmico, que progride, e em (2) dar um sentido a esse progresso do saber, que seria o sentido de um racionalismo crescente. O epistemólogo francês também buscou compreender como é o “trajeto” do progresso científico. Talvez, nesse ponto, haja uma confusão entre o que se pretende chamar de “sentido” e de “trajeto”, como se fossem ideias sinônimas. Porém, a diferença entre os dois termos pode ser mais bem compreendida através de uma analogia matemática.

Figura 7 – Exemplos de funções matemáticas crescentes, mas diferentes quanto à continuidade: (a) Uma função contínua e (b) uma função descontínua



Fonte: O autor, 2024

Uma função matemática $y = f(x)$ pode ser constante, crescente ou decrescente. Se for constante, a cada variação de x , obter-se-á o mesmo valor de y . Se for crescente, o aumento de x provocará um aumento de y . E se for decrescente, o aumento de x provocará uma diminuição de y . Essas classificações orientam um “sentido” à linha que representa a função. No entanto, as funções também podem ser classificadas de acordo com outro critério, que

esclarece o “trajeto” de y a cada variação de x : a continuidade. Segundo esse critério, uma função matemática pode ser contínua ou descontínua. Será contínua se a linha que a representa puder ser escrita “sem tirar o lápis do papel”, e será descontínua se apresentar buracos, furos ou degraus. Compare as duas funções representadas na Figura 7, como exemplos. Elas possuem o mesmo “sentido” (ambas são crescentes), mas são diferentes quanto ao “trajeto” (uma é contínua e outra é descontínua).

Do mesmo modo, as epistemologias também podem ser classificadas de acordo com a continuidade. Para os *continuístas*, uma teoria nova apenas alarga os limites de uma teoria antiga, acrescentando a ela novos exemplos ou novas aplicações, mas sempre mantendo o mesmo núcleo, a mesma coerência interna. Para eles, o progresso do conhecimento científico ocorre lentamente, num “prolongamento” dos princípios tradicionalmente estabelecidos. Para os *descontinuístas*, uma teoria só é nova quando, em algum nível, rompe com a antiga, trazendo consigo novas premissas, novos compromissos; transformando a maneira de se pensar sobre determinado conceito ou problema (POMBO, 2022).

De acordo com Bachelard (2006), quando nos apropriamos de um relato histórico sobre um conceito científico qualquer, temos uma momentânea e falaciosa impressão de continuidade. Até mesmo o gênero textual usado na descrição dos acontecimentos – a narrativa – corrobora para essa impressão, ao registrar uma sucessão de eventos de maneira lenta, paulatina, como em um livro comum. Entretanto, basta analisarmos essa mesma história segundo categorias epistemológicas que as discontinuidades saltam aos olhos, revelando as muitas dialéticas e controvérsias.

Então, para Bachelard, na maturação filosófica dos conceitos científicos, existem rupturas. Para o autor, toda teoria que é, de fato, nova se estabelece sobre novos princípios epistemológicos; inaugurando uma nova perspectiva de análise dos conceitos. Não se tratam de mudanças somente quantitativas, mas, sobretudo, qualitativas. Foi o que ocorreu, por exemplo, com o advento da geometria não-euclidiana, da física relativística (não-newtoniana), da química não-substancialista (não-lavoisieriana), da lógica não-aristotélica e com a epistemologia não-cartesiana (ARAÚJO, 2017; BACHELARD, 1978a, 1978b).

Ou seja, o progresso da ciência ocorre, na visão de Bachelard, de forma descontínua, através de *rupturas epistemológicas*, onde o novo diz “não” ao antigo. Não, porém, um “não” que significa uma rígida oposição ou uma radical exclusão de ideias; mas um “não” que apresenta o diferente, uma face inédita e complementar do conceito (ARAÚJO, 2017).

Este é o cerne da obra intitulada *A Filosofia do Não*:

É necessário lembrar repetidas vezes que a filosofia do não não é psicologicamente um negativismo e que ela não conduz, face à natureza, a um niilismo. Pelo contrário, ela procede, em nós e fora de nós, de uma atividade construtiva. Ela afirma que o espírito é, no seu trabalho, um fator de evolução. Pensar corretamente o real é aproveitar as suas ambiguidades para modificar e alertar o pensamento. Dialectizar o pensamento é aumentar a garantia de criar cientificamente fenômenos completos, de regenerar todas as variáveis degeneradas ou suprimidas que a ciência, como o pensamento ingênuo, havia desprezado no seu primeiro estudo. [...] A filosofia do não não é uma vontade de negação. Não procede de um espírito de contradição que contradiz sem provas, que levanta sutilezas vagas (BACHELARD, 1978a, p. 10, 82).

Ao dizer “não” para uma teoria antiga, a teoria nova não a despreza. Antes, orientada sob uma nova óptica, seguindo novos princípios, a generaliza, a conclui, a completa. Nas palavras de Bachelard (1978a):

A negação deve permanecer em contato com a formação primeira. Deve permitir uma *generalização dialética*. A generalização pelo não deve concluir aquilo que nega. De fato, todo o desenvolvimento do pensamento científico de há um século para cá provém de tais generalizações dialéticas com envolvimento daquilo que se nega. Assim, a geometria não-euclidiana envolve a geometria euclidiana; a mecânica não-newtoniana envolve a mecânica newtoniana; a mecânica ondulatória envolve a mecânica relativista (p. 83, grifo do autor).

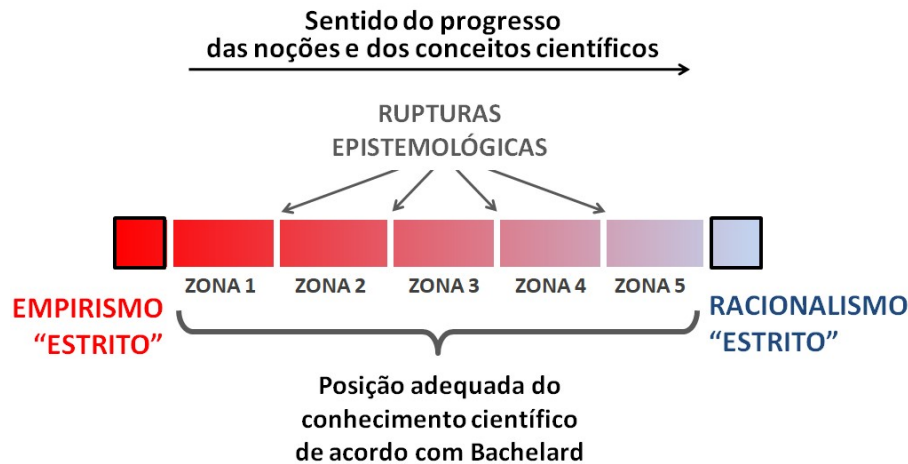
Logo, munido dessas ideias, o espectro que representa o desenvolvimento do conhecimento científico – e que vem sendo construído na sequência das Figuras 1, 2 e 5 – não poderá mais ser concebido como um *continuum*, e sim como um gráfico discreto, truncado, dividido em zonas. Onde cada zona compreende o conceito de acordo com compromissos filosóficos que lhe são próprias. Pois:

[...] uma só filosofia é [...] insuficiente para dar conta de um conhecimento preciso [...], cada filosofia fornece apenas uma banda do espectro nocional, e é necessário agrupar todas as filosofias para termos o espectro nocional completo de um conhecimento particular (BACHELARD, 1978a, p. 29).

Assim, constrói-se a Figura 8, que não se opõe completamente às outras, mas acrescenta uma nova camada de significados.

Um elemento gráfico semelhante também foi proposto por Bachelard em *A Filosofia do Não* (1940), tendo como um dos seus objetivos, a síntese dos pontos fundamentais de sua epistemologia do pormenor. Esse gráfico foi por ele mesmo chamado de *perfil epistemológico*.

Figura 8 – Uma perspectiva epistemológica intermediária, dinâmica e “polifilosófica”



Fonte: O autor, 2024

1.5. OS PERFIS EPISTEMOLÓGICOS

De forma resumida, um perfil epistemológico é um gráfico de barras que sistematiza o uso de diversas concepções de um determinado conceito científico. No eixo das abscissas (o eixo x), as diferentes perspectivas epistemológicas do conceito encontram-se ordenadas em zonas, da esquerda para a direita, segundo um racionalismo crescente. Bachelard, em suas pesquisas históricas, concluiu que todos os conceitos progridem de acordo com uma ordem comum de cinco zonas: realismo ingênuo → empirismo claro e positivista → racionalismo clássico → racionalismo completo → racionalismo discursivo³⁰ (BACHELARD, 1978a). Para ele, “esta ordem é genética. Esta ordem mostra a própria realidade da epistemologia” (BACHELARD, 1978a, p. 29).

E, no eixo das ordenadas (o eixo y), registra-se de forma “grosseira” – sem a necessidade de um exaustivo trabalho quantitativo –, a frequência com que cada indivíduo se apropria das diferentes concepções do conceito (BACHELARD, 1978a). Essa frequência, de acordo com o epistemólogo, estaria diretamente ligada à história do indivíduo, ao seu contexto social, ao seu nível educacional, à sua cultura. Em suas palavras:

³⁰ Bachelard (1978a) também chama o racionalismo completo de “racionalismo complexo”, e o racionalismo discursivo de “racionalismo dialético”. E agrupa essas duas formas do racionalismo em uma única designação: o “ultra-racionalismo” (p. 11).

Insistimos no fato de um perfil epistemológico dever sempre referir-se a um conceito designado, de ele apenas ser válido para um espírito particular que se examina num estágio particular da sua cultura (BACHELARD, 1978a, p. 25).

E é por essa razão que os perfis epistemológicos variam de uma pessoa para outra.

A altura de cada zona do perfil corresponde à extensão na qual essa “maneira de ver” está presente no pensamento individual, o que é definido pelo *background* cultural e pelas oportunidades que o indivíduo tem de usar cada divisão do perfil na sua vida. Quanto maior é uma determinada zona do perfil, mais forte é essa característica do conceito no perfil como um todo (MORTIMER, 1996, p. 31).

Em *A Filosofia do Não* (1940), Bachelard construiu o perfil epistemológico do conceito de massa e o aplicou a si mesmo, através de uma autoanálise.

Figura 9 – Perfil epistemológico pessoal de Bachelard quanto ao conceito de massa



Fonte: BACHELARD, 1978a, p. 25 (adaptado)

Como pode ser observado na Figura 9, Bachelard acreditava que sua compreensão do conceito de massa estava muito mais impregnada por uma concepção racionalista clássica; seguida de uma concepção empirista e positivista. E ele justifica esse resultado recorrendo a eventos de sua própria história. Ele diz:

No nosso esquema, reconhece-se a importância atribuída à noção racionalista de massa, noção esta formada numa educação matemática clássica e desenvolvida numa lógica prática do ensino de física elementar. [...] Consideremos a seguir, [...] a noção de massa sob a sua forma empírica. No que nos diz respeito, somos levados a dar-lhe uma importância bastante grande. Com efeito, a *conduta da balança* foi por

nós muito praticada no passado. Foi-o na época em que trabalhávamos em química e também na época mais recuada em que pesávamos, com um cuidado administrativo, as cartas numa estação dos correios. Os escrúpulos das finanças reclamam a *conduta da balança de precisão* (BACHELARD, 1978a, p. 25-26, grifo do autor).

O realismo admite que o conhecimento obtido sobre algo é uma realidade desse algo. Assim, nessa concepção, o que percebemos de um objeto é uma realidade do mesmo. Ou seja, o que extraímos de um objeto através dos nossos sentidos é uma informação dada pelo próprio objeto a respeito de si, de como ele é. Esse pensamento é muito semelhante ao de uma criança – motivo pelo qual Bachelard o chamou de “realismo ingênuo” – e guarda muitas interseções com o senso-comum.

Esta é a primeira zona de um perfil epistemológico, a forma mais rudimentar de se conceber um objeto, um conceito. Para uma criança em tenra idade, o que existe é o que está diante dos seus olhos; e da forma como ela vê, assim o é. Nesse sentido, a apreciação realista e ingênua da massa de um objeto será “uma apreciação quantitativa grosseira e como que ávida [apressada] da realidade. Aprecia-se uma massa pela vista” (BACHELARD, 1978a, p. 13). Imersa nessa concepção, uma pessoa dirá, por exemplo, que 1 kg de algodão “pesa mais” (ou seja, tem mais massa) do que 1 kg de chumbo, deixando-se enganar pelo volume, pelas dimensões dos objetos. Há uma “contradição entre o grande e o pesado” (BACHELARD, 1978a, p. 13). Logo, é do rompimento com essa subjetividade que emerge a segunda zona de um perfil epistemológico: o empirismo claro e positivista.

Numa concepção empirista, a objetividade é buscada através da manipulação de um instrumento, de um aparelho experimental. No entanto, não se trata de um instrumento altamente teorizado, como um instrumento científico dos séculos XX e XXI (um acelerador de partículas, por exemplo). A zona empirista de um conceito é “um longo período em que o instrumento precede a sua teoria, [...] [onde] a máquina mais complicada é governada *simplesmente*, com um conjunto de *conceitos empíricos* racionalmente mal concebidos e mal articulados, mas reunidos de uma forma pragmaticamente segura” (BACHELARD, 1978a, p. 15, grifo do autor). Aqui, a massa é entendida através da utilização da balança; uma balança que é anterior à teoria das alavancas (BACHELARD, 1978a).

A utilização do instrumento corrobora, então, para a objetificação do conceito. E é essa compreensão objetiva do conceito que permite que ele seja, por fim, correlacionado com outros. Bachelard (1978a) afirma que “à utilização simples e absoluta de uma noção, segue-se a utilização correlativa das noções; [...] [e] a partir da existência da correlação, poder-se-á

deduzir uma das noções, seja ela qual for, a partir das outras” (BACHELARD, 1978a, p. 16). Essa correlação favorece o surgimento das fórmulas, que demarcam o início de uma concepção racionalista do conceito. Nesse instante, “uma matemática especial associa-se à experiência e racionaliza-a” (BACHELARD, 1978a, p. 17).

No espectro do conceito de massa, a zona do racionalismo clássico está intimamente ligada à física newtoniana.

Com Newton, a massa será definida como o quociente da força pela aceleração. Força, aceleração, massa, estabelecem-se correlativamente numa relação claramente racional, dado que esta relação é perfeitamente analisada pelas leis racionais da aritmética. [...] Antes de Newton, estudava-se a massa do seu *ser*, como quantidade de matéria. Depois de Newton, ela é estudada num *devir* dos fenômenos, como coeficiente de devir (BACHELARD, 1978a, p. 16, grifo nosso).

Isto é, numa concepção racionalista clássica, a massa (m) é definida por:

$$m = \frac{F}{a} \quad (\text{Equação 1})$$

onde, apesar de ser uma constante, a massa se torna uma razão de duas variáveis – da força resultante (F) que atua sobre um corpo e da aceleração (a) adquirida por ele.

A ruptura com a concepção racionalista clássica ocorre, entretanto, quando o conceito deixa de ser entendido como absoluto e passa a ser relativizado. É com essa ruptura que se institui um racionalismo completo. O racionalismo newtoniano, que orientou a física até o século XIX, assumiu diversos conceitos como absolutos – conceitos que poderiam ser, em todas as formulações, reconhecidos e isolados, como se fossem independentes. Foi o caso dos conceitos de espaço, de tempo e de massa. O racionalismo einsteiniano (dito “completo”) disse “não” aos absolutos; e encarregou-se de relativizar esses conceitos a depender do movimento dos corpos.

Numa concepção racionalista completa, a massa (m) é definida em função da velocidade (v) do corpo. “A massa de um objeto é, pois, relativa ao deslocamento desse objeto”, diz Bachelard (1978a, p. 18). Observe a expressão da massa na teoria da relatividade de Einstein:

$$m_{O'} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \cdot m_O$$

Isto é:

$$m_{0'} = \gamma \cdot m_0 \quad (\text{Equação 2})$$

De acordo com essa expressão, a massa de um corpo em movimento ($m_{0'}$) é um produto do fator de Lorentz (γ) pela massa do corpo em repouso (m_0). Assim, pode-se inferir que, quando a velocidade do corpo tende a zero, as duas massas tendem a se igualar – o que está em pleno acordo com a física newtoniana. Mas, quando a velocidade do corpo tende à velocidade da luz (c), sua massa tende ao infinito – um resultado completamente impensável para a física clássica.

Por fim, a quinta zona de um perfil epistemológico. Essa zona é reconhecida por um racionalismo discursivo, cuja forma de pensar o conceito não só generaliza e aprofunda as demais, como também suscita uma perspectiva inédita, com conclusões que seriam rotuladas até mesmo como “erros fundamentais” pelas teorias precedentes. Esse grau elevado do racionalismo questiona as impossibilidades reunidas pelos graus inferiores, operando conforme a filosofia dialética do “por que não?” (BACHELARD, 1978a, p. 21). “Por que esse objeto não pode ser de outra forma?” “Por que esse evento não é viável?” E é dessa maneira que ideias sem quaisquer raízes na realidade comum são concebidas.

Para Bachelard (1978a), foi a mecânica de Dirac que inaugurou a concepção racionalista discursiva do conceito de massa. A equação de Dirac (a mesma apresentada na Figura 6a; reescrita abaixo) é uma equação de onda relativística, onde coeficientes matriciais (α) operam sobre funções de onda (Ψ) que descrevem o comportamento de uma massa (m):

$$\left\{ i\hbar \left(\frac{\partial}{c \cdot \partial t} + \alpha_1 \frac{\partial}{\partial x} + \alpha_2 \frac{\partial}{\partial y} + \alpha_3 \frac{\partial}{\partial z} \right) + \alpha_4 mc \right\} \Psi(\vec{x}, t) = 0 \quad (\text{Equação 3})$$

Na resolução dessa equação, duas massas simétricas (opostas) são obtidas: uma massa positiva ($m > 0$), que concorda com todas as teorias concebidas até aqui, e uma massa negativa ($m < 0$), sem paralelos (BACHELARD, 1978a; NETO, 2019).

De acordo com Bachelard (1978a):

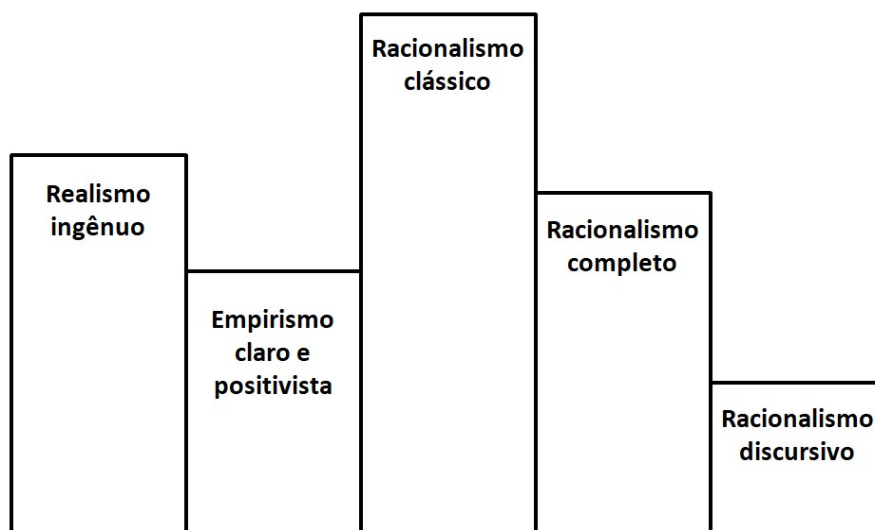
Nós tínhamos apenas necessidade de uma massa; o cálculo dá-nos duas, duas massas para um só objeto. Uma destas massas [a massa positiva] resume perfeitamente tudo o que se sabia da massa nas quatro filosofias precedentes: realismo ingênuo,

empirismo claro, racionalismo newtoniano, racionalismo completo einsteiniano. Mas a outra massa, dialética da primeira, é uma *massa negativa*. Trata-se de um conceito inteiramente inadmissível nas quatro filosofias antecedentes. [...] Para o cientista do século XIX, o conceito de uma massa negativa teria sido um conceito monstruoso (p. 20-21, grifo nosso).

É dessa forma que ocorre o progresso das zonas racionalistas, construindo ideias não só cada vez mais distantes da realidade imediata, como também propondo formulações cada vez mais complexas. Compare as Equações 1, 2 e 3, por exemplo. Bachelard (1978a) afirma que o espírito científico atual “aspira a uma maior matematização, a funções matemáticas mais complexas, mais numerosas” (p. 23).

Além do perfil epistemológico do conceito de massa, Bachelard também propôs um perfil para o conceito de energia. Observe a Figura 10:

Figura 10 – Perfil epistemológico pessoal de Bachelard quanto ao conceito de energia



Fonte: BACHELARD, 1978a, p. 27 (adaptado)

Sua insistência na construção desses gráficos ultrapassa, no entanto, a simples vontade de resumir os pontos fundamentais de sua filosofia da ciência. Terminantemente, os perfis não servem apenas como súmulas de uma grande obra. Bachelard, enquanto professor, também agregou funcionalidades pedagógicas aos perfis, voltadas ao ensino.

1.5.1. O valor pedagógico dos perfis epistemológicos

Gaston Bachelard, enquanto epistemólogo, poderia ter limitado suas pesquisas apenas à caracterização do conhecimento científico. No entanto, sua formação pedagógica o levou além, a preocupar-se com o sujeito que faz e pensa a ciência. Afinal, se a ciência é uma elaboração humana, cabe questionar: Como o conhecimento científico afeta os indivíduos que o formulam? Nessa análise de impactos, Bachelard concentrou-se no âmbito psicológico. E, nesse caminho, defendeu que há uma estreita correlação entre o progresso científico e o progresso das estruturas cognitivas dos sujeitos³¹ – as estruturas que possibilitam o conhecimento.

Para relacionar a *episteme* com a *psique*³², Bachelard recorreu às perspectivas sobre o desenvolvimento humano (descritas no início do capítulo). Primeiro, negou a ideia inatista de que os indivíduos nasceriam “prontos”, dotados de um conhecimento “pleno”. Se assim o fosse, a história da ciência não apresentaria todas as suas rupturas. E, dando seguimento, Bachelard também contrariou a ideia ambientalista de que as estruturas do pensamento seriam, na ocasião do nascimento, como “folhas em branco”, desprovidas de qualquer informação. Pois, se o conhecimento fosse apenas uma “herança cultural”, sem qualquer influência das particularidades dos indivíduos, como poderíamos explicar todas as controvérsias científicas? Foi quando Bachelard se alinhou com a terceira abordagem do problema, fundamentalmente dialética: a abordagem interacionista. Para Bachelard (1978a):

A criança nasce com um *cérebro inacabado* e não, como afirmava o postulado da antiga pedagogia, com um *cérebro inoculado*. A sociedade acaba, na verdade, o cérebro da criança; acaba-o através da linguagem, através da instrução, através da educação (p. 78, grifo do autor).

Isto é: O desenvolvimento dos indivíduos se completaria, para Bachelard, numa interação de suas estruturas com os meios nos quais estão inseridos, em um processo

³¹ O termo “realismo ingênuo”, por exemplo, usado para identificar a primeira zona de um perfil epistemológico, traz consigo essa relação íntima entre a epistemologia e a psicologia do desenvolvimento. O compromisso filosófico da primeira zona é diretamente associado à lógica do pensamento infantil (BACHELARD, 1978a).

³² Bachelard não foi o único que, no século XX, correlacionou o desenvolvimento científico com o desenvolvimento das estruturas cognitivas dos sujeitos. Piaget também utilizou essa ideia na fundamentação de sua epistemologia genética. Segundo Macedo (1983), “Piaget propõe o retorno às fontes e à gênese propriamente dita do conhecimento [...]. Tal projeto situa-se em dois planos distintos, que se interpenetram e se explicam mutuamente: de um lado, a *história do pensamento científico*, de outro, o estudo experimental do *desenvolvimento da inteligência*, desde o nascimento até a adolescência. Piaget demonstrou que se pode traçar um paralelo entre esses dois planos” (p. VIII, grifo nosso).

intimamente ligado à cultura e à educação. E é aqui que Bachelard se enquadra, em alguma medida, dentro de uma perspectiva psicopedagógica construtivista, pois compreende não só o conhecimento como fruto de um processo construtivo, mas também as estruturas individuais que o possibilitam (SILVA, 2009).

Assim, é possível concluir que, numa perspectiva bachelardiana, ao mesmo tempo em que a aprendizagem de ciências dependeria de estruturas de pensamento preexistentes, também promoveria uma adaptação, uma evolução das estruturas cognitivas. A educação científica seria, portanto, uma das ferramentas possíveis para o desenvolvimento cognitivo dos indivíduos. Ou seja, o amadurecimento na concepção dos conceitos científicos (que segue o sentido de um racionalismo crescente) estaria associado ao amadurecimento da própria estrutura de pensamento. E este seria um compromisso da educação científica: corroborar para o progresso de tais estruturas do sujeito conhecedor. Afirmo o epistemólogo francês:

Devemos aproveitar todos os ensinamentos da ciência, por muito especiais que sejam, para determinar as novas estruturas espirituais. Devemos compreender que a aquisição de uma forma de conhecimento se traduz automaticamente numa reforma do espírito. É, pois, necessário dirigir as nossas investigações no sentido de uma nova pedagogia (BACHELARD, 1978a, p. 77).

Segundo Carvalho Filho (2006),

a existência de um perfil epistemológico se faz necessária para se determinar o grau de maturidade da pessoa a partir de um dado conceito científico, permitindo ao professor precisar os meios necessários para promover um eficiente processo de ensino, a partir do nível do estudante. [...] A identificação desse perfil facilita o trabalho do educador em sala de aula, ao fornecer o estágio em que se encontram os estudantes e definir uma estratégia mais eficaz na tentativa de efetuar uma ruptura com essas concepções (p. 12-13).

Logo, ancorado em Bachelard, pode-se afirmar que o ensino de ciências deveria aproveitar os conhecimentos prévios dos estudantes e, mostrando suas insuficiências, em um processo que visa à superação de obstáculos epistemológicos³³, deveria estimular rupturas que

³³ Bachelard (1996), em *A formação do espírito científico*, elencou sete obstáculos de natureza epistemológica: (1) a *experiência primeira*, “a experiência colocada antes e acima da crítica” (p. 29), (2) o *conhecimento geral*, a compreensão de fenômenos diversos através de princípios generalizados, (3) o *verbal*, que seria o hábito de concentrar uma longa explicação ou ideia em uma imagem e/ou palavra, (4) o *conhecimento unitário e pragmático*, enquanto entendimento de que diferentes processos integram uma única natureza, leis ou ordem, tendo, desse modo, uma finalidade, utilidade ou propósito designados no interior dessa unidade; (5) o *substancialista*, que “atribui à substância, qualidades diversas” (p. 121), sem quaisquer preocupações com as relações mútuas existentes entre essas qualidades; (6) o *animista*, a atribuição de propriedades de fenômenos biológicos a fenômenos físicos, como a concessão de vida a seres inanimados; e, por fim, (7) o *quantitativo*, como crença de que a grandeza matemática é automaticamente objetiva, o que leva à quantificações excessivas e desnecessárias, como a quantificação de fenômenos e a “ultraprecisão”.

inaugurassem novas maneiras de pensar³⁴ (em muitos casos, não completamente avessas às antigas formas, mas complementares, segundo a ideia já discutida de *generalização dialética*).

E, dessa forma, uma vez que, no corpo do conhecimento científico, cabem diversas concepções para um mesmo conceito (o que está representado nas diferentes zonas de um perfil epistemológico), seria indispensável ensinar (e aprender) a pensar ciência de modo dinâmico, crítico e contextualizado – isto é, não dogmático. Sendo, então, fundamental, conscientizar-se a respeito dos problemas (e dos benefícios) que estão circunscritos em cada concepção de um determinado conceito, a fim de que elas sejam empregadas seguramente quando forem requisitadas.

Além disso, os perfis epistemológicos servem de recurso para o “ensino mediado pela história da ciência”³⁵. Não um ensino limitado às biografias dos personagens historicamente consagrados; mas que, sobretudo, mostra as nuances da produção e da divulgação do conhecimento científico.

Em um perfil epistemológico, é possível observar que cada zona, tendo sido inaugurada em um período histórico distinto, compreende o conceito de uma maneira diferente, segundo compromissos filosóficos particulares. E isso corrobora para uma ideia ativa de ciência, como um conhecimento em permanente (re)construção e dotado de sinuosidades (controvérsias e ruptura). De acordo com Sequeira e Leite (1988):

Quando se utiliza a história da ciência no ensino das ciências, o aluno pode verificar como as teorias atualmente aceitas evoluíram em consequência de uma atividade humana coletiva, desenvolvida num contexto sócio-histórico-cultural (que também

³⁴ Bachelard (1996) fez uma crítica aos professores de ciências que não consideram que os alunos, ao adentrarem na sala de aula, já trazem consigo uma bagagem intelectual, uma forma própria de pensar. Segundo o filósofo, tais professores, provavelmente imersos num paradigma ambientalista acerca do desenvolvimento humano, acham que, pelo muito falar, repetindo suas explicações inúmeras vezes, vão gerar aprendizado em seus alunos. No entanto, como ele deixa a entender, esses professores se frustram, pois os alunos não conseguem assimilar os novos conhecimentos de forma eficaz, uma vez que já possuem consigo, ideias arraigadas que dificultam a apreensão das novidades. Com suas próprias palavras: “Os professores de ciências imaginam que o espírito começa com uma aula, que é sempre possível reconstruir uma cultura falha pela repetição da lição, que se pode fazer entender uma demonstração repetindo-a ponto por ponto. Não levam em conta que o adolescente entra na aula de física com conhecimentos empíricos já constituídos [...], [e que] não se trata, portanto, de *adquirir* uma cultura experimental, mas sim de *mudar* de cultura experimental, de derrubar os obstáculos já sedimentados pela vida cotidiana” (p. 23, grifo do autor).

³⁵ Optou-se pelo termo “ensino mediado pela história da ciência” ao invés de “ensino de história da ciência”; pois o segundo termo leva à ideia de que a história da ciência é o próprio objeto de estudo. Em verdade, não há qualquer problema nisto, em estabelecer a história da ciência como um objeto de análise. Porém, se esse fosse o único objetivo, o perfil epistemológico do conceito de massa seria mais do que suficiente para ilustrar a perspectiva de Bachelard acerca do tema, uma vez que foi proposto pelo próprio. Se novos perfis são elaborados e propostos, o objetivo é utilizar a história da ciência (na óptica bachelardiana) como meio para um ensino mais crítico dos conceitos científicos sob investigação. A ideia por detrás do termo “ensino mediado pela história da ciência” é, justamente, o uso da “história da ciência como instrumento didático” (p. 63), como pode ser visto em Dutra (2015).

evoluiu ao longo dos tempos); e, desta forma, [pode] apreciar o significado cultural e a validação dos princípios e teorias científicas a luz do contexto dos tempos em que foram aceitos (p. 36).

Assim, os perfis epistemológicos também se constituem de ferramentas profícuas para discussões acerca da natureza da ciência, estando alicerçados em uma base filosófica consistente para a reflexão acerca do que diferencia o saber científico de outros saberes e acerca de como o saber científico se desenvolve.

Alinhados a esses valores, trabalhos têm sido publicados com propostas originais de perfis epistemológicos para diversos conceitos – poucos, entretanto, diretamente relacionados à ciência química. Num levantamento bibliográfico realizado em diferentes bibliotecas e bancos virtuais de pesquisa (como o Google Acadêmico, o Catálogo de Teses e o Portal de Periódicos da CAPES e a *Scientific Electronic Library Online* - SciELO) foram encontrados 17 (dezessete) títulos brasileiros, compreendidos do ano de 2004 até 2021. Trabalhos publicados em outros anos não foram encontrados nesse levantamento. Vide a Tabela 1.

Tabela 1 – Trabalhos publicados com propostas originais de perfis epistemológicos

Ano	Autor(es)	Título	Conceito investigado	Tipo de trabalho
2004	MARTINS, A. F. P.	Concepções de estudantes acerca do conceito de tempo: Uma análise à luz da epistemologia de Gaston Bachelard	Tempo	Tese
2009	SANTOS, Z. T. S.	Ensino de Entropia: Um enfoque histórico e epistemológico	Entropia	Tese
2009	SOUZA FILHO, M. P.	O erro em sala de aula: Subsídios para o ensino do eletromagnetismo	Eletromagnetismo	Tese
2010	BARROS, M. A. S.	O perfil epistemológico dos alunos do curso de licenciatura em Química e Física da UFRPE sobre o fenômeno de capilaridade.	Capilaridade	Artigo
2010	COLOMBO JUNIOR, P. D.	A percepção da gravidade em um espaço fisicamente modificado: Uma análise à luz de Gaston Bachelard	Gravidade	Dissertação
2011	SILVA JUNIOR, W. G.	Construção epistemológica da concepção de luz por docentes do ensino médio	Luz	Dissertação
2014	BUSCATTI JUNIOR, D. A.	O perfil epistemológico do conceito de espaço em alunos do curso de licenciatura em física	Espaço	Dissertação

2014	JUSTINA, L. A. D.; CALDEIRA, A. M. A.	Uma investigação com graduandos da licenciatura em Ciências Biológicas sobre a relação genótipo-fenótipo na perspectiva da epistemologia de Gaston Bachelard	Relação genótipo-fenótipo	Artigo
2015	CEDRAN, J. C.	O conceito de estrutura dos compostos orgânicos: Uma análise à luz da epistemologia de Gaston Bachelard	Estrutura dos compostos orgânicos	Tese
2016	PAZINATO, M. S.	Ligações químicas: Investigação da construção do conhecimento no ensino médio	Ligação química	Tese
2016	TREVISAN, R.; ANDRADE NETO, A. S.	Uma construção do Perfil Epistemológico de licenciandos em Física acerca da dualidade onda-partícula em Mecânica Quântica, após o uso de bancadas virtuais: Um estudo a partir do discurso gestual e verbal	Dualidade partícula-onda	Artigo
2017	ANDRADE, V. A. et al.	Perfil epistemológico do conceito sistema imune humano: Delineamento e contribuições para o ensino de Imunologia	Sistema imune	Artigo
2017	MAIA, V. L. S.	O perfil epistemológico da tecnologia em obras de ficção científica	Tecnologia	Dissertação
2018	TRINTIN, R. S.	Análise do conceito de força nos livros didáticos de física do ensino médio sob a luz de Bachelard	Força	Dissertação
2019	DORIGON, L. et al.	Perfil epistemológico para o conceito de transformações apresentado nos livros didáticos de química da 1ª série do ensino médio	Transformação	Artigo
2020	MELO, V. F.	Investigando o entendimento sobre densidade à luz da noção de Perfil Epistemológico e do Autoconceito em Química	Densidade	Tese
2021	SILVA, I. R. C.	As filosofias ocultas na concepção de ciência em professores de física em formação: Uma análise sob a perspectiva de Gaston Bachelard	Ciência	Dissertação

Fonte: O autor, 2024

O objetivo desta dissertação visa contribuir para essa coleção de trabalhos, trazendo uma proposta de perfil para o conceito de *interação intermolecular*. Desse modo, no capítulo 2, seguindo a metodologia bachelardiana (abordada no início do tópico 1.4.1), será feita uma definição do conceito (alinhada ao modelo científico consensualmente aceito na atualidade) e uma criteriosa descrição de como ele evoluiu ao longo da história. Esses estágios serão fundamentais para a construção do perfil epistemológico.

Capítulo II –

As origens do conceito de “interação intermolecular”

O que são as interações intermoleculares? Como esse conceito evoluiu ao longo da história do Ocidente?

2.1. UMA DEFINIÇÃO AMPLA DO CONCEITO DE “INTERAÇÃO INTERMOLECULAR”

Começando por livros consagrados na Educação Superior, referenciados em diversas ementas de química geral e inorgânica – como os livros dos autores Atkins e Jones (2012) e Kotz, Treichel e Weaver (2010) –, pode-se observar que o termo “interação intermolecular” é citado como equivalente ao termo “força intermolecular”³⁶ (JUNQUEIRA, 2017). Em que “forças intermoleculares” se referem às forças de natureza elétrica que ocorrem entre átomos e/ou moléculas, promovendo atração ou repulsão mútua (ATKINS, JONES, 2012). Reproduzindo essa abordagem do nível superior, o mesmo tratamento conceitual pode ser observado em livros didáticos tradicionais (anteriores a 2017) e recentes (aprovados no Programa Nacional do Livro Didático – PNLD – de 2021) voltados à Educação Básica; como os elencados na Tabela 2.

Tabela 2 – Livros didáticos de química voltados à Educação Básica e que tratam o termo “interação intermolecular” como equivalente ao termo “força intermolecular”

Ano	Autor(es)	Título	Volume	Editora
2002	PERUZZO, F. M.; CANTO, E. L.	Química na abordagem do cotidiano	Único	Moderna
2004	FELTRE, R.	Química	1	Moderna
2012	SANTOS, W. L. P. et al.	Química cidadã – Materiais, substâncias, constituintes, química ambiental e suas implicações sociais	1	AJS
2016	REIS, M.	Química	1	Ática

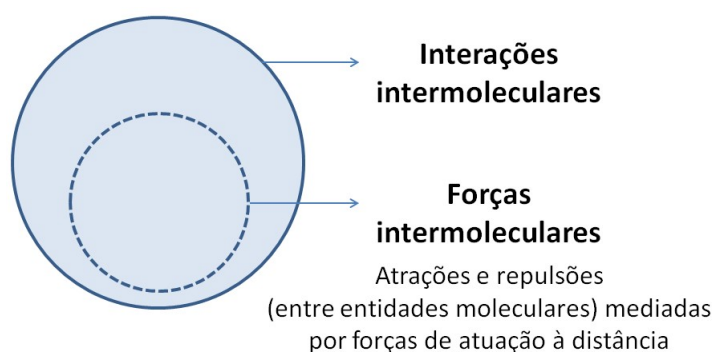
³⁶ Não raro, as interações intermoleculares também são chamadas de “ligações”, gerando uma confusão conceitual com as ligações interatômicas.

2020	AMABIS, J. M. et al.	Moderna Plus: Ciências da Natureza e Suas Tecnologias	Água e vida	Moderna
2020	FUKUI, A. et al.	Ser Protagonista: Ciências da Natureza e Suas Tecnologias	Composição e estrutura dos corpos	SM
2020	LOPES, S.; ROSSO, S.	Ciências da Natureza Lopes e Rosso	Evolução e universo	Moderna
2020	MORTIMER, E. F. et al.	Matéria, Energia e Vida, uma abordagem interdisciplinar	Materiais e energia: Transformações e conservação	Scipione
2020	SANTOS, K. C. et al.	Diálogo: Ciências da Natureza e Suas Tecnologias	Vida na Terra: Como é possível?	Moderna

Fonte: O autor, 2024

Esse paralelismo, no entanto, leva à ideia de que as interações são, simplesmente, forças; onde a troca de uma palavra pela outra pode ocorrer de forma indiscriminada, sem qualquer prejuízo semântico. Todavia, a noção de “força como interação entre dois corpos” é relativamente recente, remontando à Isaac Newton (1642-1727) (PESSOA JÚNIOR, 2019; TRINTIN, 2018). E a pergunta sobre como as partículas da matéria interagem entre si é muito anterior às contribuições desse cientista – já tendo suscitado, em períodos históricos precedentes, diferentes respostas. Logo, a rigor, as “forças intermoleculares” – isto é, as atrações e repulsões, entre entidades moleculares, mediadas por forças de atuação à distância – são apenas uma das formas de se conceber as “interações intermoleculares”; sendo o primeiro termo, subconjunto do segundo (Figura 11).

Figura 11 – Relação conceitual entre as “forças intermoleculares” e as “interações intermoleculares”



Fonte: O autor, 2024

A partir disso, é preciso definir o que são interações intermoleculares numa acepção ampla. E, baseando-se na estrutura morfológica do termo “interação intermolecular”, é possível desmembrar essa questão em duas. Primeiro, o que são “interações”. Depois, seguindo a lógica, o que são “moléculas”.

Na pesquisa pelo significado de “interação”, observa-se que essa palavra costuma ser entendida como uma “ação”, uma “atividade” ou uma “influência” que ocorre, mutuamente, entre dois ou mais corpos (HOUAISS, VILLAR, FRANCO, 2001; MICHAELIS, 2022; PRIBERAM DICIONÁRIO, 2022). Esse significado corrente classifica as “interações” como *processos*, de acordo com as categorias ontológicas³⁷ propostas por Chi (1993). E, segundo o compêndio de terminologia química (conhecido como “livro ouro”) da União Internacional de Química Pura e Aplicada (IUPAC), uma “molécula” é “uma entidade eletricamente neutra formada por mais de um átomo”³⁸ (2014, p. 958, tradução nossa). Assim, a princípio, as interações intermoleculares poderiam ser definidas como “processos que ocorrem entre duas ou mais moléculas”.

Entretanto, sabe-se (empiricamente) que átomos, íons, radicais e outras espécies químicas também podem interagir entre si. Dessa maneira, a fim de corrigir a definição elaborada, é necessário buscar um termo que abranja todas essas espécies. E o termo que melhor se aplica é “entidade molecular”, que circunscreve

qualquer átomo, molécula, íon, par de íons³⁹, radical⁴⁰, íon radical⁴¹, complexo⁴², conformero⁴³ etc. constitucionalmente ou isotopicamente distinto, identificável como uma entidade distinta separadamente. Entidade molecular é [...] um termo

³⁷ A ontologia é “a parte da filosofia que estuda o *ser* em geral e suas propriedades, as quais garantem a sua essência. Ou seja, [a ontologia] leva em consideração como é constituído tudo que existe no mundo” (DIMOV, PECHLIYE, JESUS, 2014, p. 10, grifo nosso). Chi (1993) propõe a classificação dos seres de acordo com três categorias básicas: materiais, estados mentais e processos. *Material* é tudo que ocupa lugar no espaço e possui propriedades como forma, tamanho, cor etc. *Estado mental* é tudo que só pode ser experimentado de forma abstrata, interiorizada e subjetiva, como os pensamentos e os sentimentos. E *processo* é todo conjunto de ações e/ou alterações que ocorrem em algo e têm algo resultado, acontecendo, portanto, em certo período de tempo.

³⁸ O texto em língua estrangeira é: “An electrically neutral entity consisting of more than one atom”.

³⁹ Um par iônico é “um par de íons de cargas opostas, mantidos juntos pela força de Coulomb sem a formação de uma ligação covalente” (IUPAC, 2014, p. 761). Um par iônico “íntimo” ou “de contato” é um par que possui seus íons em contato direto, sem o intermédio de qualquer solvente ou outra molécula. Quando os íons do par estão separados por quaisquer moléculas, constituem um par iônico “solto”. Os pares iônicos íntimos são representados por X^+Y^- ; enquanto que os pares iônicos soltos são representados por $X^+||Y^-$.

⁴⁰ Um radical é “uma entidade molecular, tal como $\cdot\text{CH}_3$, $\cdot\text{SnH}_3$ e $\cdot\text{Cl}$, que possui um elétron desemparelhado” (IUPAC, 2014, p. 1234). Na representação de um radical, o ponto indica o elétron desemparelhado. Íons metálicos paramagnéticos não são normalmente considerados como radicais.

⁴¹ Um íon radical é “um radical que carrega carga elétrica” (IUPAC, 2014, p. 1235).

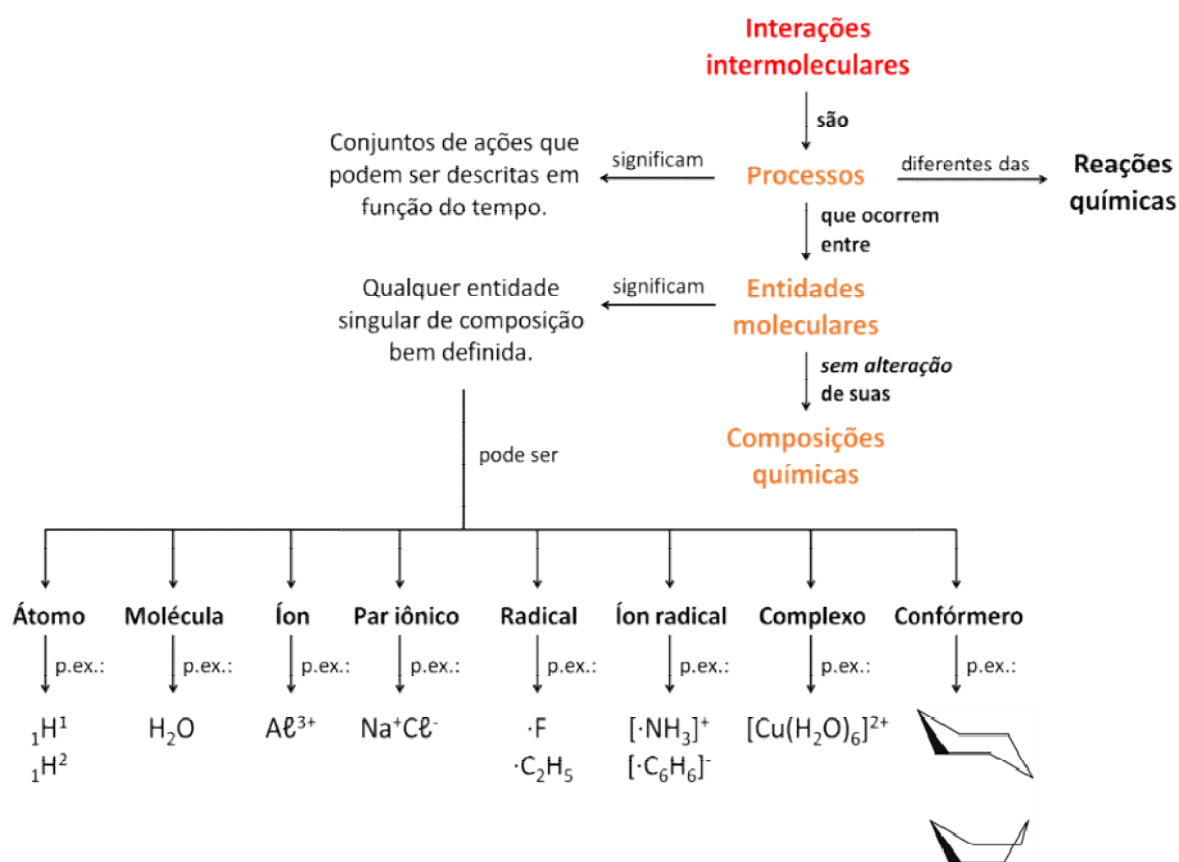
⁴² Em química inorgânica, o termo “complexo” também é chamado de “composto de coordenação”. Trata-se de “um conjunto que consiste em um átomo central (geralmente metálico) ao qual está ligado uma matriz circundante de outros grupos de átomos (ligantes)” (IUPAC, 2014, p. 334).

⁴³ Conformero é “um exemplar de um conjunto de estereoisômeros, onde cada um dos quais é caracterizado por uma conformação correspondente a um mínimo de energia potencial distinto” (IUPAC, 2014, p. 320).

geral para entidades singulares, independentemente de sua natureza⁴⁴ (IUPAC, 2014, p. 950, tradução nossa).

Ou seja, as moléculas podem ser diferenciadas das demais entidades moleculares. Isto é, o conceito de entidade molecular engloba o de molécula. Logo, dizer que “as interações intermoleculares são processos que ocorrem entre duas ou mais entidades moleculares” torna-se mais adequado. Porém, ainda é preciso fazer um adendo a essa definição.

Figura 12 – Mapa conceitual com a definição de “interação intermolecular”



Fonte: O autor, 2024

As reações químicas são processos que resultam na interconversão de espécies químicas (IUPAC, 2014). As espécies colocadas para reagir num momento inicial, chamadas de reagentes, são diferentes das espécies formadas na reação, chamadas de produtos. Então, com o intuito didático de destacar o caso excepcional das reações químicas, **as interações**

⁴⁴ O texto em língua estrangeira é: “Any constitutionally or isotopically distinct atom, molecule, ion, ion pair, radical, radical ion, complex, conformer etc., identifiable as a separately distinguishable entity. Molecular entity is [...] a general term for singular entities, irrespective of their nature”.

intermoleculares compreendem todos os processos que ocorrem entre entidades moleculares com a preservação de suas composições químicas. Vide o mapa conceitual da Figura 12, relativo à definição mais genérica das interações intermoleculares.

Essa definição ampla encontra semelhança com a descrição de Rocha (2001), que diz:

Quando moléculas, átomos ou íons aproximam-se uns dos outros, dois fenômenos podem ocorrer: (i) eles podem reagir ou (ii) eles podem interagir. Uma reação química, por definição, requer que ligações químicas sejam quebradas e/ou formadas. Usualmente as energias envolvidas neste processo variam entre 50 e 100 kcal.mol⁻¹. Uma interação química significa que as moléculas se atraem ou se repelem entre si, sem que ocorra a quebra ou formação de novas ligações químicas. Estas interações são frequentemente chamadas de *interações não-covalentes* ou *interações intermoleculares*. As energias envolvidas em tais tipos de interações são muito menores que aquelas envolvidas em processos reativos, variando usualmente entre 0,5 a 10 kcal.mol⁻¹ (p. 31).

Desse modo, munido de uma definição satisfatória e atual para o conceito, é possível enveredar na busca de suas origens – agora, porém, não mais morfossemânticas; e sim históricas. A seguir, então, será feito um breve relato da evolução do conceito de “interação intermolecular”.

2.2. A EVOLUÇÃO HISTÓRICA DO CONCEITO DE “INTERAÇÃO INTERMOLECULAR”

O século V a.C. foi extremamente importante para a história do pensamento ocidental. Isso porque, nesse século, mais precisamente na Grécia antiga, houve uma mudança na forma de conceber o universo (do grego κόσμος, *kósmos*). Antes, o universo era compreendido como uma “criação não-autônoma”, dependente da contínua manutenção ou intervenção das entidades que lhe deram origem – os deuses. Vide, por exemplo, uma síntese do poema Teogonia (Origem dos Deuses), de Hesíodo (século VIII a.C.):

[...] O mundo principia através de quatro divindades primordiais, que darão nascimento a quatro gerações de deuses: Khaos [o abismo, o vazio indeterminado e ilimitado] [...]; Gaia [a Terra] [...]; Tártaro [o mundo subterrâneo, de trevas profundas] [...]; e Eros [o amor]. A primeira geração dos deuses surge pelo processo de separação. Khaos é “cissor”; dele as coisas surgem por diferenciação (cissiparidade); seus filhos são Érebo e Nix (Noite). De Gaia, pelo mesmo processo, surgiu Urano (o céu constelado), e também Ponto (o mar), e as Montanhas. A partir desses, Eros passa a unir as divindades aos pares, donde virá a geração seguinte. De

Érebo e Nix nascem Dia e Éter; de Gaia e Urano nascem os Titãs – Oceano, Coios, Crios, Hipérion, Jápeto, Teia, Reia, Têmis, Minemosyne, Febe, Tétis e Cronos –, além dos assombrosos monstros: Ciclopes, Cotos, Briareu e Giges. Na terceira linhagem, Cronos irrompe contra o poder de seu pai Urano. Por indicação de Gaia, o Titã fica à espreita, aguardando a noite trazer a presença do pai Céu ao redor da Terra e, munido de uma foice, decepa o falo de Urano, pondo fim a sua hegemonia. Do membro ereto atirado a esmo, nascem ainda novas criaturas: de seu sangue caído na terra, surgiram as Eríneas, os Gigantes e as Ninfas; do esperma lançado ao mar, surge Afrodite Urânia. Cronos liberta seus irmãos, prende no Tártaro os monstros Cotos, Briareu e Giges e instaura o domínio dos Titãs sobre o mundo. Ao ser castrado, entretanto, Urano avisa a seu filho que, assim como ele, este será derrubado do trono do mundo por um de seus filhos. Ao tomar Reia como esposa, Cronos passa a devorar cada um dos filhos que tem com a Titanida, assim que eles nascem. Desesperada, ela pede auxílio à mãe Gaia, que lhe prepara um ardil: ao nascimento do próximo filho, ela deve deixá-lo sobre seus cuidados e envolver em um manto uma pedra, a fim de fazer Cronos engoli-la pensando se tratar do bebê. Tal como dissera a mãe, Reia procede; entrega a ela o recém-nascido, que é escondido na ilha de Creta, e ao marido, a pedra enrolada, a qual devora vorazmente, sem se aperceber da farsa. Zeus, mantido a salvo, insurgirá contra seu pai e os Titãs, e instalará a quarta linhagem divina. A partir dessas quatro faixas bem delimitadas, torna-se possível a Zeus articular o mundo dos mortais e imortais (PEREIRA; PEREIRA, 2008, p. 1 - 2).

No século V a.C., entretanto, essa visão cosmogônica⁴⁵ passou a dividir espaço com outra, cosmológica (COTRIM, FERNANDES, 2013). A cosmologia⁴⁶, por sua vez, apreende o universo como um ente (criado ou não) dotado de autonomia, com leis próprias. E foi sob a orientação dessa nova perspectiva que duas questões intimamente relacionadas entre si despertaram a atenção de diversos pensadores. A primeira trata do princípio ou elemento formador (do grego ἀρχή, *arché*) de toda a natureza física (do grego Φύσις, *phýsis*). E a segunda, da existência do movimento. Ou seja: O que constitui todo o mundo físico? E como esse princípio formador possibilita a existência (ou não) do movimento? Essas são perguntas para as quais inúmeras respostas foram produzidas⁴⁷.

Dentre essas respostas, todavia, destaca-se a do pensador grego Leucipo de Mileto (século V a.C.). Isso porque, em meio a tantos pensadores que concebiam a natureza como um *continuum* – algo completamente “preenchido”, sem espaços vazios –, Leucipo ousou ao defender uma perspectiva descontinuísta (SOUZA, 1978). E foi desde esse instante, em que se pensou na matéria como descontínua, que as interações intermoleculares também passaram a ser elucidadas.

⁴⁵ Ou cosmogênica, relativa à origem (do grego Γένεσις, *gênesis*) do *kósmos*.

⁴⁶ Relativa ao estudo (do grego λόγος, *logos*) do *kósmos*.

⁴⁷ Por exemplo: Para Tales de Mileto (625 a.C.-558 a.C.), o *arché* era a água; para Anaxímenes de Mileto (585 a.C.-528 a.C.), o ar. Para Heráclito de Éfeso (540 a.C.-470 a.C.), o fogo (ou energia); para Parmênides de Eléia (530 a.C.-460 a.C.), considerado o “pai da ontologia”, o ser. E para Empédocles de Agrigento (490 a.C.-435 a.C.), quatro elementos: a terra, a água, o ar e o fogo (SOUZA, 1978).

2.2.1. A elaboração do atomismo na Grécia antiga e o seu regresso na Europa do século XV

Para responder as questões do princípio formador da natureza e da existência do movimento, Leucipo de Mileto propôs que o *kósmos* seria formado por átomos e por vazio. Os átomos seriam pequenas partículas de matéria, tangíveis apenas pelo intelecto – uma vez que, dada a pequenez, estariam distantes da possibilidade de serem apreciados pelos sentidos (SOUZA, 1978). Suas qualidades primárias (aquelas que lhes são intrínsecas, imutáveis e independentes dos nossos sentidos) seriam a forma geométrica e o tamanho (GOMES, 2018; SOUZA, 1978). E o vazio, por sua vez, seria o espaço entre os átomos; sem o qual o movimento seria impossível. Pois, para Leucipo, “se o espaço é absolutamente pleno, não pode haver movimento” (SOUZA, 1978, p. 348).

Desse modo, movimentando-se no vazio, os átomos sofreriam contínuas colisões⁴⁸. Os átomos maiores, devido aos seus tamanhos, estariam mais suscetíveis a choques; e, por essa razão, teriam uma velocidade menor, uma vez que foram retardados mais vezes. Os átomos menores, em compensação, preservariam mais os seus movimentos originais, vindo a manter maiores velocidades. Além disso, nessas colisões, os átomos com formas geométricas irregulares tenderiam a se encaixar ou se entrelaçar⁴⁹, formando aglomerados atômicos ainda mais suscetíveis aos choques (SOUZA, 1978). E seria do encaixe ou do entrelaçamento dos átomos (e, posteriormente, dos próprios aglomerados atômicos) que os corpos com proporções macroscópicas, sujeitos aos sentidos, seriam formados (SOUZA, 1978).

Demócrito de Abdera (460 a.C.-370 a.C.), discípulo de Leucipo, aprofundou as ideias de seu mestre sobre os aglomerados atômicos. Para ele, os aglomerados se diferenciariam pela forma (assim como três traços podem compor letras distintas, como as letras A e N), pela ordem (como ocorre nos arranjos AN e NA) e pela posição (assim como a letra Z pode ser visualizada a partir da rotação da letra N) (GOMES, 2018; SOUZA, 1978). E as transformações da matéria seriam explicáveis pelas modificações estruturais de seus aglomerados. Isto é:

⁴⁸ As “colisões” são, portanto, as primeiras concepções sobre as interações intermoleculares.

⁴⁹ O “encaixe” e o “entrelaçamento” são, então, a segunda maneira de se conceber as interações entre as partículas da matéria.

Uma coisa nasce quando se produz um certo agrupamento de átomos; desaparece quando esse grupo se desfaz, muda quando muda a situação ou a disposição desse grupo ou quando uma parte é substituída por outra. Cresce quando lhe são acrescentados novos átomos (SOUZA, 1978, p. 349).

Contudo, tanto Leucipo como Demócrito idealizavam o *kósmos* como um “turbilhão” de átomos em movimento (GOMES, 2018; SOUZA, 1978). E essa concepção um tanto caótica contrariava a percepção cotidiana de que parece haver uma ordem na natureza (PORTO, 2013). Por exemplo: Se uma rocha for lançada para o alto, em certo instante ela retornará ao chão; e esse resultado sempre se repetirá, ainda que o lançamento seja feito milhares de vezes. Da mesma maneira, alguns corpos sempre flutuam sobre a água, enquanto outros sempre afundam. Assim, apesar do modelo atomista de Leucipo e Demócrito dar uma resposta plausível para o problema do movimento, não explicava toda a realidade sensível.

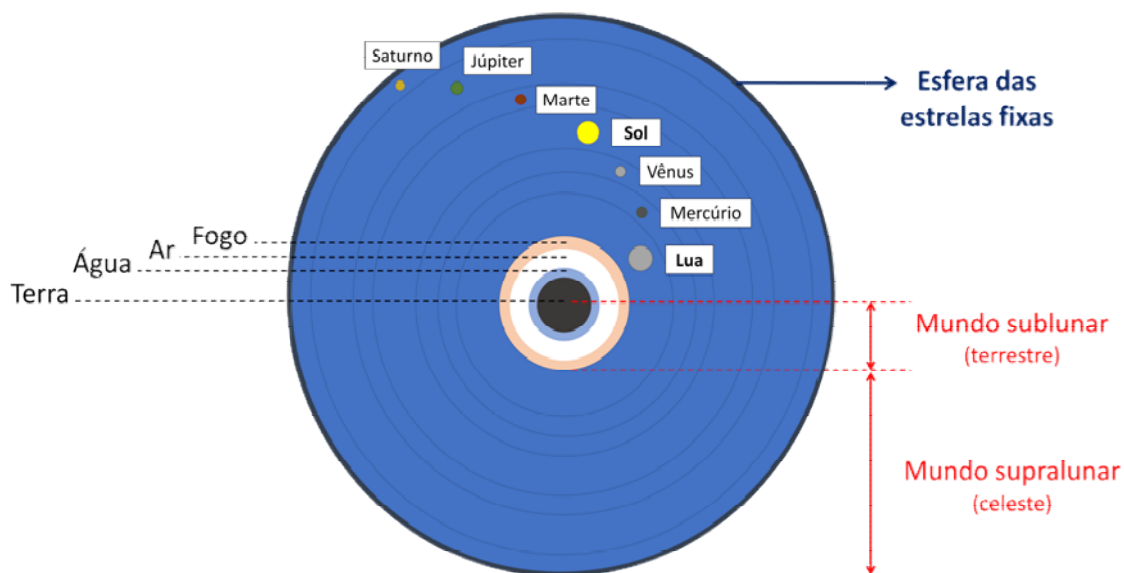
Uma alternativa cosmológica foi proposta por Aristóteles de Estagira (384 a.C.-322 a.C.). O *kósmos* aristotélico, além de estar fortemente alicerçado sobre um formalismo lógico, “constitui uma síntese de percepções empíricas acumuladas até então pela vivência humana” (PORTO, 2009). E foi a partir dessa combinação entre a razão e a observação da *phýsis* (natureza) que Aristóteles negou a existência do vazio, propôs outra conformação para o universo e deu novas explicações para o problema do movimento.

Para o estagirita, além de não haver nenhuma prova empírica que comprovasse a existência do vazio, “a ideia do vazio [...] era contraditória em si, e, portanto, absurda” (PORTO, 2009). Pois, se a matéria consiste no “ser” e, desse modo, “existe”; o vazio, como “não-ser”, seria “inexistente”. Logo, seu *kósmos* seria “completamente preenchido pela matéria” (PORTO, 2009, p. 4). Então, apropriando-se das explicações de seu contemporâneo Eudoxo de Cnido (408 a.C.-355 a.C.) para os movimentos planetários, Aristóteles concebeu o universo como um espaço finito, esférico e rigidamente ordenado (PORTO, 2009). Esse universo seria dividido em dois mundos concêntricos: o sublunar (terrestre) e o supralunar (celeste).

O mundo sublunar, substancialmente corruptível (mutável e fadado às transformações), seria formado pelos quatro elementos que já compunham a obra de Empédocles de Agrigento (490 a.C.-435 a.C.) – a terra, a água, o ar e o fogo (PORTO, 2009; SOUZA, 1978). E o mundo supralunar, incorruptível, seria formado por uma quintessência, denominada de “éter” (PORTO, 2009). A Terra, então, seria o centro do *kósmos* – o que implica dizer que a cosmologia aristotélica é geocêntrica. E o movimento seria uma

consequência direta desse ordenamento universal, onde os elementos sempre buscariam ocupar o seu “local natural”, que lhe é próprio (PORTO, 2009). Vide a Figura 13:

Figura 13 – O *kósmos* de Aristóteles



Fonte: ROQUE, 201-, p. 18 (adaptado)

Com isso, conclui-se que o *kósmos* aristotélico também é referenciado, dotado de “partes (lugares) qualitativamente diferenciadas” (PORTO, 2009, p. 5).

O em cima não é qualquer coisa, mas o lugar para onde se dirigem o fogo e o que é leve; e, igualmente, o embaixo não é qualquer coisa, mas o lugar para onde vão as coisas pesadas e feitas de terra (ARISTÓTELES, 1930 apud PORTO, 2009, p. 5).

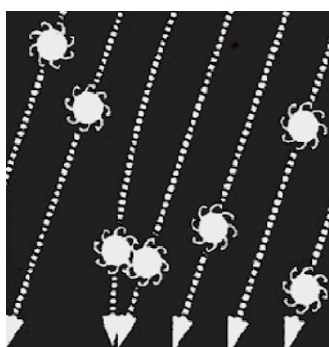
A coerência desse modelo era tal que não demorou pra que outros pensadores ligados à escola atomista – fundada por Leucipo de Mileto – também absorvessem algumas das ideias de Aristóteles. E, aqui, destaca-se Epicuro de Samos (341 a.C.-270 a.C.) (PORTO, 2013). Com o intuito de ordenar o universo atomista – dando-lhe, ao menos, um referencial do que é “em cima” e “embaixo” –, Epicuro atribuiu outra qualidade primária aos átomos: o “peso” (PORTO, 2013). Isso porque, “para os aristotélicos, um corpo era pesado e se movia para o centro da Terra porque possuía a qualidade do peso⁵⁰” (ROVARIS, 2007).

⁵⁰ Aqui, vale destacar que esse “peso” não corresponde à noção newtoniana de força, adotada nos dias de hoje. E, ainda que alguns comentadores correlacionem essa ideia antiga de “peso” à atual ideia de “massa” (o que, assumidamente, num comparativo, é mais didático), recomenda-se muita cautela. Pois, da mesma forma que Aristóteles falava do “peso” como uma propriedade dos corpos, ele também definia a “leveza”. Logo, para

Assim, de acordo com a tradição de Epicuro, o universo seria infinito e teria incontáveis átomos em contínuo movimento (Figura 14).

Contudo, diferentemente de Demócrito, eles não se movem em todas as direções, mas somente movimentam-se para baixo, devido ao peso. Então, a fim de explicar como os átomos podem se encontrar entre si e se juntar para constituir corpos compostos [os chamados aglomerados atômicos], Epicuro introduziu a mais notável das inovações na física atomista da antiguidade, a saber, a “declinação”, ou *clínamen* dos átomos, segundo a qual os átomos podem desviar a qualquer momento e em qualquer ponto uma distância mínima da linha reta e, assim, encontrar outros átomos (ROCHA, 2006, p. 30, grifo do autor).

Figura 14 – O movimento dos átomos no universo epicurista, com destaque para o *clínamen*



Fonte: SCUOLA POPOLARE DI FILOSOFIA - MACERATA, 2016

Concordando com Porto (2013), essa definição de “em cima” e “embaixo” em um universo infinito soa um tanto problemática. Porém, Epicuro insistiu nessa ideia, argumentando ainda que o “embaixo” compreende tudo aquilo “que se estende diretamente abaixo de nossos pés, definição que [...] é muito mais do que geocêntrica, antropocêntrica” (PORTO, 2013, p. 4).

Entretanto, apesar dos esforços, as ideias atomistas não prosperaram ante toda a sofisticação da filosofia aristotélica. E, dessa forma, a cosmologia de Aristóteles ultrapassou os limites da própria Antiguidade – que perdurou do surgimento da escrita (em torno de 4000 a.C.) até a queda do Império Romano do Ocidente (em 476 d.C.) –, adentrando à Idade Média.

Após a desintegração do Império Romano do Ocidente, a Europa [...] [se desmembrou em] vários reinos, cuja principal característica era a descentralização

Aristóteles, um corpo, movimentando-se em direção ao seu “lugar natural”, poderia apresentar tanto um peso, como uma leveza relativos (GOMES, 2018).

do poder, dividido entre o rei e os senhores dos feudos⁵¹. O rei cumpria, sobretudo, funções simbólicas. Era considerado o principal suserano [o senhor feudal mais poderoso, dono das maiores terras e das maiores forças militares]. [Onde] ao ser reconhecido e legitimado pela Igreja, o poder do rei revestia-se de um caráter sagrado: ele era “rei pela graça de Deus”. Apesar disso, não tinha poderes para interferir nas terras de seus vassallos [senhores feudais subordinados]. Nelas, o senhor feudal era soberano, comandando seu funcionamento e fazendo justiça segundo as tradições e o direito consuetudinário, isto é, o direito consagrado pelos costumes. [Nesse período], os caminhos precários e perigosos do interior da Europa dificultavam a troca de mercadorias entre regiões distantes. [E] dessa forma, o feudo tinha de ser praticamente autossuficiente, produzindo quase tudo de que precisava (FIGUEIRA, 2005, p. 72).

No início do período medieval, os feudos garantiram a segurança necessária para um marcante crescimento populacional. E com a expansão das cidades, a produção artesanal e o comércio também se intensificaram. Porém, no século XIV, diversas crises que se abatiam sobre essa organização social encontraram o seu clímax.

A produção de alimentos sempre foi deficiente no sistema feudal, de modo que a fome era uma ameaça constante. Entre 1315 e 1317, a situação se agravou e provocou surtos de fome em vários lugares da Europa. A falta de estrutura [sanitária] das cidades para suportar o aumento populacional, associada ao problema da fome, acabou facilitando a propagação de uma série de epidemias. A pior de todas foi a chamada *peste negra*, que assolou a Europa entre 1348 e 1350 e matou cerca de um terço de toda a população. [E, além disso,] inúmeras guerras⁵² também contribuíram para aumentar a mortandade e tornar a situação ainda mais difícil. A maior delas foi, sem dúvida, a Guerra dos Cem Anos (1337-1453), travada entre as monarquias da Inglaterra e da França (FIGUEIRA, 2005, p. 93, grifo do autor).

E, nesse cenário, os governos que conseguiam administrar melhor essa forte crise eram caracterizados por uma maior centralização política (o que facilitava a tomada de decisões). Logo, não demorou pra que a interferência e o poder dos reis sobre os feudos aumentassem e, com isso, surgissem os chamados Estados nacionais absolutistas⁵³ por toda a Europa.

⁵¹ Os feudos eram extensões de terra organizadas sob o domínio político e militar dos chamados “senhores feudais”. Mas, além das famílias dos senhores feudais, muitas outras pessoas se abrigavam nos feudos, assumindo o papel de súditos. Esses eram os servos – em geral, camponeses e artesãos. O sistema feudal se mantinha, então, com base num “pacto” entre os senhores feudais e os seus servos. Enquanto os senhores garantiam a segurança e ofereciam terras para a subsistência dos seus servos, esses deveriam jurar fidelidade, pagar impostos (compulsoriamente) e entregar parte de suas produções aos seus senhores. No entanto, “a fim de obter [mais] proteção, os senhores feudais geralmente procuravam por outro senhor mais poderoso, jurando-lhe fidelidade e obediência. Chamava-se *vassallo*, o senhor feudal que pedia proteção a outro. [E] essa aliança deveria ser consolidada pelo senhor mais poderoso, o *suserano*” (FIGUEIRA, 2005, p. 70, grifo do autor).

⁵² A Idade Média também foi marcada pelas *cruzadas*, que foram cerca de nove expedições militares, do século XI ao XIII, incentivadas pela Igreja Católica rumo à Palestina (região da chamada “Terra Prometida” dos judeus); onde a finalidade era ocupá-la e mantê-la sob o domínio dos cristãos (GASPARETTO JÚNIOR, 2023).

⁵³ O absolutismo é o modelo político caracterizado pela centralização do poder nas mãos do rei, o monarca. E, para muitos pensadores do início da Idade Moderna, esse poder tinha origem divina, tendo sido dado, sobretudo, por Deus (FIGUEIRA, 2005).

Assim, marcado pela condenação do feudalismo, o período medieval – que vigorou até o ano de 1453 d.C.⁵⁴ – deu lugar à Idade Moderna. E, aqui, vale frisar que, durante toda a era medieval, prevaleceu a hegemonia da cosmologia aristotélica, tendo sido fortemente assimilada pela Igreja nesse longo período.

Já na segunda metade do século XV, com a formação dos Estados modernos, houve uma retomada do progresso europeu. O comércio de grande escala (entre nações), impulsionou a ocorrência das “grandes navegações”, estabelecendo o início do sistema capitalista mercantil. E com a intensificação das relações comerciais, a reassunção do crescimento das cidades e o fortalecimento da burguesia (classe que surgiu no final da Idade Média), novos ideais se pulverizaram por toda a Europa, caracterizando o movimento cultural que ficaria conhecido como Renascimento⁵⁵ – importantíssimo para o avanço de diversos campos da filosofia, da arte e das ciências (FIGUEIRA, 2005).

Nesse novo contexto, quando as pesquisas astronômicas se tornaram fundamentais para as navegações de longo alcance, Nicolau Copérnico (1473-1543) proferiu um dos primeiros golpes contra o modelo aristotélico. Em 1514, Copérnico declarou que a Terra não é o centro do *kósmos*, e sim o Sol – inaugurando uma cosmologia heliocêntrica (PINHEIRO, COSTA, MOREIRA, 2011; REPCHECK, 2011). E a essa revolução copernicana, em seguida, Tycho Brahe (1546-1601) e Galileu Galilei (1564-1642) acrescentaram observações de que o céu não era imutável como Aristóteles havia postulado (PINHEIRO, COSTA, MOREIRA, 2011). Por fim, todas essas evidências anti-aristotélicas no campo da astronomia só reforçaram a urgência de outra forma de conceber o universo.

Galileu, por exemplo, defendia que essa “nova ciência” deveria estar ancorada em três princípios.

O primeiro princípio do método galileano é a *observação* dos fenômenos, tais como eles ocorrem, sem que o cientista se deixe perturbar por preceitos extra-científicos, de natureza religiosa ou filosófica. [...] O segundo princípio [...] consiste na *experimentação*. Segundo esse princípio, nenhuma afirmação sobre fenômenos naturais, que se pretenda científica, pode prescindir da verificação de sua legitimidade através da produção do fenômeno em determinadas circunstâncias. [...] O terceiro e último princípio da metodologia galileana estabelece que o correto conhecimento da natureza exige que se descubra sua *regularidade matemática*. Foi o

⁵⁴ Na historiografia, o que demarca o fim da Idade Média em 1453 d.C. é a queda do Império Romano do Oriente (que, com o tempo e as transformações culturais, ficou conhecido como Império Bizantino). Nesse ano, a capital do império, Constantinopla, foi tomada pelos turcos otomanos.

⁵⁵ Pode-se afirmar que o Renascimento se estendeu do século XIV ao XVI, tendo três grandes ideais: o antropocentrismo, o humanismo e o racionalismo. Onde uma escalada desses valores fundamentou, no século XVIII, outro movimento intelectual, conhecido como *iluminismo*, que veio questionar os poderes dos monarcas absolutistas (FIGUEIRA, 2005; OLEQUES, 2023).

que Galileu fez, por exemplo, ao revelar que a velocidade adquirida por um corpo que cai livremente, a partir do repouso, é proporcional ao tempo e que o espaço percorrido é proporcional ao quadrado do tempo empregado em percorrê-lo (PESSANHA, 1996, p. 7-8, grifo nosso).

Francis Bacon (1561-1626) também foi um ferrenho defensor do protagonismo da observação e da experimentação no labor científico. Para ele, o cientista deveria “trocar os livros pela natureza, a biblioteca pelo laboratório, acreditando que o homem deva desvencilhar-se da metafísica escolástica e voltar-se para os eventos da natureza”⁵⁶ (ZATERKA, 2012, p. 683). O que, de acordo com sua obra intitulada *Novum Organum*, também demandaria uma revolução na maneira de se raciocinar sobre os conteúdos da ciência. A ciência deveria substituir o pensamento lógico dedutivo (onde conclusões particulares são obtidas a partir de premissas generalistas) pelo indutivo, que consiste em formular conclusões gerais a partir de uma série de observações específicas (ANDRADE, 1984).

E é nessa conjuntura renascentista que, depois de um esquecimento milenar, as ideias atomistas retornaram de modo alternativo à cosmologia aristotélica. Em 1417, Poggio Bracciolini (1380-1459) redescobriu um manuscrito do poeta e filósofo romano Tito Lucrécio (99 a.C.-55 a.C.) denominado *De Rerum Natura*. O poema retratava todo o pensamento atomista de Leucipo até Epicuro (PORTO, 2013; ROCHA, 2006). E com a popularização da prensa móvel, inventada por Johann Gutenberg (1397-1468) em 1439, aos poucos o atomismo tomou as universidades e foi incorporado à nova ciência (PEDUZZI, 2008).

No século XVII, um importante partidário do atomismo foi o filósofo, matemático, astrônomo e padre católico Pierre Gassendi (1592-1655). Gassendi tinha uma forte convicção de que a teoria atômica era “uma filosofia mais verdadeira” do que as suas adversárias (ROVARIS, 2007, p. 19). Isso porque, apesar dos átomos – dada a pequenez – não estarem diretamente disponíveis aos sentidos humanos, eles, ainda assim, evidenciavam as suas existências a partir dos seus efeitos. Para Gassendi, os “átomos existem como os poros da pele”, cuja existência se confirma pela experiência da transpiração⁵⁷ (ROVARIS, 2007, p. 116).

⁵⁶ A fim de romper com a hegemonia aristotélica e com o dogmatismo acadêmico, Bacon incentivou a criação das sociedades científicas, tendo colaborado com a criação da Royal Society em 1660 (PEDUZZI, 2008).

⁵⁷ Da mesma maneira que Demócrito explicava as propriedades e as transformações dos materiais a partir das estruturas e das dinâmicas dos aglomerados atômicos, Gassendi conectou o macroscópico à sua constituição submicroscópica.

Contudo, apesar dessas provas “empíricas”, o atomismo ainda carecia de reformulações que o tornassem tragável à tradição cristã. Essa tarefa também foi assumida por Gassendi.

Gassendi empreendeu, então, uma tentativa de conciliar a doutrina atomística com o Cristianismo, eliminando da primeira, aspectos que conflitavam fundamentalmente com a religião cristã. Assim, em sua versão, os átomos não eram eternos [como Leucipo e Demócrito postularam], mas foram criados por Deus e, um dia, serão aniquilados por Ele. [...] [E, com isso], em sua busca de conciliação, Gassendi se afastou do mecanicismo estrito da doutrina original. Para ele, o movimento e as colisões dos átomos não obedecem a uma aleatoriedade cega, mas são controlados por uma permanente intervenção Divina (PORTO, 2013, p. 6).

Dessa forma, as teses de Gassendi, apesar de preservarem – em boa medida – um caráter especulativo e dogmático, foram fundamentais para o estabelecimento da teoria atômica nos debates da ciência moderna. Onde outra grande contribuição desse pensador foi a primeira distinção entre os conceitos de “átomo” e “molécula”⁵⁸.

Em 1647, [Gassendi] foi o primeiro cientista a apresentar a distinção entre átomos e moléculas. Segundo Gassendi, os átomos seriam uma parte real, invisível e indivisível da matéria, que reunidos em pequenos grupos [ou aglomerados] receberiam a denominação de **moléculas** (PINHEIRO, COSTA, MOREIRA, 2011, p. 15-16, grifo nosso).

Assim, finalmente, restara apenas um (respeitável) obstáculo à aceitação das ideias atomistas pela comunidade científica desse tempo: o vazio. Aristóteles, ao longo de suas obras, registrou argumentos categóricos contra a sua existência. E, mesmo que a cosmologia aristotélica viesse, há séculos, sofrendo profundos abalos, a incerteza quanto à existência do vazio permanecia. Porém, algum nível de aceitação do vazio veio a partir das primeiras descobertas da física dos fluidos – ainda no século XVII. E por menor que tenha sido essa aceitação (uma vez que o dilema sobre o vazio permaneceu até o século XX⁵⁹), ela já foi suficiente para a evolução das ideias sobre as interações intermoleculares, como veremos.

2.2.2. A mescla entre a teoria atômica e a física dos fluidos nos séculos XVI e XVII

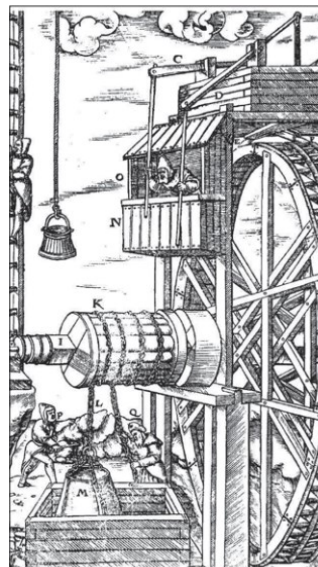
⁵⁸ De acordo com o Dicionário Etimológico (2023), a palavra “molécula” deriva da aglutinação de duas palavras do latim, “moles” e “culum”, significando “massa pequena”.

⁵⁹ Segundo Pietrocola (2002), o “problema do vazio” perdurou até o início do século XX. A existência do vazio só foi aceita cabalmente em 1905, a partir dos trabalhos de Einstein envolvendo a óptica e a eletrodinâmica. Esses trabalhos descartaram de vez, a ideia aristotélica de um éter que preenche todo o espaço.

Ao longo da história, observa-se que períodos com grandes mudanças sociais sempre estiveram acompanhados do desenvolvimento de novas tecnologias e, muitas vezes, de avanços científicos. É o caso da evolução das máquinas de fluidos (Figura 15) e do florescimento desse ramo da física nas eras medieval e moderna. As mudanças demográficas vivenciadas nesses períodos, somadas aos interesses das grandes navegações, foram importantes forças motrizes.

Durante a Idade Média, a aplicação de máquinas de fluidos expandiu-se lenta, mas firmemente. Bombas de pistão elegantes foram desenvolvidas para desaguamento de minas, e o moinho de água e o moinho de vento foram aperfeiçoados para moer grãos, forjar metais e para outras tarefas. Pela primeira vez na história humana registrada, um trabalho significativo estava sendo feito sem a força [direta] de um músculo fornecido por uma pessoa ou animal, e essas invenções são geralmente creditadas por possibilitar a revolução industrial posterior. Novamente, os criadores da maior parte do progresso são desconhecidos, mas os próprios dispositivos foram bem documentados por vários escritores técnicos, como Georgius Agricola [...]. A Renascença trouxe o desenvolvimento contínuo de sistemas e máquinas de fluidos, e o mais importante: o método científico foi aperfeiçoado e adotado em toda a Europa⁶⁰ (ÇENGEL, CIMBALA, 2014, p. 6, tradução nossa).

Figura 15 - Uma talha de mina movida por uma roda d'água reversível, uma ilustração de Georgius Agricola (1494-1555)

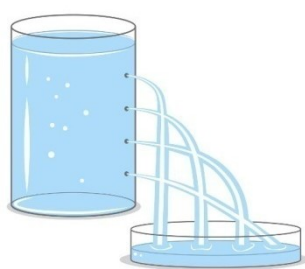


Fonte: ÇENGEL, CIMBALA, 2014, p. 6

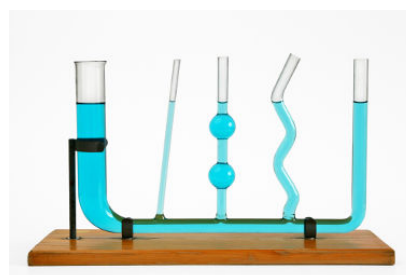
⁶⁰ O texto em língua estrangeira é: “During the Middle Ages, the application of fluid machinery slowly but steadily expanded. Elegant piston pumps were developed for dewatering mines, and the watermill and windmill were perfected to grind grain, forge metal, and for other tasks. For the first time in recorded human history, significant work was being done without the power of a muscle supplied by a person or animal, and these inventions are generally credited with enabling the later industrial revolution. Again the creators of most of the progress are unknown, but the devices themselves were well documented by several technical writers such as Georgius Agricola [...]. The Renaissance brought continued development of fluid systems and machines, but more importantly, the scientific method was perfected and adopted throughout Europe”.

No século XVI, Simon Stevin (1548-1620) demonstrou experimentalmente que a pressão de um fluido aumenta com a profundidade⁶¹ – o que explica não só os arcos que os fluidos formam ao serem projetados através dos orifícios de um recipiente (Figura 16a), como também o funcionamento dos vasos comunicantes (Figura 16b).

Figura 16 – Alguns fenômenos explicados pela pressão hidrostática: (a) A projeção dos fluidos de um recipiente perfurado e (b) o funcionamento dos vasos comunicantes



(a)



(b)

Fontes: HELERBROCK, 2023; SILVA JÚNIOR, 2023

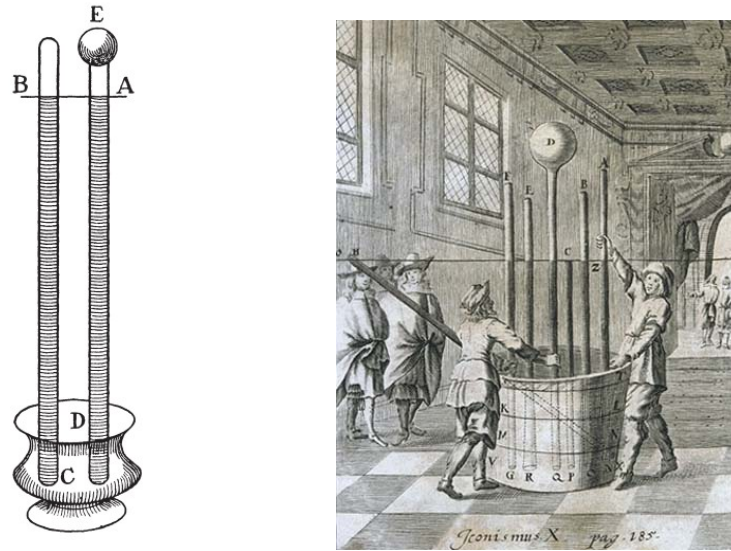
No XVII, Blaise Pascal (1623-1662) publicou o seu importante teorema, que diz que “um incremento de pressão comunicado a um ponto qualquer de um líquido incompressível em equilíbrio *transmite-se integralmente* a todos os demais pontos do líquido, bem como às paredes do recipiente” (DOCA, BISCUOLA, BÔAS, 2010, p. 394, grifo do autor). Teorema que explica o funcionamento de diversas máquinas, como as seringas e as prensas hidráulicas.

E Galileu se dedicou à resolução de problemas urbanos relacionados ao transporte de água para elevadas altitudes. Onde tais problemas de engenharia despertaram o interesse de um dos discípulos de Galileu, Evangelista Torricelli (1608-1647), que trouxe singulares contribuições à física (WEST, 2013). Estudando a elevação de fluidos em ductos (tubos), Torricelli desenvolveu o primeiro barômetro⁶² – instrumento utilizado para medir a pressão atmosférica (Figura 17).

⁶¹ A pressão de um fluido (p), também conhecida como *pressão hidrostática*, pode ser definida por: $p = \rho \cdot g \cdot h$, onde ρ é a densidade do fluido, g é a gravidade local e h é a altura/profundidade com relação à sua superfície. Essa expressão concatena todo o enunciado do *teorema de Stevin* (DOCA, BISCUOLA, BÔAS, 2010).

⁶² Não confundir com o *manômetro*, instrumento utilizado para medir a pressão de fluidos confinados em recipientes fechados.

Figura 17 – Barômetros de Torricelli (1608-1647)



Fonte: INSTITUTE AND MUSEUM OF HISTORY OF SCIENCE, 2023c; WEST, 2013

Em 1644, ele tomou um tubo estreito de, aproximadamente, 1 metro de comprimento e o preencheu com mercúrio (Hg). Em seguida, tampou a boca do tubo. E então, cuidadosamente, o colocou de boca para baixo em outro recipiente, previamente preenchido com o mesmo líquido. Assim, mantendo o tubo em equilíbrio na vertical, o destampou; e encontrou, mesmo após diversas repetições, o mesmo resultado: O mercúrio presente no tubo não escoava completamente no recipiente. Isto é: O tubo sempre preservava uma coluna de mercúrio acima da superfície, com uma média de 760 milímetros de comprimento. E foi a partir dessa observação que Torricelli fez conclusões poderosas, como relata Peduzzi (2008) e West (2013):

1. A preservação de uma coluna de mercúrio no interior do tubo, sobre a superfície do próprio líquido, só seria possível porque “o ar tem peso” e, consequentemente, porque a atmosfera exerce uma pressão própria;

Em 11 de junho de 1644, Evangelista Torricelli [...] escreveu uma carta notável a seu amigo Michelangelo Ricci [1619-1682], que era matemático e também cardeal em Roma. [...] A carta continha a maravilhosa declaração: “Vivemos submersos no fundo de um oceano do elemento ar, que por experimentos inquestionáveis é conhecido por ter peso”⁶³ (WEST, 2013, p. 66, tradução nossa).

⁶³ O texto em língua estrangeira é: “On June 11, 1644, Evangelista Torricelli (1608 – 1647) [...] wrote a remarkable letter to his friend Michelangelo Ricci, who was a mathematician and also a cardinal in Rome. [...] The letter contained the wonderful statement, “We live submerged at the bottom of an ocean of the element air, which by unquestioned experiments is known to have weight””.

2. Essa pressão atmosférica, no nível do mar e numa temperatura de 0 °C (aproximadamente 273,15 K), seria equivalente a 760 mm de Hg;
3. E como, a princípio, o tubo estava completamente preenchido por mercúrio e, em seguida, quando o tubo foi invertido, esse fluido escoou parcialmente, não teria restado nada⁶⁴ na parte interior e superior do tubo. Tinha-se, então, uma prova convincente do *vazio*.

De acordo com West (2013), “a experiência de Torricelli teve um impacto enorme na comunidade científica, não apenas na Itália [a terra natal desse cientista], mas em toda a Europa”⁶⁵ (p. 72, tradução nossa). Assim, dando seguimento ao experimento de Torricelli, Blaise Pascal, em 1648, comprovou a diminuição da pressão atmosférica com a altitude. E, por volta de 1654, Otto von Guericke (1602-1686) desenvolveu a primeira bomba de vácuo (PEDUZZI, 2008; WEST, 2013).

As descobertas de Torricelli e von Guericke a respeito do *vazio* ocorreram na mesma época que Gassendi buscava atualizar e divulgar o atomismo. Logo, dando ao atomismo as provas factualmente empíricas – sobre a existência do *vazio* – das quais ele tanto necessitava, não restara mais dúvidas a Gassendi “de que os átomos e o *vazio* [...] estão na raiz de todas as explicações científicas” (PEDUZZI, 2008, p. 28). Então, nessas circunstâncias, a física dos fluidos se mesclou de vez à teoria atômica.

E, nesse estágio do século XVII, é preciso comentar sobre outro expoente: Robert Boyle (1627-1691), um filósofo, físico e químico irlandês. Como um fiel sectário dos pensamentos de Galileu e Bacon, Boyle desejava dar toda primazia à observação e à experimentação em seu trabalho científico (PINHEIRO, COSTA, MOREIRA, 2011; ROCHA, 2006). Segundo Zaterka (2012), seu objetivo era defender uma concepção de “filosofia *a posteriori*, experimental e operativa” (p. 707).

Nas palavras do próprio cientista:

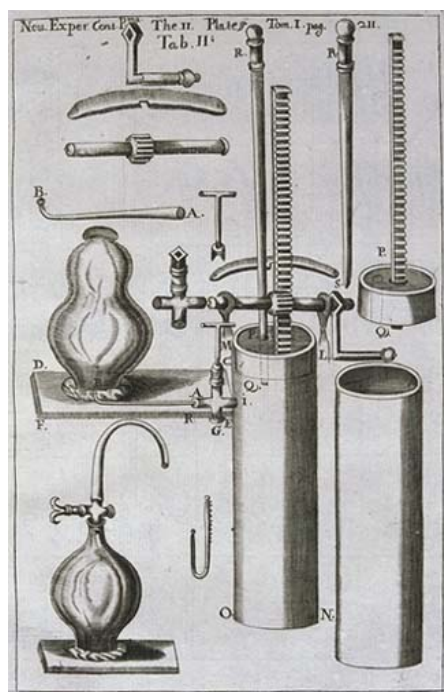
“[...] Não era meu principal desígnio estabelecer teorias e princípios, mas projetar experimentos e enriquecer a história da natureza com observações feitas e apresentadas de maneira fidedigna, para que, por meio dessas contribuições e outras semelhantes feitas por outros, os homens possam com o tempo ser providos de um estoque suficiente de experimentos sobre os quais fundar hipóteses” (BOYLE, 16--apud ZATERKA, 2012, p. 707).

⁶⁴ Aqui, obviamente, desconsiderou-se o vapor do próprio mercúrio, cuja pressão seria desprezível.

⁶⁵ O texto em língua estrangeira é: “Torricelli’s experiment had an enormous effect on the scientific community, not only in Italy but throughout Europe”.

Em razão disso, ao longo de sua extensa obra, Boyle registrou a criação e o aperfeiçoamento de inúmeros experimentos para a física e a química; onde, de acordo com Rocha (2006), também havia a intenção de ilustrar e testar as teorias de seus contemporâneos. Boyle aprimorou a bomba de vácuo de von Guericke (Figura 18a) (INSTITUTE AND MUSEUM OF HISTORY OF SCIENCE, 2023a, 2023b). E, a partir de modificações no barômetro de Torricelli, desenvolveu o seu famoso tubo em “J” (Figura 18b) (ATKINS, JONES, 2012; INSTITUTE AND MUSEUM OF HISTORY OF SCIENCE, 2023b).

Figura 18 – Algumas aparelhagens experimentais aprimoradas por Robert Boyle (1627-1691): (a) Itens de sua bomba de vácuo e (b) seu tubo em “J”



(a)



(b)

Fontes: INSTITUTE AND MUSEUM OF HISTORY OF SCIENCE, 2023b; SOARES, 2021

No tubo em “J”, apenas uma das extremidades é aberta. Assim, quando mercúrio é adicionado no interior do tubo, uma quantidade de ar fica aprisionada na outra extremidade. Foi quando Boyle notou que, quanto mais mercúrio era adicionado, mais o gás confinado era comprimido. E, além disso, orientado pela ideia galileana de que os fenômenos da natureza deveriam ser destrinchados em leis matematicamente formalizadas, notou que havia uma relação inversamente proporcional entre a pressão e o volume do gás a temperatura constante. Pois, ao adicionar o dobro de mercúrio no tubo (o que corresponde ao dobro de pressão sobre

o gás), o volume do gás se reduzia à metade (SOARES, 2021). Estava elucidada, a conhecida *lei de Boyle*:

$$P.V = k \quad (\text{Equação 4})$$

Em que P é a pressão exercida sobre o gás, V é o seu volume e k é uma constante.

Boyle percebeu que a teoria dos elementos de Aristóteles e a teoria dos três princípios de Paracelso⁶⁶ [1493-1541] não eram capazes de dar uma explicação satisfatória às experiências do seu tempo. Para Boyle, nem os quatro elementos (terra, água, fogo e ar), nem os três princípios (enxofre, mercúrio e sal) eram produtos de uma verdadeira análise (ROCHA, 2006, p. 53).

Então, dada a popularidade de Gassendi à época, Boyle se aproximou das ideias atomistas⁶⁷. E buscando na teoria atômica, a causa para a relação entre a pressão e o volume dos gases, Boyle formulou duas hipóteses antagônicas (PEDUZZI, 2008).

Na primeira, os gases deveriam ser concebidos como um amontoado de partículas (átomos ou moléculas⁶⁸) estáticas e em permanente contato umas com as outras. Essas partículas teriam a forma de “molas”, o que explicaria o fato dos gases reduzirem seus volumes conforme o aumento de pressão. Na segunda hipótese, os gases seriam interpretados como um conjunto de partículas em constante e intenso movimento e, portanto, consideravelmente espaçadas entre si, onde a pressão do gás resultaria das múltiplas colisões de suas partículas contra as paredes do recipiente.

Porém, embora a primeira hipótese possua um cunho mais realista, foi descartada, uma vez que “entre os dois modelos, o estático não explica a propriedade de expansão dos gases, pois é difícil admitir que as dimensões das partículas ou “átomos-mola” constituidoras do gás possam crescer indefinidamente” (PEDUZZI, 2008, p. 29). Com isso, a segunda hipótese – que se assemelha à antiga ideia do “turbilhão de átomos” – logo se mostrou proveitosa para explicar diferentes fenômenos físicos (como as transformações dos estados da matéria) e as reações químicas.

⁶⁶ Philippus Aureolus T. B. von Hohenheim, cujo pseudônimo era Paracelso, era um filósofo, teólogo, médico e alquimista suíço.

⁶⁷ Os trabalhos da autoria de Boyle que mais esclarecem o seu pensamento atomista são o livro *The Sceptical Chemist* (O químico cético) (1661) e o ensaio *The Origins of Forms and Qualities* (As Origens das Formas e Qualidades) (1666); nos quais, de acordo com Rocha (2006), ele levou a teoria atômica de Gassendi “do domínio filosófico para o domínio dos dados experimentais da química” (p. 53).

⁶⁸ Constable e Housecroft (2020) afirmam que Boyle “foi *um dos primeiros* a adotar o termo “molécula” para descrever um conjunto de átomos ou corpúsculos” (p. 9, grifo nosso). Muito provavelmente, uma herança de Pierre Gassendi.

De acordo com Peduzzi (2008), as transformações dos estados físicos da matéria seriam explicados, segundo a filosofia natural de Boyle, pelo aumento ou pela diminuição do grau de agitação das partículas constituintes. Empregando a água como exemplo, ele diz que

considerar a evaporação ou a ebulição da água como resultado de um processo do qual se desprendem do líquido, pequenas partículas, não parece ser uma hipótese descabida. O vapor resultante da ebulição, por exemplo, mostra semelhanças com o ar. [E] sendo o ar composto por átomos, é lícito supor que o vapor d'água também o seja, assim como o líquido do qual se originaram essas partículas. E se a água é composta por átomos, sua forma sólida, o gelo, também deverá ser, situando-se as diferenças existentes entre os três estados *na maior ou menor liberdade de movimento de seus constituintes* (p. 29, grifo nosso).

E as reações químicas se dariam pela “correspondência mecânica entre as formas e tamanhos das unidades de uma substância e os espaços porosos de outra, por onde as primeiras se movimentam e onde se encaixam” (PORTO, 2013, p. 7).

Ou seja, concepções muito similares acerca das interações intermoleculares se preservaram desde Leucipo e Demócrito, no século V a.C., até o cabo do século XVII. A colisão, o encaixe e o entrelaçamento entre as partículas da matéria eram usados na explicação de diversas propriedades e diferentes fenômenos. Por exemplo...

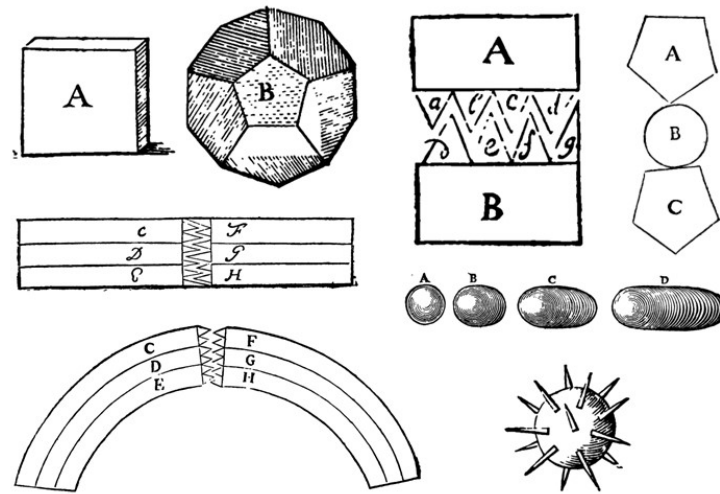
Em 1675, Nicolas Lemery (1645-1715), em seu livro *Cours de Chimie* (Curso de Química), propôs uma distinção entre ácidos e bases a partir das supostas formas dos seus constituintes. Formas que, inclusive, justificariam a ocorrência de reações efervescentes⁶⁹.

[...] As partículas dos ácidos possuíam protuberâncias pontiagudas, conforme se podia constatar pela sensação de picada na língua ao se provar um ácido; as partículas dos álcalis, duras e quebradiças, possuíam poros. Quando os dois tipos de partículas se encontravam, as protuberâncias penetravam os poros. O acoplamento restringia os movimentos das partículas do ácido que, na tentativa de escapar, quebravam suas protuberâncias nas partículas do álcali. Tão forte rompimento produzia a efervescência da reação, que se completava quando todas as protuberâncias eram quebradas e todos os poros preenchidos (LIMA, SILVA, 2020, p. 166).

Explicações semelhantes foram dadas por Nicolas Hartsoeker (1656-1725) em 1696, em seu livro intitulado *Principes de Physique* (Princípios de Física), para elucidar o comportamento de objetos refratários, a dureza e a maleabilidade de certos materiais; a coesão entre as partículas da matéria, e a formação de amálgamas (HARTSOEKER, 1696). Vide a Figura 19.

⁶⁹ Como se dá, por exemplo, entre o ácido clorídrico (HCl) e o carbonato de cálcio (CaCO₃). Vide equação: $2 \text{HCl}_{(aq)} + \text{CaCO}_{3(s)} \rightarrow \text{CaCl}_{2(aq)} + \text{H}_2\text{O}_{(l)} + \text{CO}_{2(g)}$.

Figura 19 – Algumas formas atribuídas aos átomos por Nicolas Hartsoeker (1656-1725) para explicar algumas propriedades e transformações da matéria



Fonte: HARTSOEKER, 1696

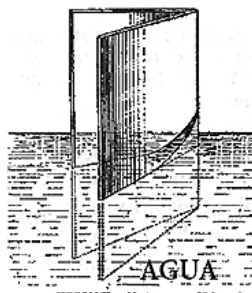
Assim, com a apresentação dos primórdios do relacionamento entre a teoria atômica e a física dos fluidos, é possível seguir com a história das pesquisas sobre um fenômeno que sela essa união: a *capilaridade*.

2.2.3. Os estudos sobre a capilaridade do século XVII ao XIX

De acordo com Cardoso (2023), a capilaridade é “a tendência que algumas substâncias apresentam de subirem ou descerem por paredes de tubos finos (tubos capilares) ou de se deslocar por curtos espaços existentes em materiais porosos, como tecidos de algodão ou esponjas”. A palavra “capilar”, na denominação do fenômeno, remonta ao século XVII. Os vidreiros chamavam de “capilares”, os tubos que haviam sido estirados a tal ponto que seus diâmetros internos pouco excediam ao de um fio de cabelo (MILLINGTON, 1945).

O primeiro relato sobre a capilaridade rememora os tempos da renascença, no início da Era Moderna, e é atribuído a Leonardo da Vinci (1452-1519), que observou a ascensão de um líquido em uma tira de pano (MILLINGTON, 1945; SCHNEIDER, 2021). Décadas depois, William Gilbert (1544-1603) e Niccolo Cabeo (1586-1650) registraram a ação capilar entre objetos flutuantes leves, como pode ser visto na Figura 20 (MILLINGTON, 1945).

Figura 20 – Ascensão capilar da água entre lâminas de vidro muito próximas



Fonte: SAPIENSMAN, 2023

Porém, foi somente a partir do século XVII que o estudo da capilaridade se tornou a grande aposta para a elucidação da coesão na matéria e, conseqüentemente, dos processos que ocorrem entre as entidades moleculares.

2.2.3.1. *Século XVII*

No campo dos estudos sobre a capilaridade, o século XVII começou com uma declaração importante de Niccolo Aggiunti (1600-1635), um matemático italiano. Observando a assimilação do “quilo”⁷⁰ no processo digestivo dos animais, ele afirmou:

"Erro dos médicos em dizer que a parte a ser nutrida atrai o alimento, sendo o contrário, que o alimento sobe para nutrir ou, pelo menos, ele conspira e se inclina a subir e se dissolver, porque os juncos pendem tanto em uma fenda estreita quanto no vidro", isto é, "o médico se engana ao dizer que a parte a ser nutrida atrai o alimento, sendo o inverso o que ocorre, ou seja, que o próprio alimento procura nutrir a parte ou, pelo menos, tende a subir e proceder para fora e se dissolver, porque sobe em um canal estreito como no vidro"⁷¹ (MILLINGTON, 1945, p. 256, tradução nossa).

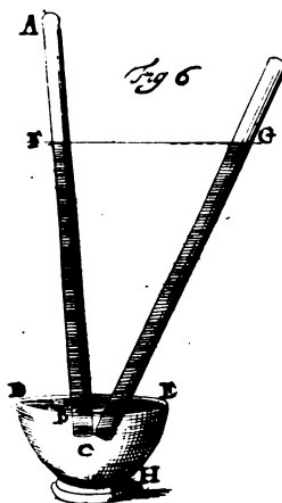
⁷⁰ “Durante a digestão, o alimento passa por transformações e é misturado a diversas substâncias. O quimo e o *quilo* são produtos dessas mudanças que ocorreram no alimento desde o início de sua digestão. [...] Quando o bolo alimentar chega ao estômago, ele sofrerá a ação do suco gástrico, uma substância rica em ácido clorídrico. [...] Após a ação de todas essas substâncias [do suco gástrico], o bolo alimentar transforma-se em uma massa semilíquida, branca e ácida: o quimo. [...] O quimo vai chegar ao intestino delgado, onde a digestão irá continuar. [...] O quimo é misturado ao suco entérico [...]. Além disso, [...] sofre ação de substâncias produzidas por duas glândulas anexas: o suco pancreático e a bile. [...] Após todas as transformações sofridas no intestino, o quimo passa a se chamar *quilo*, uma substância branca” (SANTOS, 2023, grifo nosso).

⁷¹ O texto em língua estrangeira é: “‘Errore de' medici nel dire, che la parte da nutrirsi attraga essa il nutrimento, essendo l'opposito, che il nutrimento sale lui a nutrire, o per almeno conspira, & inclina a salire, e dissondersi, perchè tanto ascende in un angusto meato il canne, quanto di vetro”, i. e., “The doctor is mistaken in saying the part to be nourished attracts the food, the reverse being the case, namely that the food itself seeks to nourish the

Essa declaração, além de sinalizar a ocorrência da capilaridade em sistemas biológicos – ou seja, em seres vivos –, frisou que a causa desse fenômeno é intrínseca aos fluidos. E, posteriormente, com popularização dos ideais empiristas de Galileu e Bacon, uma série de evidências experimentais se amontoou.

Embora os seus resultados só tenham sido publicados em 1670, Giovanni Alfonso Borelli (1608-1679) identificou, em 1638, que “a ascensão da água em um tubo capilar é inversamente proporcional ao raio interno [do tubo], que a água sobe até a mesma altura medida verticalmente quando um tubo capilar é inclinado [Figura 21], [...] [e que] a subida é mais rápida em um tubo previamente molhado”⁷² (MILLINGTON, 1945, p. 257, tradução nossa).

Figura 21 – Observação de Borelli (1608-1679) sobre o efeito da inclinação do tubo capilar na altura da coluna de água em seu interior



Fonte: BORELLI, 1670.

Jacques Rohault (1618-1672) descobriu que, em tubos curvos invertidos (sifões ao avesso), quando um dos lados do tubo detinha um diâmetro pequeno – como de um capilar –, a altura do líquido era maior no lado mais estreito; um “fato desconhecido por Pascal em seus

part, or at least tends to rise and to proceed outwards and dissolve because it rises in a narrow channel as in glass”.

⁷² O texto em língua estrangeira é: “[...] the rise of water in a capillary tube is inversely proportional to the internal radius, that the water rises to the same height measured vertically when a capillary tube is inclined, [...] that the rise is more rapid in a tube previously wetted”.

estudos sobre pressão hidrostática”⁷³ (MILLINGTON, 1945, p. 257, tradução nossa). Essa observação também ocorre em vasos comunicantes com “braços” em dimensões capilares (vide a Figura 22⁷⁴).

Figura 22 – Vasos comunicantes com alguns dos “braços” em dimensões capilares



Fontes: NORMAS ABNT, 2022

Porém, com a descoberta da pressão atmosférica por Torricelli em 1644, Rohault explicou sua observação de maneira apressada – e, num comparativo com a ciência atual, errônea. Ele assumiu que a pressão atmosférica seria menor no interior dos tubos capilares, o que também justificaria, em sua visão, os *meniscos* (as superfícies curvas que os líquidos formam quando situados no interior de certos recipientes) (MILLINGTON, 1945).

Robert Boyle, como um grande cientista experimental, também reproduziu alguns dos experimentos sobre capilaridade correntes em sua época. No entanto,

obteve efeitos que não causaram sua surpresa; pois ele já havia notado fenômenos semelhantes ao usar tubos estreitos de barômetro, embora os tivesse descartado como casuais e não dignos de atenção. Ele repetiu não apenas os experimentos de Borelli, mas também o do sifão capilar⁷⁵ (MILLINGTON, 1945, p. 258, tradução nossa).

E quais foram as razões submicroscópicas (referentes à escala atômica) atribuídas à capilaridade no decorrer do século XVII?

⁷³ O texto em língua estrangeira é: “[...] a fact unknown to Pascal in his studies on hydrostatic pressure”.

⁷⁴ Recomenda-se a comparação entre a Figura 22 e a Figura 16b.

⁷⁵ O texto em língua estrangeira é: “[...] obtained effects that had not occasioned his surprise; for he had already noticed similar phenomena when using narrow barometer tubing, even though he had dismissed them as casual and not worth attention. He repeated not only Borelli's experiments, but also that of the capillary siphon”.

Para explicar a ascensão capilar da água, Giovanni Borelli (1608-1679) propôs que as partículas dessa substância deveriam possuir um formato octaédrico, sendo duras por dentro e, na superfície, revestidas por uma camada felpuda. Essa camada felpuda, entretanto, deveria possuir um comprimento razoável. Não tão grande a ponto de impedir o “rolamento” de uma partícula de água sobre a outra, mas nem tão pequena a ponto de inviabilizar a aderência das partículas de água às paredes sólidas – e supostamente ásperas – do tubo capilar (MILLINGTON, 1945).

Robert Hooke (1635-1703), por sua vez, enviesado pela ideia de “pressão reduzida” de Jacques Rohault, deu outra explicação. Para ele, a ascensão capilar era o resultado de um balanço de “congruências” e “incongruências” entre os materiais envolvidos no sistema. Ele definiu

congruência como sendo uma propriedade de um corpo fluido pela qual qualquer porção dele é prontamente unida ou misturada com qualquer outra porção, seja de si mesmo, ou de qualquer fluido homogêneo ou similar, ou corpo firme e sólido; e [...] *incongruência* [...] [como] uma propriedade de um fluido pela qual ele é mantido afastado e impedido de se unir ou se misturar com qualquer fluido heterogêneo ou dissimilar ou corpo sólido⁷⁶ (MILLINGTON, 1945, p. 261, grifo nosso, tradução nossa).

Assim, a incongruência entre o ar e o vidro seria tão maior do que a incongruência entre a água e o vidro que, no interior do tubo capilar, o ar se tornaria mais rarefeito (diminuindo a pressão) e a coluna de água ascenderia, tomando o lugar abandonado pelo ar (MILLINGTON, 1945).

Outras explicações, diferentes dessas, não ganharam muito destaque no século XVII.

2.2.3.2. Século XVIII

No século XVIII, o empirismo baconiano e o formalismo matemático de Galileu ainda reverberavam com veemência na Academia. Com isso, nas primeiras décadas deste século, muitas outras descobertas experimentais sobre a capilaridade foram publicadas.

⁷⁶ O texto em língua estrangeira é: “congruity to be a property of a fluid body, whereby any part of it is readily united or intermingled with any other part, either of itself, or any homogeneous or similar fluid, or firm and solid body : and [...] incongruity to be a property of a fluid by which it is kept off and hindered from uniting or mingling with any heterogeneous or dissimilar fluid or solid body ””.

Louis Carré (1663 – 1711) e Étienne-François Geoffroy (1672 – 1731), dois cientistas franceses, apuraram os cálculos que relacionavam a altura da ascensão capilar ao diâmetro do mesmo⁷⁷; e descartaram a hipótese de que a subida do líquido era fruto de uma pressão reduzida da atmosfera no capilar (MILLINGTON, 1947). Cientes da tese de Hooke sobre as incongruências (que afirmava que a ascensão de um líquido no capilar ocorreria em resposta à expulsão do ar), Carré e Geoffroy repetiram os experimentos de ascensão por inúmeras vezes, com capilares de diferentes diâmetros e com os seus topos ora abertos, ora fechados por tecidos de seda. Ao fecharem os topos dos capilares com tecido, os dois cientistas esperavam que a saída de ar fosse impedida ou, no mínimo, dificultada, gerando resultados distintos nas diversas repetições do experimento. Porém, perceberam que os resultados se mantinham inalterados, não restando dúvidas de que a hipótese da pressão reduzida de Rohault era falsa (MILLINGTON, 1947).

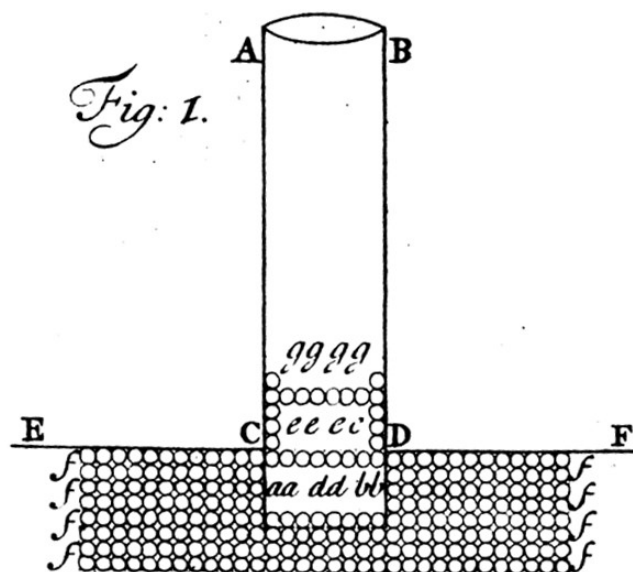
Finalmente, ele [Carré] realizou experimentos dos quais concluiu que a *adesão* era a única causa do fenômeno. Ele revestiu o interior de um tubo capilar com uma fina camada de sebo e constatou que a água agora parava de subir. Isso confirmou sua visão de que a ascensão não se devia a pressões desiguais. Uma gota d'água no final de um tubo limpo subia, mas não quando o tubo estava revestido por dentro com sebo⁷⁸ (MILLINGTON, 1947, p. 352-353, grifo nosso, tradução nossa).

Em seguida, Francis Hauksbee (1660-1713), um cientista inglês, repetiu esses experimentos em condições ainda mais diligentes (inclusive, com o emprego de bombas de vácuo) e encontrou os mesmos resultados. Também registrou a ascensão capilar da água entre placas de vidro planas, postas face a face com frações de milímetro de separação; observou que a elevação da coluna de água não depende da espessura do vidro do tubo ou da placa e, dentre outras descobertas, que a água é capaz de ascender em um capilar ainda que o tubo esteja preenchido com cinzas (MILLINGTON, 1947). Essas notas foram publicadas em seu livro intitulado *Physico-mechanical experiments on various subjects* (Experimentos físico-mecânicos sobre vários assuntos), de 1709, onde deixou claro que possuía uma interpretação atomista dos fenômenos da capilaridade (Figura 23).

⁷⁷ Como já foi dito, a observação de que a altura da ascensão capilar é inversamente proporcional ao diâmetro do tubo é atribuída a Giovanni Borelli (1608-1679), que identificou a relação em 1638, mas só a publicou em 1670.

⁷⁸ O texto em língua estrangeira é: “Finally, he performed experiments from which he concluded that adhesion was the sole cause of the phenomenon. He coated the interior of a capillary tube with a thin layer of tallow, and found that the water now ceased to rise. This confirmed his view that the rise was not due to unequal pressures. A drop of water at the end of a clean tube would rise, but not when the tube was coated inside with tallow”.

Figura 23 – Representação atomista de Francis Hauksbee (1660-1713) para a ascensão capilar da água



Fontes: HAUKSBEЕ, 1709

E esses singulares trabalhos de Hauksbee terminaram, por fim, chamando a atenção de outro grande cientista inglês: Isaac Newton (1643-1727), cuja obra é considerada o pináculo dos pensamentos de Galileu, Bacon, Gassendi e Boyle (PEDUZZI, 2008; PINHEIRO, COSTA, MOREIRA, 2011; PORTO, 2013; ROCHA, 2006).

Em 1687, Isaac Newton publicou a primeira edição de sua *magnum opus*, o livro *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (Princípios Matemáticos de Filosofia Natural)⁷⁹. Nesse livro, Newton estabeleceu três leis para o movimento dos corpos terrestres e celestes – sendo, portanto, o fundamento da mecânica clássica (NEWTON, 2018, p. 53-54):

LEI I: “*Todo corpo continua em seu estado de repouso ou de movimento uniforme em uma linha reta, a menos que ele seja forçado a mudar aquele estado por forças imprimidas sobre ele.*”

LEI II: “*A mudança de movimento é proporcional à força motora imprimida, e é produzida na direção da linha reta na qual aquela força é imprimida.*”⁸⁰

⁷⁹ O livro *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, de Newton, se divide em três partes. As partes I e II são chamadas de *De Motu Corporum* (Sobre o Movimento dos Corpos). E a parte III é chamada de *De Mundi Systemate* (Sobre o Sistema do Mundo) (NEWTON, 2018, 2020).

⁸⁰ De acordo com a segunda lei de Newton, a força (F) que atua sobre um corpo pode ser escrita como a derivada de seu momento linear (p) em relação ao tempo (t), onde, por momento linear, entende-se o produto de sua massa (m) pela sua velocidade (v). Isto é:

LEI III: “*A toda ação há sempre oposta uma reação igual ou, as ações mútuas de dois corpos um sobre o outro são sempre iguais e dirigidas a partes opostas.*”

E, quanto à natureza das forças que ocorrem entre os corpos celestes e os mantêm em suas órbitas – chamadas de “forças da gravidade” –, Newton (2020) descreveu que são “inversamente proporcionais aos quadrados das distâncias” (p. 195) e “proporcionais às quantidades de matéria [as massas] que eles [os corpos] contêm” (p. 200). E assim foi formalizada, a “lei da gravitação universal”:

$$F = G \cdot \frac{M \cdot m}{d^2} \quad (\text{Equação 5})$$

Em que F é a força de atração mútua entre dois corpos, M e m são suas massas, d é a distância entre os seus centros e G é uma constante – a *constante gravitacional*, que equivale a, aproximadamente, $6,67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$.

A obra de Newton representou, então, a culminância desse processo de transformação que deu origem à ciência moderna. Podemos citar como traços essenciais e inseparáveis dessa nova visão de mundo:

- A destruição do [...] *kósmos* aristotélico, rigidamente ordenado e metafisicamente hierarquizado, onde cada ser encontrava seu lugar segundo sua natureza;
- A geometrização do espaço, transformado de um espaço concreto, de partes (lugares) qualitativamente distintas, em um espaço abstrato, representável através de conceitos geométricos;
- A transformação do conceito de movimento, abandonando-se a abrangência da ideia aristotélica de mudança pela ideia restrita de deslocamento físico (PORTO, 2008, p. 8).

Newton instituiu, desse modo, um novo paradigma na ciência moderna. E com a (justa) fama do seu trabalho, não é de surpreender que, após a sua nomeação para a presidência da Royal Society em 1703, tenha permanecido no cargo por longos vinte e quatro anos, até 1727 – quando faleceu (NEWTON, 2017).

Nesse ínterim, precisamente de 1703 a 1713⁸¹, Newton teve bastante contato com Francis Hauksbee, que lhe deu um novo olhar para o fenômeno da capilaridade⁸². Muitos dos

$$F = \frac{dp}{dt} = \frac{d(m \cdot v)}{dt} = m \cdot \frac{dv}{dt} + v \cdot \frac{dm}{dt}$$

Como, na física newtoniana, a massa de um corpo é uma grandeza “absoluta” (que não se altera), $(dm/dt) = 0$. Logo, considerando que a aceleração (a) produzida sobre um corpo é igual a (dv/dt) , pode-se escrever que:

$$F = m \cdot a$$

⁸¹ Francis Hauksbee faleceu no ano de 1713.

experimentos de Hauksbee foram, inclusive, registrados por Newton em sua obra *Opticks* (Óptica), de 1704, na “questão 31” (NEWTON, 2017, p. 274-293). Onde, na abordagem da capilaridade, Newton expôs claramente a sua visão atomista sobre o mundo e propôs uma nova causa para a coesão nos materiais e para a adesão⁸³ entre eles.

Seguindo a tradição gassendiana, Newton considerou a possibilidade da existência dos átomos ao ponderar sobre o poder criativo de Deus. Com suas próprias palavras, ele disse:

[...] Parece-me provável que no princípio Deus formou a matéria em partículas sólidas, maciças, duras, impenetráveis, móveis, de tais tamanhos e formas, e com tais outras propriedades, e em tal proporção em relação ao espaço, como as que conduziram mais ao fim para o qual Ele as formou; e que essas partículas primitivas, sendo sólidas, são incomparavelmente mais duras do que quaisquer corpos porosos que delas se componham e mesmo tão duras a ponto de nunca se consumir ou partir-se em pedaços, pois nenhum poder ordinário é capaz de dividir o que o próprio Deus fez uno na primeira criação (NEWTON, 2017, p. 290).

Contudo, Newton não deu crédito às explicações sobre a coesão e a adesão dos materiais que se apropriavam do ajuste mecânico – o encaixe e o entrelaçamento – de suas partículas constituintes. Como defensor da existência de forças com ação à distância, ele replicou esse princípio. Dizendo ainda que a intensidade das forças de coesão deveria ser inversamente proporcional à distância entre as partículas componentes da matéria, e que essas forças – perceptíveis apenas a curtas distâncias – seriam as responsáveis pelas transformações químicas da matéria. Ele disse:

As partes de todos os corpos homogêneos duros que se tocam completamente uns aos outros se ligam muito fortemente. E, para explicar como isso ocorre, alguns inventaram átomos em forma de ganchos, que é incorrer em petição de princípio; e outros nos dizem que os corpos se colam pelo repouso (isto é, por uma qualidade oculta, ou melhor, por nada); e outros, que eles se ligam por movimentos solidários (isto é, por um repouso relativo entre eles mesmos). Eu, ao contrário, inferi de sua coesão que suas partículas se atraem por alguma *força* que no contato imediato é extremamente forte, a distâncias pequenas executa as operações químicas [...] e não vai muito além das partículas com algum efeito perceptível (NEWTON, 2017, p. 281, grifo nosso).

⁸² Antes de 1703, Newton já possuía concepções próprias acerca do fenômeno da capilaridade. “Já em 1664-6, Newton se interessava pelo fenômeno da capilaridade, mas durante mais de quarenta anos achou que eles não ocorriam no vácuo. [...] Por volta de 1673-5, Newton escreveu (mas não publicou) o trabalho *De Aere et Aethere* [Do Ar e Do Éter], onde discute, entre outras coisas, o fenômeno da capilaridade. Nesse trabalho, a explicação que Newton apresenta para esse fenômeno é a força repulsiva entre as partículas do ar, que faria com que a densidade do ar dentro dos tubos capilares abertos fosse menor do que ao ar livre e fora dos tubos [como havia defendido Rohault]. [Porém, foram as experiências realizadas por Francis Hauksbee na Royal Society que primeiro mostraram a Newton que esses fenômenos ocorrem da mesma maneira no vácuo]” (NEWTON, 2017, p. 283, grifo do autor).

⁸³ A ideia de adesão remonta aos trabalhos de Borelli e Louis Carré.

Essas forças seriam as responsáveis pela formação dos aglomerados atômicos – as moléculas – e, em seguida, pelas interações entre eles. Ele continua:

Ora, as menores partículas de matéria podem aderir umas as outras pelas atrações mais fortes e compor partículas maiores de virtude mais fraca; e muitas destas podem aderir umas as outras e compor partículas maiores cuja virtude é ainda mais fraca, e assim por diante, por muitas sucessões, até que a progressão termine nas partículas maiores, das quais dependem as operações em química, e as cores dos corpos naturais e que compõem corpos de uma magnitude perceptível pela coesão (NEWTON, 2017, p. 285).

E, como se não bastasse, Newton ainda foi além nas suas sugestões, dizendo que havia a possibilidade dessas forças de coesão possuírem uma natureza peculiar, própria – não necessariamente gravitacional, magnética ou elétrica⁸⁴.

Pois sabe-se que os corpos agem uns sobre os outros pelas ações da gravidade, do magnetismo e da eletricidade; e esses exemplos mostram o teor e o curso da natureza, e não tornam improvável que possa haver mais poderes atrativos além desses. Porque a natureza é muito consonante e conforme a si mesma. Não examino aqui o modo como essas atrações podem ser efetuadas. O que chamo de atração pode-se dar por impulso ou por algum outro meio que desconheço. Uso esta palavra aqui apenas para expressar qualquer força pela qual os corpos tendem um para o outro, seja qual for a causa. Pois devemos aprender, pelo exame dos fenômenos da natureza, quais corpos se atraem e quais são as leis e propriedades da atração, antes de investigar a causa pela qual a atração se efetua. As atrações da gravidade, do magnetismo e da eletricidade alcançam distâncias bem perceptíveis, e assim têm sido observadas pelos olhos comuns, podendo haver outras que alcançam distâncias tão pequenas que escaparam à observação até aqui (NEWTON, 2017, p. 274-275).

Dada a autoridade de Isaac Newton no meio científico do século XVIII, somente essas ponderações já foram suficientes para iniciar um novo programa de pesquisa no campo da capilaridade: a busca pela medição e pela compreensão da natureza das “forças intermoleculares”, responsáveis pela coesão dos materiais (MILLINGTON, 1947).

Todavia, é preciso salientar que, no decorrer do século, esses estudos sobre a capilaridade deixaram de ser do interesse dos grandes cientistas – aqueles que possuem maior reconhecimento e que, por consequência, recebem mais investimentos financeiros. A capilaridade e as outras manifestações da coesão passaram a ser objetos de pesquisa dos cientistas de “segunda categoria”⁸⁵ (ROWLINSON, 2004, p. 3, tradução nossa). Pois, como diz Rowlinson (2004), citando o francês René-Antoine Réaumur (1683-1757), “tudo tem sua

⁸⁴ Fenômenos elétricos e magnéticos são conhecidos desde a Antiguidade; vide Tonidandel, Araújo e Boaventura (2018).

⁸⁵ O texto em língua estrangeira é: “second-rank”.

moda, até a filosofia tem a sua”⁸⁶ (p. 56, tradução nossa). E, nesse século, “os espetaculares experimentos que puderam ser feitos [...] em eletricidade”⁸⁷ e os sólidos avanços no estudo da química⁸⁸ [...] atraíram os melhores homens”⁸⁹ (p. 3, tradução nossa).

⁸⁶ O texto em língua estrangeira é: ““Everything has its fashions, even philosophy has its own””.

⁸⁷ Desde o século XVII, através de experimentos de Otto von Guericke (1602-1686), a eletrização por atrito já era conhecida. Porém, foi somente no século XVIII, precisamente em 1729, que Stephen Gray (1666-1736) descobriu o fenômeno da condução elétrica e diferenciou os corpos condutores dos não-condutores (isolantes). Então, em 1733, Charles Dufay (1692-1739), estudando a eletrização por atrito, distinguiu dois “tipos de eletricidade”, a vítrea e a resinosa, onde a atração ocorreria entre corpos de “eletricidades opostas” e a repulsão ocorreria entre corpos de “mesma eletricidade”. A teoria de Dufay ganhou a oposição de Benjamin Franklin (1706-1790), que defendeu em 1750, a existência de um “fluido elétrico” único (invisível) na composição dos corpos. Assim, “quando presente em excesso, este [fluido] imprimiria uma carga positiva ao corpo e a sua deficiência implicaria em uma carga negativa” (OKI, 2000, p. 35). A explicação de fenômenos da natureza através da proposição de fluidos específicos foi uma tendência da época. “Considerando que a eletricidade tinha uma natureza material, alguns investigadores passaram a realizar tentativas de engarrafar o fluido elétrico. Em meados do século [...] [XVIII], começaram a ser usados instrumentos que armazenavam a eletricidade gerada por atrito, os capacitores primitivos. [...] [E] as centelhas elétricas passaram a ser usadas para produzir reações químicas. Este recurso foi utilizado, por exemplo, na síntese da água realizada pelo químico inglês Henry Cavendish (1731- 1810) [na década de 1780], através da combinação dos gases hidrogênio e oxigênio após a passagem da centelha na mistura de reação” (OKI, 2000, p. 35-36). Em 1780, Luigi Galvani (1737-1798), um professor de anatomia, percebeu que os tecidos musculares de rãs mortas se contraíam na presença de diferentes metais e, com isso, postulou a existência de uma “eletricidade animal”, relacionando a eletricidade à fisiologia dos seres vivos. Ideia que foi descartada por Alessandro Volta (1745-1827), que atribuiu a contração muscular ao simples fato do tecido muscular ser um meio condutor, onde a verdadeira causa da corrente elétrica seria os metais colocados em contato com o animal. Com isso, empilhando discos de metais diferentes (como o zinco e o cobre) – separados por papel ou tecido embebido em soluções ácidas ou salinas (condutoras de eletricidade) –, Volta construiu a primeira *pilha elétrica* em 1796. Por último, mas não menos importante, é preciso citar a contribuição de Charles Augustin Coulomb (1736-1806), que, em 1783-5, elucidou que a força de atração entre dois corpos carregados (hoje conhecida como *força de Coulomb*) é diretamente proporcional ao produto de suas cargas elétricas e inversamente proporcional ao quadrado da distância de seus centros. Outros detalhes sobre os estudos da eletricidade no século XVIII podem ser lidos em Oka (2000), Oki (2000) e Santos (2016).

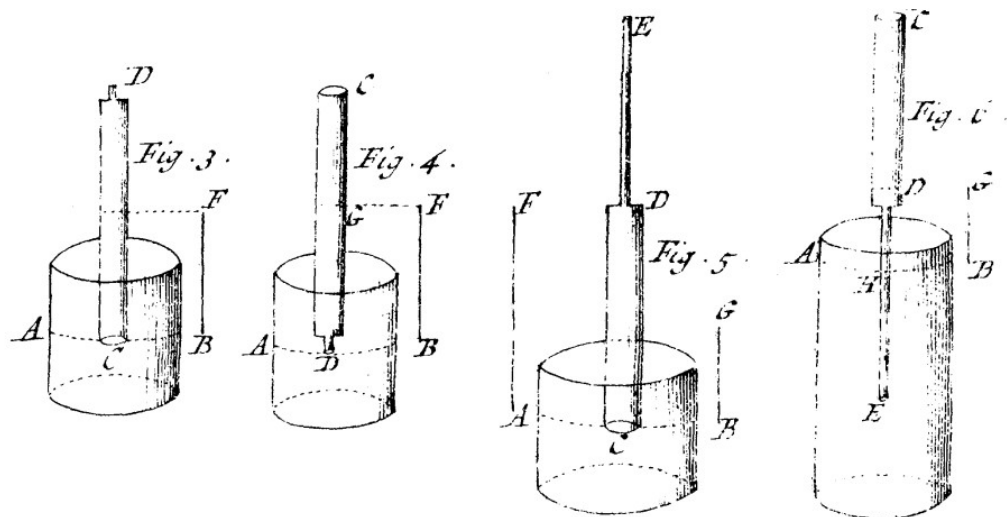
⁸⁸ Influenciados pelos trabalhos de Robert Boyle (1627-1691), muitos químicos do século XVIII se debruçaram sobre o estudo dos gases, ficando conhecidos como “os pneumaticistas” (GORRI, SANTIN FILHO, 2009). “Descobriu-se que o ar atmosférico não era elementar, e sim uma mistura de “ares”, ou gases. Foram descobertos sucessivamente o gás carbônico, o hidrogênio, o nitrogênio e o oxigênio, além de outros gases compostos, como o óxido nítrico” (LIMA, BARBOSA, FILGUEIRAS, 2019). Nesse contexto, em 1731, Georg Ernst Stahl (1660-1734) explicou a combustão através da suposta existência de uma “substância” denominada *flogisto* (ou *flogístico*), que participaria da constituição dos materiais combustíveis (como a madeira, por exemplo) e seria liberada durante a queima. Essa teoria foi refutada por Antoine Lavoisier (1743-1794) em 1777, quando a combustão foi explicada como uma reação que envolve o gás oxigênio (PRADO, CARNEIRO, 2018; SANTOS, 2012). “Com base em experiências bem elaboradas e controladas, utilizando balanças de alta precisão [...], ele mediu a variação de massa durante a combustão de diversas substâncias. Os resultados dos experimentos demonstraram que havia conservação de massa durante as reações [quando realizadas em sistemas fechados] e permitiram que ele demonstrasse que a queima é uma reação com o oxigênio” (SANTOS, 2012, p. 85). Assim, em 1789, Lavoisier publicou sua famosa obra intitulada *Traité Élémentaire de Chimie* (Tratado Elementar de Química), onde, além de listar 33 elementos químicos segundo as definições de sua época, também escreveu a lei natural que, hoje, recebe o seu nome: a lei de Lavoisier (ou *lei da conservação das massas*) (LIMA, BARBOSA, FILGUEIRAS, 2019; PRADO, CARNEIRO, 2018). No final do século, a química contaria, então, com o aporte de mais uma lei das reações químicas, proposta por Joseph Louis Proust (1754-1826) em 1799: a *lei das proporções definidas* (ou, simplesmente, lei de Proust) (CAMEL, FILGUEIRAS, 2013). Para um aprofundamento na biografia de Lavoisier, considerado o “pai da química moderna”, sugere-se a obra de Filgueiras (2007).

⁸⁹ O texto em língua estrangeira é: “The spectacular experiments that could be made [...] in electricity, and the solid advances in the study of chemistry [...], attracted the best men”.

Ainda assim, através da classe dos cientistas infames, avanços foram conquistados no novo programa de estudos da capilaridade – o programa newtoniano.

Em 1718, James Jurin (1684-1750), que foi secretário da Royal Society durante o mandato de Isaac Newton, publicou que a altura alcançada pela água no interior de um capilar não depende das medidas internas de toda a extensão do tubo; depende apenas do raio do tubo capilar na posição do menisco (JURIN, 1718). Desse modo, “um tubo largo no fundo, mas estreito no topo, poderia, portanto, conter em suspensão um volume maior de água do que um de diâmetro uniforme”⁹⁰ (ROWLINSON, 2004, p. 21, tradução nossa). Observe a Figura 24:

Figura 24 - Experimentos de James Jurin (1684-1750)



Fonte: JURIN, 1718

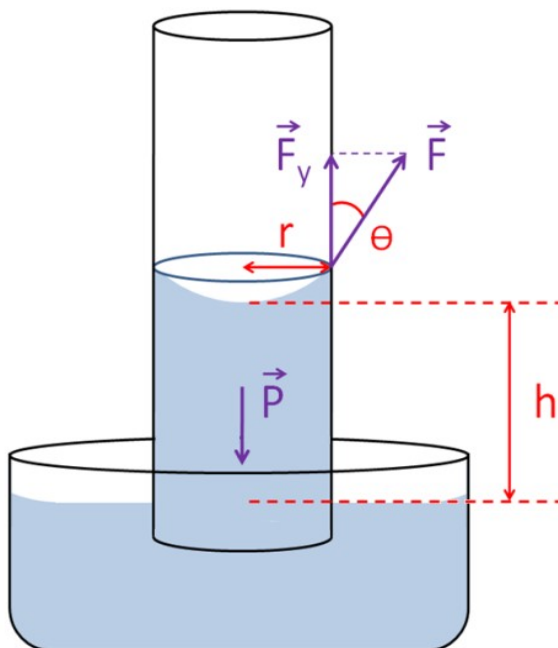
Essa relação inversamente proporcional entre a altura da coluna de líquido (h) e o raio do tubo capilar na posição do menisco (r) ficaria conhecida como *lei de Jurin* (MILLINGTON, 1947). Segue abaixo, a fórmula atualizada dessa lei:

$$h = \frac{2 \cdot \cos \theta \cdot \gamma}{\rho \cdot g \cdot r} \quad (\text{Equação 6})$$

onde θ é o ângulo de contato do líquido com a parede do tubo capilar; γ é a tensão superficial do líquido, ρ é a sua densidade e g é a gravidade local (CASA DAS CIÊNCIAS, 2023; FEMTO, 2011). Vide Figura 25.

⁹⁰ O texto em língua estrangeira é: “A tube that was wide at the bottom but narrow at the top could therefore hold in suspension a greater volume of water than one of uniform bore”.

Figura 25 – Representação da ascensão capilar com algumas das variáveis da lei de Jurin



Fonte: O autor, 2024

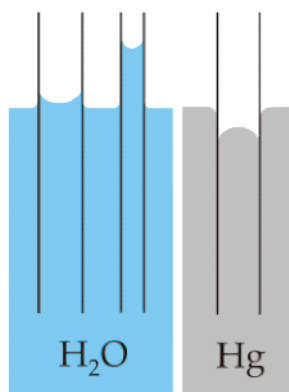
Este fato minou a explicação não muito coerente de Hauksbee de que a ascensão se devia a uma diminuição da “força gravitacional” por uma atração horizontal de toda a parede de vidro [...]. Jurin afirmou ter encontrado “a causa real desse fenômeno, que é a atração da periferia, ou seção da superfície do tubo, à qual a superfície superior da água é contígua e aderente”⁹¹ (ROWLINSON, 2004, p. 21, tradução nossa).

Para Jurin, tanto a ascensão da água como a depressão do mercúrio em tubos capilares de vidro (Figura 26) explicavam-se, a nível submicroscópico, pelo “balanço” das forças de coesão e de adesão entre as partículas dos materiais envolvidos. Para ele, “as partículas de água atraem a água, mas não tão fortemente quanto são atraídas pelo vidro, enquanto o mercúrio atrai o mercúrio com mais força do que o mercúrio é atraído pelo vidro”⁹² (ROWLINSON, 2004, p. 21, tradução nossa).

⁹¹ O texto em língua estrangeira é: “This fact undermined Hauksbee’s not very coherent explanation that the rise was due to a diminution of the “gravitating force” by a horizontal attraction of the whole of the glass [...]. Jurin claimed to have found “the real cause of that phaenomenon, which is the attraction of the periphery, or section of the surface of the tube, to which the upper surface of the water is contiguous and coheres””.

⁹² O texto em língua estrangeira é: “[...] that water particles attract water but not as strongly as they are attracted to glass, whereas mercury attracts mercury more strongly than mercury is attracted to glass”.

Figura 26 – Ascensão capilar da água e depressão capilar do mercúrio



Fonte: WIKIPÉDIA, 2023

Em outras palavras: A água ascende no tubo capilar porque a força de adesão do vidro pela água é maior do que a força de coesão da própria água. E o mercúrio apresenta uma depressão no tubo capilar porque sua força de coesão é mais intensa do que a força de adesão que ocorre entre ele e o vidro. Explicação que também justifica as formas dos meniscos dessas substâncias – côncavo para a água e convexo para o mercúrio (Figura 26).

Na sequência, Joseph de Lalande (1732-1807) descobriu que a ascensão da água atinge alturas menores quando ela ou o vidro do tubo capilar são aquecidos. E Johann Andreas von Segner (1704-1777), em 1751, tentou determinar, teoricamente, a forma de uma gota de líquido em uma superfície plana (MILLINGTON, 1947).

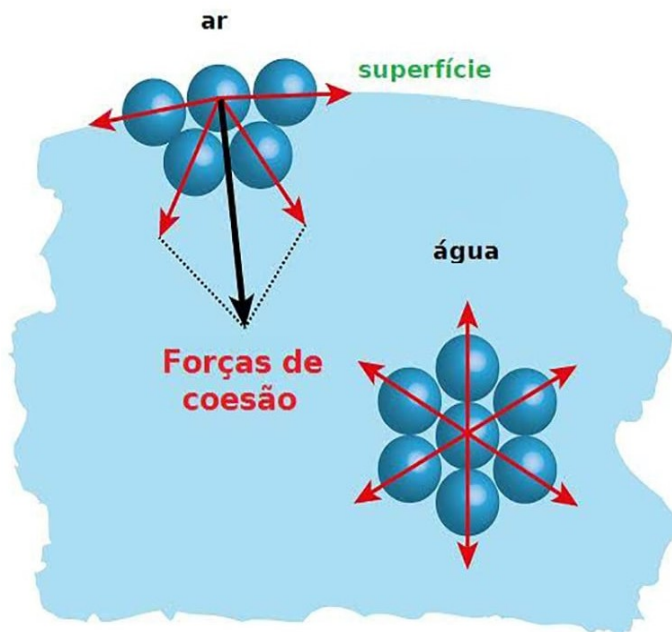
De acordo com Millington (1947), também foi Segner quem concebeu que, no interior de um líquido, as entidades moleculares estariam em equilíbrio, de acordo com a primeira lei de Newton; mas que, na superfície, haveria uma força resultante atuando nas partículas – onde essa força estaria apontada para o interior do fluido e seria a responsável pela existência de uma *tensão superficial* (γ)⁹³ no mesmo, como mostra a Figura 27.

No tocante à natureza dessas forças atrativas, muitas propostas foram levantadas no século XVIII.

⁹³ A *tensão superficial* (γ) também pode ser definida como o trabalho (w) necessário para aumentar a área superficial (A) de um líquido ou a força (F) necessária para aumentar sua extensão (ℓ) (CASTELLAN, 1986). Vide:

$$\gamma = \frac{w}{A} = \frac{F}{\ell}$$

Figura 27 – A causa molecular da tensão superficial da água



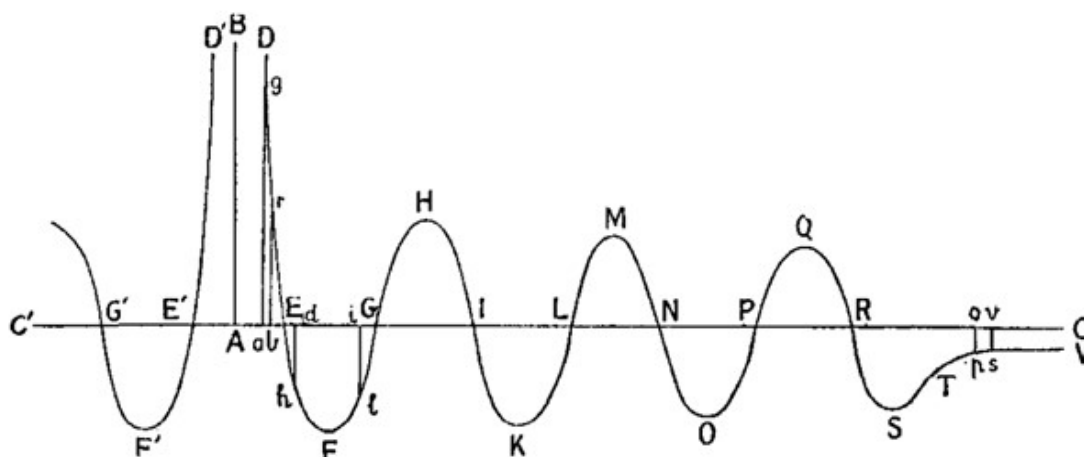
Fonte: FLORES, 2020

Já em 1704, ano da publicação do livro *Opticks* (Óptica), de Newton, John Freind (1675-1728) defendeu que as forças coesivas da matéria seriam sensíveis apenas em distâncias infinitesimais e com intensidades inversamente proporcionais ao espaçamento entre as partículas. Essas forças, no entanto, ao contrário da gravidade, dependeriam da natureza e da densidade das partículas constituintes (MILLINGTON, 1947). John Keill (1671-1721), por outro lado, em um artigo de 1708, “aplicou a gravitação newtoniana a todos os fenômenos físicos e químicos”⁹⁴ (MILLINGTON, 1947, p. 363, tradução nossa).

Joseph Boscovich (1711-1787), a fim de explicar a expansibilidade dos gases, também propôs a existência de forças repulsivas entre as partículas da matéria. A atração e a repulsão se dariam, então, em função da distância entre as entidades moleculares. Observe o gráfico da Figura 28.

No gráfico, o ponto A é um ponto de referência, que pode ser atribuído a uma partícula qualquer de um material. $\overrightarrow{AC'}$ e $\overrightarrow{AC}$ são semi-retas que demarcam distâncias crescentes com relação ao ponto A. E o eixo $\overrightarrow{AB}$, que opera como um eixo de simetria do gráfico, também indica a prevalência das forças repulsivas.

⁹⁴ O texto em língua estrangeira é: “[...] applied Newtonian gravitation to all physical and chemical phenomena”.

Figura 28 – Gráfico de Boscovich (1711-1787)

Fonte: MILLINGTON, 1947, p. 367

Assim, na interpretação de Boscovich, se as partículas da matéria estivessem exageradamente próximas umas das outras, como no segmento $\overline{AE}$, haveria repulsão entre elas. Numa distância maior, como no segmento $\overline{EG}$, haveria atração. E, dessa maneira, repulsão e atração se alternariam à medida que a distância aumentasse. Essa oscilação ocorreria até um ponto R, a partir do qual as forças atrativas seriam predominantes. Nessa semi-reta $\overrightarrow{RC}$, então, um trecho da “curva de força” se destacaria: o TpsV. “O ramo TpsV se aproxima de $\overrightarrow{AC}$ como uma assíntota, seguindo uma lei do inverso do quadrado”⁹⁵, como na lei da gravitação de Newton (MILLINGTON, 1947, p. 367, tradução nossa).

“Bem recebida por cientistas contemporâneos em muitos países, a teoria de Boscovich teve uma influência imensamente forte sobre o pensamento neste campo por muito tempo”⁹⁶ (MILLINGTON, 1947, p. 368, tradução nossa).

Já no final do século XVIII, em 1797, Richard Kirwan (1733-1812) chegou a propor uma natureza magnética para as forças intermoleculares. Mas, apesar dessa ideia ter sido resgatada por outros cientistas no século XIX, como Moritz Frankenheim (1801-1869), não logrou muito êxito. E, embora a lei da atração e da repulsão entre cargas elétricas tenha sido proposta por Charles Coulomb (1736-1806) em 1783-5, nenhum cientista do século XVIII parece ter empregado a natureza elétrica para explicar a coesão da matéria, segundo Millington (1947).

⁹⁵ O texto em língua estrangeira é: “[...] the branch TpsV approaches AC as an asymptote, following an inverse square law”.

⁹⁶ O texto em língua estrangeira é: “Well received by contemporary scientists in many countries, the theory of Boscovich had an immensely strong influence upon thought in this field for a very long time”.

Dessa forma, no campo das pesquisas sobre a capilaridade, dois problemas fundamentais ficaram em aberto. O primeiro, já antigo, buscava compreender qual a real natureza das forças intermoleculares. E o segundo, que surgiu dos trabalhos de Segner, procurava mensurar a diferença de pressão nas superfícies curvas de líquidos. O século XIX apontaria uma fina relação entre eles. Antes, vale fazer um breve comentário sobre o contexto sócio-político da Europa nesta virada de século.

Com o enraizamento dos ideais renascentistas – o antropocentrismo, o humanismo e o racionalismo –, que marcaram a sociedade europeia do século XIV ao XVI, outro movimento intelectual germinou no século XVII e veio a florescer no XVIII: o iluminismo. A filosofia dos iluministas se opunha fortemente aos dogmas da Igreja e à tradição. E, além disso, questionava frontalmente, a autoridade dos monarcas absolutistas e o capital mercantil. O iluminismo está nas bases da revolução francesa, na qual o povo francês guilhotinou o próprio rei, Luís XVI, em 1793 – um ato extremamente simbólico. A revolução, deflagrada em 1789, demarca o fim da Modernidade e o início da Idade Contemporânea (FIGUEIRA, 2005).

2.2.3.3. *Século XIX*

Quando a superfície de um líquido possui um formato plano, é fácil conceber que a “pressão externa” (p_e) que atua sobre ela, proveniente da ação da atmosfera e das forças de adesão, se anula com a “pressão interna” (p_i), proveniente das forças de coesão. Ou seja: A diferença de pressão ($\Delta p = p_i - p_e$) é igual a zero. E, seguindo essa lógica, pode-se inferir que, quando Δp é diferente de zero, o formato plano deixa de existir, e a superfície do líquido passa a assumir um formato curvo (côncavo ou convexo), como ocorre nas gotas e nos meniscos. Pois bem... A medição desse Δp foi um problema deixado pelos cientistas do século XVIII. E a solução, felizmente, foi alcançada ainda no início do século XIX.

Em 20 de dezembro de 1804, Thomas Young (1773-1829), um cientista britânico extremamente polivalente⁹⁷, apresentou um trabalho marcante à Royal Society, cujo título era *An Essay on the Cohesion of Fluids* (Um Ensaio sobre a Coesão dos Fluidos). Nesse ensaio, Young discorreu sobre o problema do formato das superfícies de líquidos e, de maneira muito natural e intuitiva, fez uma declaração que solucionou a questão:

⁹⁷ De acordo com Cantor (1970), Thomas Young fez importantes contribuições não somente na física, mas também na egiptologia (no estudos dos hieróglifos) e na medicina.

É bem conhecido, e resulta imediatamente da composição das forças, que onde uma linha é igualmente distendida, a força que ela exerce, em uma direção perpendicular à sua, é diretamente proporcional à sua curvatura; e o mesmo vale para uma superfície de curvatura simples. Mas onde a curvatura é dupla, cada curvatura tem seu efeito apropriado, e a força na junta deve ser como a soma das curvaturas em quaisquer duas direções perpendiculares. Pois esta soma é igual, qualquer que seja o par de direções perpendiculares que possam ser empregadas⁹⁸ (YOUNG, 1804, p. 66, tradução nossa).

Young não registrou nenhuma fórmula ao longo do ensaio, apenas palavras. E, nelas, elucidou que a força perpendicular a uma superfície curva seria diretamente proporcional ao seu raio. Onde, a partir dessa constatação – e sabendo previamente da relação conceitual entre “pressão” e “força” e da noção de tensão superficial –, o cálculo da diferença de pressão poderia ser feito prontamente.

Na visão de Rowlinson (2004), se Young pudesse superar “sua conhecida aversão ao uso de expressões e equações algébricas explícitas”⁹⁹ (p. 57, tradução nossa), ele teria escrito a equação abaixo, considerada a solução final¹⁰⁰ para os problemas metrológicos da capilaridade:

$$\Delta p = \gamma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (\text{Equação 7})$$

Na qual Δp é a diferença de pressão na superfície curva de um líquido, γ é a sua tensão superficial e R_1 e R_2 são os seus raios perpendiculares¹⁰¹. Todavia, o tratamento matemático desse problema da diferença de pressão foi feito por Pierre-Simon Laplace (1749-1827), um cientista francês, um ano depois do ensaio de Young.

Não há razão para supor que Laplace soubesse do artigo de Young [...]. A comunicação entre a Grã-Bretanha e a França foi lenta após o recomeço da guerra em 1803¹⁰² [onde a França, após a revolução francesa, seguia governada por Napoleão Bonaparte (1769-1821)] (ROWLINSON, 2004, p. 86, tradução nossa).

⁹⁸ O texto em língua estrangeira é: “It is well known, and it results immediately from the composition of forces, that where a line is equably distended, the force that it exerts, in a direction perpendicular to its own, is directly as its curvature; and the same is true of a surface of simple curvature; but where the curvature is double, each curvature has its appropriate effect, and the joint force must be as the sum of the curvatures in any two perpendicular directions. For this sum is equal, whatever pair of perpendicular directions may be employed”.

⁹⁹ O texto em língua estrangeira é: “[...] his well-known aversion to using explicit algebraic expressions and equations”.

¹⁰⁰ A partir da equação de Young-Laplace, é possível, inclusive, deduzir a equação de Jurin (Equação 6) (FEMTO, 2011).

¹⁰¹ Se os raios perpendiculares de uma superfície curva forem iguais, $R_1 = R_2 = R$, de onde se obtém que:

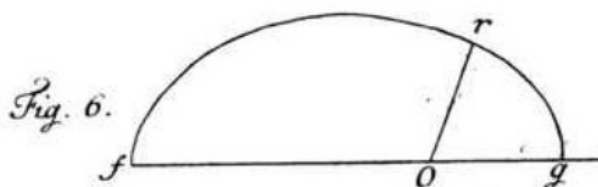
$$\Delta p = \frac{2\gamma}{R}$$

¹⁰² O texto em língua estrangeira é: “There is no reason to suppose that Laplace knew of Young’s paper [...]. Communication between Britain and France was slow after the resumption of war in 1803”.

Laplace, motivado por preceitos iluministas, procurava “provar a universalidade da gravidade, a estabilidade do universo e afastar a necessidade de admitir a ação do divino no universo” (MOCELLIN, 2006, p. 395).

E, com esse intuito, no primeiro suplemento do quarto volume de seu *Traité de Mécanique Céleste* (Tratado de Mecânica Celeste), publicado em 23 de dezembro de 1805, ele abordou o fenômeno da capilaridade, contando com a sofisticada matemática de Leonhard Paul Euler (1707-1783) (vide a Figura 29) (LAPLACE, 1805).

Figura 29 – Representação feita por Euler (1707-1783) em seu artigo *Recherches sur la courbure des surfaces* (Pesquisa sobre a curvatura de superfícies), de 1767



Fonte: EULER, 1767

Nessa obra, a fim de alcançar uma equação matemática para a diferença de pressão na superfície curva de um líquido, Laplace, primeiramente, calculou a “força de atração entre uma gota esférica de líquido e um fino “canal” vertical de líquido fora dela e perpendicular à sua superfície”¹⁰³ (Figura 30) (ROWLINSON, 2004, p. 87, tradução nossa). Então, em seguida, realizou o quociente dessa força por unidade de área, de onde obteve a expressão abaixo, referente à pressão gerada, pela gota, no tubo:

$$K + \frac{1}{2}H \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (\text{Equação 8})$$

Na expressão, R_1 e R_2 são os raios de uma camada esférica da superfície da gota. Já os termos K e H contêm os potenciais das forças atrativas – $\Psi(z)$ – que ocorrem no sistema. Vide:

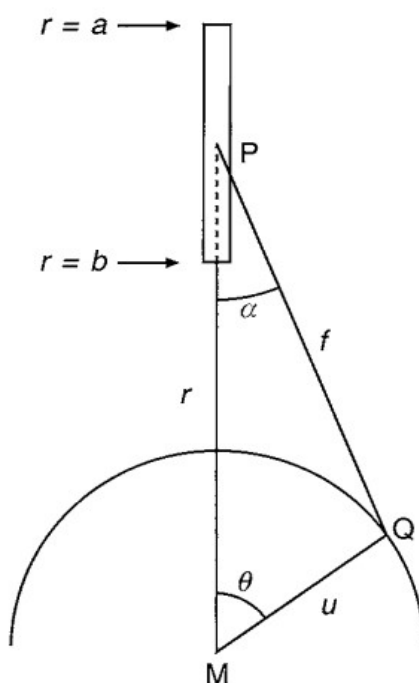
$$K = 2\pi \int_0^\infty \Psi(z) dz \quad \text{e} \quad H = 2\pi \int_0^\infty z \cdot \Psi(z) dz$$

¹⁰³ O texto em língua estrangeira é: “[...] the attractive force between a spherical liquid drop and a thin vertical ‘canal’ of liquid outside it and perpendicular to its surface”.

tal que $z = b - u$, seguindo a representação da Figura 30 (ROWLINSON, 2004).

Em 1805, Laplace apenas ponderou que a primeira parcela da expressão, K , é muito maior do que a segunda, que pode ser escrita na forma H/R , assumindo $R_1 = R_2 = R$. Porém, depois de ter tomado ciência do trabalho de Thomas Young sobre a capilaridade, Laplace deu uma interpretação mais consistente a essas parcelas da expressão. Essa nova interpretação foi registrada em seu *Supplément a la Théorie de L'action Capillaire* (Suplemento à Teoria da Ação Capilar), de 1807.

Figura 30 – Representação de uma gota esférica atraindo um tubo capilar externo e perpendicular à sua superfície



Legenda: M é o ponto central da gota esférica cujo raio é $\overline{MQ}$ (também representado por u). Q é um ponto da superfície da gota; e P é um ponto do tubo capilar, tal que o segmento $\overline{QP}$ também pode ser representado por f . A distância entre o centro da gota e o ponto P do tubo é dada por r . Os segmentos f e r formam o ângulo α ; e os segmentos u e r formam o ângulo θ .

Fonte: ROWLINSON, 2004, p. 88

Nesse segundo suplemento, Laplace (1807) escreveu que “é quase impossível determinar experimentalmente a intensidade da força de atração das moléculas dos corpos: sabemos apenas que é incomparavelmente superior à ação capilar” (p. 72). Isto é, Laplace interpretou a primeira parcela de sua expressão (K) como a pressão interna existente no

líquido, em consequência das forças intermoleculares de coesão, e a segunda parcela (H/R) como a diferença de pressão (Δp) que implica na ascensão ou pela depressão capilar. Comparando a segunda parcela da expressão de Laplace (Equação 8) com a equação elucidada por Young (Equação 7), uma enorme semelhança pode ser notada; sendo possível escrever que $\frac{1}{2} H$ é igual à tensão superficial (γ).

E, de fato, foi o que o Laplace fez. No entanto, ao citar Thomas Young no final de sua obra, Laplace fez um adendo, dizendo que, apesar do cientista britânico ter postulado sobre a tensão superficial (junto com Johann Andreas von Segner), era ele quem tinha, de fato, dado a “demonstração rigorosa”¹⁰⁴ da qual o conceito carecia (LAPLACE, 1807, p. 78, tradução nossa). De acordo com Rowlinson (2004), Young não se agradou dessa declaração de Laplace. Tanto que, em diversas ocasiões, devolveu críticas ao cientista francês. Para Young:

[...] As extensas derivações de Laplace envolviam “as verdades mais simples da mecânica nas complexidades das fórmulas algébricas” [...]. Em outro lugar, ele escreveu anonimamente que elas [as deduções de Laplace] eram um mero “desfile ostensivo de profunda investigação... mais influenciados, em algumas ocasiões, pelo desejo de causar admiração, do que de comunicar conhecimento”¹⁰⁵ (ROWLINSON, 2004, p. 94, tradução nossa).

No fundo, essa controvérsia entre os dois cientistas era mais um reflexo do conflito político que se estabelecia entre a Inglaterra e a França no início do século. Pois, no campo das pesquisas sobre a capilaridade, embora os dois sigam metodologias distintas¹⁰⁶, os trabalhos de ambos costumam ser considerados em conjunto. Inclusive, a Equação 7 costuma ser referenciada, na atualidade, como *equação de Young-Laplace* (FEMTO, 2011).

[Assim,] com [...] o envolvimento de homens como Young e Laplace, os temas de coesão e capilaridade se recuperaram da piada [...] de que sua busca havia sido deixada “para a cultura de uma ordem secundária de homens”¹⁰⁷ (ROWLINSON, 2004, p. 100-101, tradução nossa).

¹⁰⁴ O texto em língua estrangeira é: “démonstration rigoureuse”.

¹⁰⁵ O texto em língua estrangeira é: “[...] that Laplace’s extensive derivations involved “the plainest truths of mechanics in the intricacies of algebraic formulas” [...]. Elsewhere he wrote anonymously that they were a mere “ostentatious parade of deep investigation... more influenced on some occasions, by the desire of commanding admiration, than of communicating knowledge””.

¹⁰⁶ “Ao ler Young, estamos lendo a filosofia natural do século XVIII. Na leitura de Laplace, estamos lendo a física teórica do século XIX” (ROWLINSON, 2004, p. 83).

¹⁰⁷ O texto em língua estrangeira é: “With, however, the involvement of men such as Young and Laplace the subjects of cohesion and capillarity had recovered from [...] jibe that their pursuit had been left “to the culture of a secondary order of men””.

Nessa altura do século XIX, é preciso pontuar que a Europa passava por uma transformação econômica (e, consequentemente, social) drástica: a primeira revolução industrial, que demarca o início do sistema capitalista industrial.

Com as grandes navegações, entre os séculos XV e XVI, as atividades econômicas se expandiram. Controlando vastos territórios em quase todo o mundo, os europeus passaram a explorar o comércio em proporções mundiais, levando o para o seu continente riquezas que seriam aplicadas na fabricação de produtos destinados a alimentar um mercado cada vez maior. As próprias formas de produção de mercadorias na Europa acabaram por se transformar. Para atender à demanda crescente, surgiram métodos mais eficientes de produzir. Com isso, as antigas corporações de ofício foram substituídas pela *produção manufatureira*, dirigida por um comerciante que controlava a produção de vários artesãos. Estes trabalhavam por encomenda, com a matéria-prima e as ferramentas necessárias cedidas pelo comerciante, e, como forma de pagamento, recebiam um salário. A partir de meados do século XVIII, alguns comerciantes perceberam que podiam aumentar ainda mais a produção e os lucros. E, em vez de espalhar ferramentas e matérias-primas entre os artesãos contratados, passaram a reuni-los num mesmo local para trabalhar: assim surgiram as fábricas ou o *sistema fabril*. As fábricas trouxeram muitas vantagens aos empresários [burgueses]. Ficou mais fácil controlar a produção, pois era possível reduzir a perda de matérias-primas, por exemplo, e ao mesmo tempo fiscalizar de perto a qualidade do produto. A fábrica possibilitou ainda incrementar a produtividade, ao tornar mais eficaz o controle sobre a velocidade e o ritmo do trabalhador. Além disso, a produção foi reorganizada. A fabricação de cada mercadoria passou a ser dividida em várias etapas, num processo conhecido como *produção em série*. Concentrado em uma única atividade, o trabalhador especializava-se e aumentava a produção. Essas características acabaram influenciando no custo final do produto. Com mercadorias produzidas por meios mais baratos, era possível aumentar a margem de lucro e o mercado consumidor (FIGUEIRA, 2005, p. 194, grifo do autor).

De acordo com Figueira (2005), “durante o século XVIII, a revolução industrial consistiu num fenômeno inteiramente inglês” (p. 195). E uma série de razões pode ser listada para justificar o pioneirismo da Inglaterra na revolução industrial. Por exemplo: No século XVIII, enquanto os demais Estados europeus conviviam com uma forte ameaça ao regime absolutista (fruto da profícua difusão das ideias iluministas), a Inglaterra já usufruía de certa estabilidade sócio-política, uma vez que seu último grande conflito, a revolução gloriosa, ocorrera nos anos de 1688-9, depondo o absolutismo monárquico inglês e fortalecendo o parlamento. A geografia da Inglaterra, que é uma ilha, também lhe proporcionava vantagens. Sua localização estava a uma distância ideal (do ponto de vista estratégico) dos Estados potencialmente inimigos; e sua extensa fronteira com o mar garantia uma enorme zona portuária, útil às navegações. Além disso, no século XVIII, o território inglês viu-se rico em carvão mineral, um importante recurso energético. E como as reservas de carvão se encontravam, muitas vezes, abaixo do nível do mar, cortando lençóis freáticos, as infiltrações eram frequentes durante o processo de extração. Desse modo, o bombeamento de água das

minas de carvão era uma preocupação constante. Por fim, a demanda por carvão mineral e o problema de engenharia associado à sua obtenção só fomentaram o desenvolvimento de novas máquinas – as máquinas a vapor (REZENDE, 2021; SILVA, ERROBIDART, 2020).

Com o aperfeiçoamento das máquinas a vapor, estas passaram a ser utilizadas não apenas para retirar água das minas, mas com diversos outros propósitos, como mover locomotivas, navios e máquinas industriais. Na indústria têxtil, [por exemplo,] as máquinas de tecer a vapor chegaram na primeira metade do século XIX. Elas permitiram que as fábricas não mais precisassem se estabelecer obrigatoriamente próximas a rios, com o objetivo de aproveitar a força da água para movimentar seu maquinário, e começaram a se concentrar em cidades próximas a locais com disponibilidade de carvão (REZENDE, 2021, p. 22).

Dessa maneira, a partir do século XIX, a revolução industrial começou a se expandir para vários países da Europa (FIGUEIRA, 2005).

Nesse período da primeira revolução industrial, que abrangeu cerca de dois séculos, duas áreas da física foram muito exploradas: a termodinâmica¹⁰⁸ e a teoria cinética dos gases¹⁰⁹. De acordo com Atkins e Jones (2012), a termodinâmica é “o estudo das transformações da energia de uma forma para outra” (p. 855), com especial atenção para a energia térmica (o calor). E a teoria cinética dos gases, por sua vez, se encarrega de relacionar as grandezas macroscópicas de um gás (como a sua pressão e a sua temperatura) ao movimento das suas entidades moleculares (CASTELLAN, 1986).

No início do século XVIII, uma teoria que surgiu com o objetivo de explicar a natureza do calor e que se popularizou rapidamente foi a *teoria do calórico*. Essa teoria

¹⁰⁸ Para um aprofundamento na história da termodinâmica, recomenda-se a leitura das obras de Donoso (20--), Rezende (2021), Silva e Errobidart (2020).

¹⁰⁹ Em 1738, Daniel Bernoulli (1700-1782), que fora muito influenciado pelo pensamento atomista de Pierre Gassendi, publicou o livro *Hydrodynamica* (Hidrodinâmica). Nessa obra, Bernoulli atribuiu a pressão de um gás às colisões de suas partículas contra a parede do recipiente que as contém – uma declaração que reforçava a hipótese dinâmica levantada por Robert Boyle para a natureza dos gases (PEDUZZI, 2008). Assim, no contexto científico dos séculos XVIII e XIX, o livro de Bernoulli corroborou com uma nova perspectiva para o estudo dos gases: uma abordagem submicroscópica das grandezas aferidas macroscopicamente. Então, em 1834, reunindo as contribuições de Edme Mariotte (1620-1684) e Joseph Louis Gay-Lussac (1778-1850) sobre as transformações gasosas, Émile Clapeyron (1799-1864) formulou a primeira versão da conhecida *equação geral dos gases ideais* (CLAPEYRON, 1834). Em 1857, Rudolf Clausius (1822-1888) criou um modelo para os gases no qual atribuiu às suas partículas constituintes, os movimentos de translação, rotação e vibração (CLAUSIUS, 1857). Em 1858, Clausius propôs a ideia de *livre caminho médio*, a distância média que as partículas de um gás percorrem entre duas colisões sucessivas; e, entre 1850 e 1865, anunciou a relação entre a energia térmica (o calor) e o trabalho mecânico, introduzindo o conceito de *entropia* (que constitui a 2ª lei da termodinâmica) (DONOSO, 20--). Os trabalhos de Clausius, na incipiente teoria cinética dos gases e na termodinâmica, tiveram forte impacto sobre James Clerk Maxwell (1831-1879), que, em 1859, fez a primeira dedução da *lei de distribuição das velocidades moleculares* (DONOSO, 20--). Posteriormente, essa lei sofreu contribuições de Ludwig Boltzmann (1844-1906), quem, em 1877, estabeleceu uma interpretação mecânico-molecular da entropia (DONOSO, 20--; REZENDE, 2021). Essas contribuições, que lançaram os alicerces da teoria cinética dos gases, foram fundamentais para a consolidação da teoria atômica, que, mesmo no século XIX, ainda possuía opositores.

concebia a energia térmica como uma substância fluida imponderável, denominada “calórico”¹¹⁰ (formada por partículas que se repelem fortemente e que possuem a capacidade de penetrar nos espaços vazios dos materiais), e concebia a temperatura como um “grau de calórico” (onde quanto maior fosse a temperatura, maior seria a quantidade de calórico confinada no material) (GOMES, 2012). O alcance dessa teoria foi tão grande que, por décadas, o calórico foi empregado na explicação de inúmeros fenômenos; e, dentre eles, a coesão da matéria.

No século XIX, Pierre-Simon Laplace concluiu, no quinto (e último) volume de seu *Traité de Mécanique Céleste* (Tratado de Mecânica Celeste) – publicado, aos poucos, entre os anos de 1823 e 1825 –, que existiriam três tipos de força atuando invariavelmente na matéria. O primeiro tipo seria a atração intrínseca às partículas constituintes dos materiais. O segundo tipo seria a atração entre essas partículas e as partículas de calórico. E o terceiro tipo seria, finalmente, a repulsão inerente às partículas de calórico. Ou seja: Dos três tipos de força, duas teriam natureza atrativa e uma teria natureza repulsiva; e essas forças seriam as responsáveis pelos diferentes estados de agregação da matéria. Segundo Laplace:

Os três estados, sólido, líquido e gasoso, dependem da eficácia relativa dessas forças. No estado sólido, a primeira força é a maior, a influência da forma das partículas é muito considerável e elas se unem na direção de sua maior atração. O aumento do calórico diminui esse efeito, expandindo o corpo; e, quando o aumento se torna tal que o efeito é muito pequeno ou zero, a segunda força predomina e o corpo assume o estado líquido. As partículas internas podem, então, se mover umas em relação às outras; mas a atração de cada partícula pelas suas “vizinhas” e pelo seu calórico retém o conjunto no mesmo espaço, com exceção das partículas da superfície, que o calórico remove na forma de vapores [...]. Então, com um aumento adicional de calórico, a terceira força supera as outras duas; e todas as partículas do líquido, tanto no interior quanto na superfície, se separam umas das outras. O líquido adquire, repentinamente, um volume e uma força de expansão muito consideráveis, e se dissipa em vapor, a menos que seja contido à força pelas paredes de um recipiente ou de um tubo¹¹¹ (LAPLACE, 1823, p. 104-105, tradução nossa).

¹¹⁰ De acordo com Gomes (2012) e Rezende (2021), foi Antoine Lavoisier, em um trabalho denominado *Méthode de Nomenclature Chimique* (Método de Nomenclatura Química), publicado em 1787 com mais cinco autores, quem primeiro utilizou o termo “calórico” para se referir à manifestação fluidica da energia térmica. Lavoisier considerava o calórico como um elemento químico, assim como a luz (LIMA, BARBOSA, FILGUEIRAS, 2019).

¹¹¹ O texto em língua estrangeira é: “Les trois états, solide, liquide et gazeux, dépendent de l'efficacité respective de ces forces. Dans l'état solide, la première force est la plus grande; l'influence de la figure des molécules est très-considérable et elles sont unies dans le sens de leur plus grande attraction. L'accroissement du calorique diminue cette influence en dilatant les corps, et, lorsque cet accroissement devient tel que cette influence soit très-petite ou nulle, la seconde force prédomine et le corps prend l'état liquide. Les molécules intérieures sont alors mobiles entre elles; mais l'attraction de chaque molécule par les molécules qui l'environnent et par leur calorique retient leur ensemble dans le même espace, à l'exception des molécules de la surface, que le calorique enlève sous la forme de vapeurs [...]. Enfin, quand, par un nouvel accroissement de calorique, la troisième force l'emporte sur les deux autres, toutes les molécules du liquide, à l'intérieur comme à la surface, s'écartent entre elles le liquide prend subitement un volume et une force expansive très-considérables, et il se dissiperait en vapeurs s'il n'était pas fortement contenu par les parois du vase ou du tube qui le ren ferme”.

Todavia, apesar da coerência interna da teoria laplaciana para a coesão da matéria, suas ideias não prosperaram. Pois, desde a década de 1810, evidências já vinham se acumulando contra a teoria do calórico, como a formulação do princípio da conservação da energia (a 1ª lei da termodinâmica) e a aceitação generalizada da teoria ondulatória da luz. E, à medida que essas evidências se amontoavam, o programa laplaciano se enfraquecia, como diz Rowlinson (2004). Assim, por volta de 1850, a teoria do calórico já havia sido amplamente descartada (GOMES, 2012). E o mistério sobre a natureza das forças intermoleculares permanecia.

Contudo, na segunda metade do século XIX, um notório avanço foi feito rumo à solução desse problema, concatenando as recentes descobertas da termodinâmica e as tradicionais pesquisas sobre a capilaridade. E o protagonista desse avanço foi Johannes Diderik van der Waals (1837-1923).

2.2.4. Johannes Diderik van der Waals

Johannes Diderik van der Waals nasceu em 1837, na cidade holandesa de Leiden, filho de Jacobus van der Waals, um carpinteiro, e de Elisabeth van den Burg. Após a conclusão de sua Educação Básica, decidiu tornar-se professor. E, com esse objetivo, ingressou na Universidade de Leiden em 1862. Em 1865, obteve a certificação para ensinar matemática e física nas escolas secundárias. E, em 1866, mudou-se para Haia (outra cidade holandesa), onde primeiro lecionou e, depois, também assumiu o cargo de diretor escolar. Tradicionalmente, na Holanda, o domínio das línguas clássicas (o grego e o latim) era um pré-requisito para dar seguimento na formação acadêmica universitária. E van der Waals, assumidamente, não tinha o conhecimento dessas línguas. Porém, com uma inesperada mudança na legislação, van der Waals pôde cursar o seu doutorado (THE NOBEL PRIZE, 2023). E foi durante o seu doutoramento que van der Waals teve acesso às mais recentes publicações da termodinâmica e da mecânica de fluidos.

No campo da termodinâmica, os artigos de Rudolf Clausius (1822-1888) sobre a natureza do calor surtiram, de imediato, um forte impacto sobre van der Waals. Ele mesmo disse que a leitura do artigo *Ueber die Art der Bewegung, welche wir Wärme nennen* (Sobre o

tipo de movimento que chamamos de calor), publicado por Clausius em 1857, foi como uma “revelação”¹¹² (VAN DER WAALS, 1910, p. 254, tradução nossa).

Outra obra de Clausius que se tornou basilar para van der Waals foi a *On a mechanical theorem applicable to heat* (Sobre um teorema mecânico aplicável ao calor), de 1870 (VAN DER WAALS, 1873). Nesse artigo, Clausius demonstrou o *teorema do virial*, idealizado para um conjunto de partículas em equilíbrio num sistema de três dimensões, como um gás confinado em condições ideais.

De acordo com o teorema, a média das energias cinéticas das partículas é igual à metade da média de suas energias potenciais (CLAUSIUS, 1870). Observe a equação:

$$\sum \frac{m}{2} \bar{v}^2 = \frac{1}{2} \sum \overline{\phi(r) \cdot r} \quad (\text{Equação 9})$$

No lado esquerdo da igualdade, tem-se a média da energia cinética; e no lado direito, a metade da média da energia potencial – escrita em função de $\phi(r)$, que é a força total sobre as partículas do sistema, uma grandeza que dependeria de uma coordenada espacial (r)¹¹³.

Nesse trabalho, sabendo que a energia potencial de um gás poderia ser escrita como um produto da pressão externa sobre ele (P) e do seu volume (V), Clausius também reformulou a Equação 9, desmembrando o lado direito em duas parcelas: uma referente às forças externas¹¹⁴ atuantes sobre o gás ($\frac{3}{2} P.V$) e outra referente às suas forças internas ($\phi_{int}(r)$) (Equação 10)¹¹⁵ (CLAUSIUS, 1870).

$$\sum \frac{m}{2} \bar{v}^2 = \frac{3}{2} P.V + \frac{1}{2} \sum \overline{\phi_{int}(r) \cdot r} \quad (\text{Equação 10})$$

Já no campo da mecânica de fluidos, foi a expressão de Pierre Laplace, considerada a solução final para os problemas da capilaridade, que saltou aos olhos de van der Waals (VAN

¹¹² O texto em língua estrangeira é: “revelation”.

¹¹³ Por definição, a *energia potencial* (U), também chamada de *trabalho* (w), é o produto escalar de uma força ($\vec{F}$) pelo deslocamento ($\vec{d}$) produzido por ela. Ou seja: $U = w = |\vec{F}| \cdot |\vec{d}| \cdot \cos\theta$, onde θ é o ângulo formado entre a força e o deslocamento. Assim, quando $\theta = 0^\circ$, $\cos\theta = 1$ e, por consequência, $U = w = |\vec{F}| \cdot |\vec{d}|$.

¹¹⁴ Nesta parcela do teorema do virial “expandido” ($\frac{3}{2} P.V$), o numerador 3 decorre da premissa de que as partículas de um gás se movimentam nas três dimensões do espaço.

¹¹⁵ Clausius não desenvolveu o teorema do virial além desse ponto. Ele teceu apenas um breve comentário de que o lado esquerdo de sua equação seria diretamente proporcional à temperatura do gás e “não retomou o teorema do virial para nenhum outro propósito”, como afirma Klein (1974, p. 39).

DER WAALS, 1873). E, aqui, vale lembrar que, nessa expressão, também existem dois termos: o K , interpretado como a pressão interna de um líquido (resultado das forças intermoleculares de coesão), e o H , ligado à tensão superficial. Vide, novamente, a expressão de Laplace:

$$K + \frac{1}{2}H\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)$$

E foi dessa maneira, percebendo a presença de um termo relacionado às forças internas de um material em várias equações – de áreas aparentemente distintas da física –, que van der Waals enveredou na busca pela natureza das forças intermoleculares, um problema que se arrastava a mais de um século. Esse era o real objetivo da tese de doutorado de van der Waals.

Van der Waals estava realmente procurando uma forma de entender as forças intermoleculares que se acreditava desempenhar um papel fundamental na determinação da estrutura e propriedades da matéria. [...] Ele estava se colocando diretamente em uma tradição que remonta diretamente a Newton¹¹⁶ (KLEIN, 1974, p. 31, tradução nossa).

Assim, coube ao professor holandês relacionar as contribuições de Clausius e de Laplace. E ele disse:

“Ocorreu-me [...] que se um gás no estado extremamente diluído, onde o volume é tão grande que as moléculas podem ser consideradas como pontos, consiste em pequenas partículas em movimento, isso é obviamente ainda assim quando o volume é reduzido; e, de fato, tal ainda deve ser o caso até a compressão máxima e também em líquidos, que só podem ser considerados como gases comprimidos a baixa temperatura. Assim, concebi a ideia de que não há diferença essencial entre o estado gasoso e o líquido da matéria”¹¹⁷ (VAN DER WAALS, 1910, p. 254-255, tradução nossa).

Essa ideia da continuidade entre os estados gasoso e líquido da matéria não era inédita. De acordo com Klein (1974):

Em sua discussão sobre líquidos, Clausius enfatizou que as atrações intermoleculares que mantêm o líquido unido são as mesmas atrações mútuas que

¹¹⁶ O texto em língua estrangeira é: “Van der Waals was really looking for a way of grasping the intermolecular forces that were believed to play a fundamental role in determining the structure and properties of matter. [...] He was placing himself squarely in a tradition that goes back directly to Newton”.

¹¹⁷ O texto em língua estrangeira é: “[...] occurred to me at the same time that if a gas in the extremely dilute state, where the volume is so large that the molecules can be regarded as points, consists of small moving particles, this is obviously still so when the volume is reduced; indeed, such must still be the case down to the maximum compression and also in liquids, which can only be regarded as compressed gases at low temperature. Thus I conceived the idea that there is no essential difference between the gaseous and the liquid state of matter”.

entram em ação em um gás somente quando as moléculas chegam perto o suficiente para colidir umas com as outras¹¹⁸ (p. 36, tradução nossa).

Não obstante, foi van der Waals quem reuniu as primeiras evidências (tanto teóricas como empíricas) de que essa hipótese era verdadeira. A tese de van der Waals, defendida no ano de 1873, foi intitulada *Over De Continuïteit Van Den Gas – En Vloeistofoestand* (Sobre a Continuidade do Estado Gasoso e Líquido).

Em sua tese, van der Waals tomou o teorema do virial “expandido” (Equação 10) e substituiu a última parcela (referente às forças internas de um gás) por outro termo de pressão (P’), equivalente à pressão interna do sistema gasoso:

$$\begin{aligned}\sum \frac{m}{2} \bar{v}^2 &= \frac{3}{2} P \cdot V + \underbrace{\frac{1}{2} \sum \overline{\phi_{int}(r)} \cdot r}_{\frac{3}{2} P' \cdot V} \\ \sum \frac{m}{2} \bar{v}^2 &= \frac{3}{2} P \cdot V + \frac{3}{2} P' \cdot V \\ \sum \frac{m}{2} \bar{v}^2 &= \frac{3}{2} (P + P') \cdot V\end{aligned}\quad \text{(Equação 11)}$$

Então, ancorado no conceito de *livre caminho médio*¹¹⁹, proposto por Clausius em 1858 (DONOSO, 20--), van der Waals assumiu que o volume das moléculas não era uma grandeza desprezível na descrição de um gás real. E, dessa forma, passou a considerar que as moléculas possuem um volume próprio (*b*), a partir do qual ajustou a Equação 11¹²⁰:

¹¹⁸ O texto em língua estrangeira é: “In his discussion of liquids Clausius emphasized that the intermolecular attractions keeping the liquid together were the same mutual attractions that came into play in a gas only when the molecules come close enough to collide with one another”.

¹¹⁹ O livre caminho médio é a distância média (*ℓ*) que as partículas de um gás percorrem entre duas colisões sucessivas. Sua fórmula é:

$$\ell = \frac{1}{\pi \cdot d^2 \cdot \frac{n}{V}}$$

onde *d* é o diâmetro molecular (assumindo que as moléculas podem ser concebidas como esferas), *n* é o número de moléculas no sistema e *V* é o volume total do sistema.

¹²⁰ De acordo com a lei de Boyle, formulada para um gás com pressão *P* e volume *V* em temperatura constante: *P* · *V* = *k*. Ou seja:

$$V = \frac{k}{P}$$

Assim, no limite onde a pressão sobre o gás tende ao infinito (uma pressão muito alta), o volume do gás tende a zero, indicando que as moléculas têm um volume desprezível:

$$\lim_{P \rightarrow \infty} V = \lim_{P \rightarrow \infty} \frac{k}{P} = 0$$

$$\sum \frac{m}{2} \bar{v}^2 = \frac{3}{2} (P + P') \cdot (V - b) \quad (\text{Equação 12})$$

O próximo passo foi empregar o *teorema da equipartição da energia*, elucidado por James Clerk Maxwell (1831-1879) (MAXWELL, 1872). O teorema relaciona a energia cinética de um gás à sua temperatura (T), admitindo que R é uma constante:

$$\sum \frac{m}{2} \bar{v}^2 = \frac{3}{2} R \cdot T$$

Aplicando esse teorema na Equação 12, tem-se:

$$\frac{3}{2} R \cdot T = \frac{3}{2} (P + P') \cdot (V - b)$$

Isto é:

$$R \cdot T = (P + P') \cdot (V - b) \quad (\text{Equação 13})$$

Por fim, van der Waals consentiu que, na descrição de um gás real, as forças intermoleculares (F) também deveriam ser consideradas. E essas forças deveriam ser diretamente proporcionais ao quadrado da densidade do gás (ρ):

$$F \propto \rho^2$$

Em outras palavras, elas deveriam ser inversamente proporcionais ao quadrado do volume do gás:

$$F \propto \left(\frac{1}{V}\right)^2$$

Logo, como a pressão é uma grandeza diretamente proporcional à força, van der Waals admitiu que a pressão interna de um gás (P') deveria ser igual a:

Para evitar que esse limite tenda a zero, o que significa admitir que as moléculas de um gás possuem um volume próprio (b), o volume molecular pode ser inserido na primeira equação, subtraindo o volume total do gás:

$$V - b = \frac{k}{P} \quad , \text{ tal que, } \quad V = \frac{k}{P} + b$$

Dessa forma:

$$\lim_{P \rightarrow \infty} V = \lim_{P \rightarrow \infty} \left(\frac{k}{P} + b \right) = b$$

Por isso, na equação de van der Waals, o volume molecular (b) entrou subtraindo o volume total do sistema (V).

$$P' = \frac{a}{V^2} \quad (\text{Equação 14})$$

onde a é uma constante relacionada às forças intermoleculares.

Substituindo essa fórmula da pressão interna na Equação 13, van der Waals obteve sua **equação dos gases reais**:

$$\left(P + \frac{a}{V^2}\right) \cdot (V - b) = R \cdot T \quad (\text{Equação 15})$$

na qual os volumes (V e b) são volumes molares (por mol) e as constantes a e b são obtidas empiricamente. Observe a Tabela 3:

Tabela 3 – Constantes de van der Waals

Gás	Constantes	
	$a \text{ (Pa.m}^6\text{.mol}^{-2}\text{)}$	$b \text{ (10}^{-6} \text{ m}^3\text{.mol}^{-1}\text{)}$
He	0,00345	23,4
H ₂	0,0247	26,6
O ₂	0,138	31,8
CO ₂	0,366	42,9
H ₂ O	0,580	31,9
Hg	0,820	17,0

Fonte: CASTELLAN, 1986, p. 37

Porém, como já fora dito, van der Waals não chegou, simplesmente, à prova teórica (matemática) da continuidade entre os estados gasoso e líquido da matéria. Ele também se encarregou de validar sua equação com dados experimentais.

Van der Waals relacionou a pressão interna de um gás (Equação 14) ao termo K da equação de Laplace, relativo à pressão interna de um líquido; de onde chegou a considerar que (VAN DER WAALS, 1873, p. 96):

$$K = \frac{a}{V^2}$$

Também utilizou sua equação de estado (Equação 15), que é uma equação polinomial de terceiro grau¹²¹, para justificar as isotermas (curvas de pressão *versus* volume) obtidas por

¹²¹ A equação de van der Waals pode ser escrita na forma: $PV^3 - (Pb + RT)V^2 + aV - ab = 0$.

deve ter levado o trabalho à atenção de um círculo muito mais amplo do que o teria visto de outra forma¹²³ (KLEIN, 1974, p. 42, grifo do autor, tradução nossa).

A importância do trabalho de van der Waals é inegável. Ele não propôs, simplesmente, uma fórmula minimamente coerente para as forças intermoleculares. Isso, outros já haviam feito, como John Keill (1671-1721), Joseph Boscovich (1711-1787) e Richard Kirwan (1733-1812). Van der Waals validou sua proposta no “mundo dos fatos”, ele deu concretude a um objeto abstrato, concatenando teoria e experiência. E, dessa maneira, segundo Klein (1974), “ele havia apontado o caminho para um novo método de obtenção de informações moleculares”¹²⁴ (p. 44, tradução nossa).

À vista disso, van der Waals foi laureado com o prêmio Nobel de física de 1910¹²⁵ (THE NOBEL PRIZE, 2023).

Van der Waals foi agraciado com inúmeras honrarias e distinções, das quais se destacam as seguintes. Ele recebeu um doutorado honorário da Universidade de Cambridge; foi nomeado membro honorário da Imperial Society of Naturalists of Moscow, da Royal Irish Academy e da American Philosophical Society; membro correspondente do Institut de France e da Royal Academy of Sciences de Berlin; membro associado da Royal Academy of Sciences da Bélgica; e membro estrangeiro da Chemical Society de Londres, da National Academy of Sciences dos EUA e da Accademia dei Lincei de Roma. [...] Ele morreu em Amsterdã em 8 de março de 1923¹²⁶ (THE NOBEL PRIZE, 2023, tradução nossa).

A partir da obra de van der Waals, dois programas de pesquisa surgiram – obviamente, relacionados entre si. Um, de cunho mais pragmático, voltou-se para a engenharia da liquefação de gases e o aperfeiçoamento da equação de estado dos gases reais. E o outro, mais teórico, se debruçou sobre a natureza das forças intermoleculares, que ainda permanecia uma incógnita, apesar dos avanços (ROWLINSON, 2004).

¹²³ O texto em língua estrangeira é: “Maxwell had read and responded to Van der Waals’s thesis. He reviewed the thesis in *Nature* in 1874 [...] criticizing some of its shortcomings, but his praise of the originality and suggestiveness of Van der Waals’s ideas, his assurance “that there can be no doubt that his name will soon be among the foremost in molecular science”, must have brought the work to the attention of a much wider circle than would otherwise have seen it”.

¹²⁴ O texto em língua estrangeira é: “He had pointed the way to a new method of obtaining molecular information”.

¹²⁵ Recomenda-se a leitura de van der Waals (1910).

¹²⁶ O texto em língua estrangeira é: “Van der Waals was the recipient of numerous honours and distinctions, of which the following should be particularly mentioned. He received an honorary doctorate of the University of Cambridge; was made honorary member of the Imperial Society of Naturalists of Moscow, the Royal Irish Academy and the American Philosophical Society; corresponding member of the Institut de France and the Royal Academy of Sciences of Berlin; associate member of the Royal Academy of Sciences of Belgium; and foreign member of the Chemical Society of London, the National Academy of Sciences of the U.S.A., and of the Accademia dei Lincei of Rome. [...] He died in Amsterdam on March 8, 1923”.

2.2.4.1. A liquefação dos gases permanentes e a equação de estado do virial

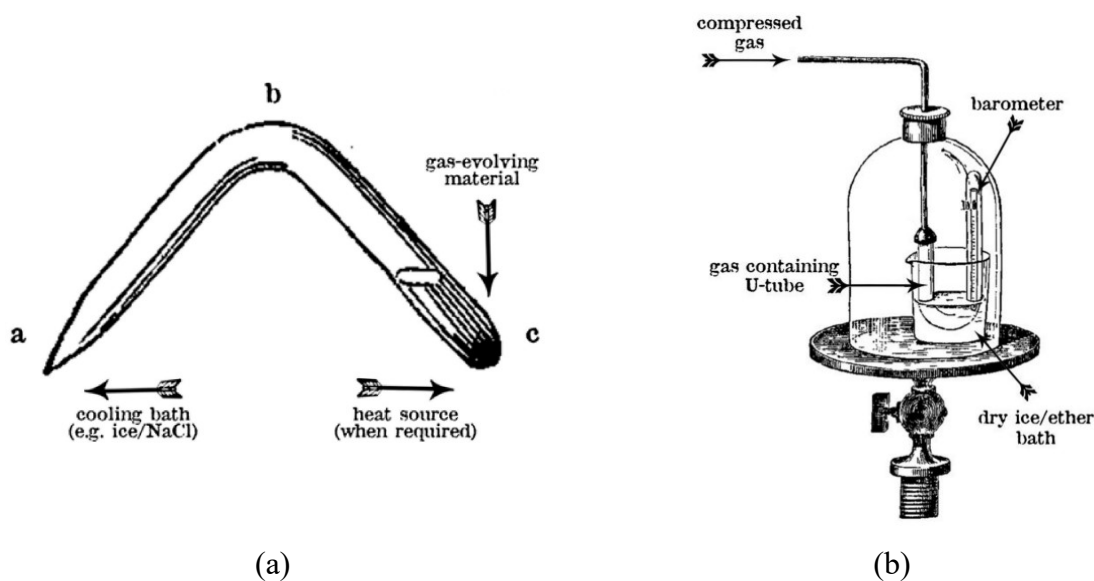
Os trabalhos de Robert Boyle sobre a natureza e as propriedades dos gases influenciaram muitos físicos e químicos a partir do século XVII (GORRI, SANTIN FILHO, 2009). E, dentre os inúmeros interesses desses cientistas que ficaram conhecidos como “os pneumaticistas”, é preciso destacar a *liquefação dos gases*.

Em 1784, Gaspard Monge (1746-1818) e Jean-François Clouet (1751-1801) publicaram a conquista da liquefação do anidrido sulfuroso (SO_2) a baixas temperaturas e altas pressões. Em 1789, Louis-Bernard Guyton de Morveau (1737-1816) comunicou a liquefação da amônia (NH_3) mediante resfriamento.

No entanto, o primeiro trabalho sistematizado e bem documentado sobre a liquefação dos gases só se deu em 1823, sob a autoria de Michael Faraday¹²⁷ (1791-1867) (FABBRIZZI, 2022; LEFÈVRE, 1897). As aparelhagens experimentais utilizadas por Faraday constam na Figura 32.

Em um período anterior a 1873, o ano da publicação da tese do cientista holandês, Faraday conseguiu liquefazer diversas substâncias. Observe a Tabela 4.

Figura 32 – Aparelhagens experimentais utilizadas por Michael Faraday na liquefação de gases (a) em 1823 e (b) em trabalhos posteriores



Fonte: FABBRIZZI, 2022; LEFÈVRE, 1897

¹²⁷ Recomenda-se a leitura de Faraday (1823).

Tabela 4 – Substâncias liquefeitas antes de 1873

FÓRMULA QUÍMICA DO GÁS	DADOS SOBRE A LIQUEFAÇÃO DO GÁS		
	TEMPERATURA DE LIQUEFAÇÃO A 1 atm (°C)	ANO	CIENTISTA RESPONSÁVEL
SO ₂	- 10,0	1784	Gaspard Monge (1746-1818) & Jean-François Clouet (1751-1801)
		1823	Michael Faraday (1791-1867)
NH ₃	- 33,3	1789	Louis-Bernard Guyton de Morveau (1737-1816)
		1823	Michael Faraday (1791-1867)
(CN) ₂	- 21,0	1823	Michael Faraday (1791-1867)
Cl ₂	- 34,6		
H ₂ S	- 60,0		
HBr	- 66,7		
CO ₂	- 78,5		
HCl	- 85,0		
N ₂ O	- 88,5		
HI	- 35,1	Entre 1823 e 1867	
SiF ₄	- 86,0		
BF ₃	- 100,3		
C ₂ H ₄	- 103,7		

Fonte: FABBRIZZI, 2022

Porém, apesar do sucesso na liquefação de várias substâncias, os incontáveis fracassos experimentados com outros compostos deram origem a duas classes de gases. Os *gases não-permanentes* eram os gases que poderiam ser liquefeitos; e os *gases permanentes* eram os gases considerados incapazes de sofrer liquefação, como o oxigênio (O₂), o hidrogênio (H₂), o

nitrogênio (N₂), o monóxido de carbono (CO) e o metano (CH₄) (FABBRIZZI, 2022; LEFÈVRE, 1897; REIF-ACHERMAN, 2011).

Foi a tese de van der Waals, publicada em 1873, que inaugurou o fim dessas ingênuas definições¹²⁸.

Nos primeiros anos do século 20, a geração mais jovem de físicos trabalhando em mecânica estatística estava apreciando as limitações da equação de van der Waals e percebendo que era improvável que qualquer forma simples e fechada de equação descrevesse os fluidos exatamente¹²⁹ (ROWLINSON, 2004, p. 197, tradução nossa).

E, nesse contexto, precisamente no ano de 1902, Heike Kamerlingh Onnes (1853-1926) propôs a **equação de estado do virial**, um “aperfeiçoamento” da equação dos gases reais de van der Waals (ONNES, 1902).

Observe a forma atual da equação virial em termos de volume:

$$\frac{P.V}{R.T} = \left(1 + \frac{B}{V} + \frac{C}{V^2} + \frac{D}{V^3} + \dots \right) \quad (\text{Equação 16})$$

E a equação virial em termos de pressão:

$$\frac{P.V}{R.T} = (1 + B'.P + C'.P^2 + D'.P^3 + \dots) \quad (\text{Equação 17})$$

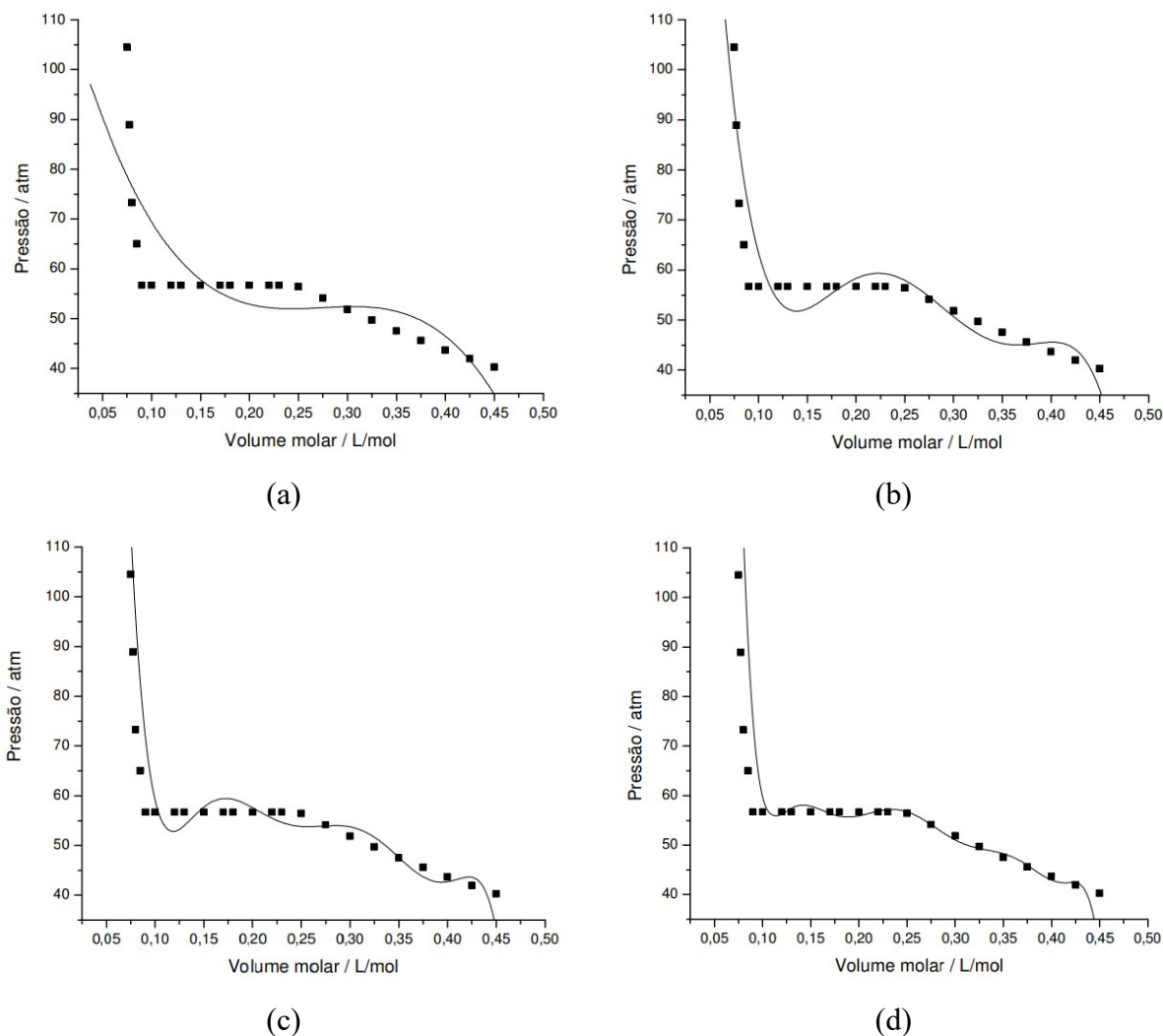
onde V é o volume molar do gás; B e B' são chamados de “segundos coeficientes do virial”, C e C' são chamados de “terceiros coeficientes do virial”, e assim sucessivamente.

De acordo com Magalhães, Fernandes e Cesar (2009), essa nova equação se trata de uma expansão da equação de van der Waals para uma forma polinomial suficientemente grande e capaz de melhor descrever as isotermas de um gás real. Isto é: Quanto maior for o número de constantes viriais (B, B', C, C', D, D' etc.) na equação, mais acertada será a sua curva aos dados experimentais (Figura 33).

¹²⁸ Hoje, sabe-se que os “gases permanentes” são apenas substâncias que apresentam baixíssimas temperaturas de liquefação em pressões moderadas.

¹²⁹ O texto em língua estrangeira é: “In the early years of the 20th century the younger generation of physicists working in statistical mechanics was appreciating the limitations of van der Waals's equation and realising that it was unlikely that any simple closed form of equation would describe fluids exactly”.

Figura 33 – Comparação dos pontos experimentais da isoterma do gás carbônico, a 15 °C, com algumas curvas da equação de estado do virial



Legenda: Os pontos experimentais da isoterma do gás carbônico, a 15 °C, estão representados por quadrados cheios. Em (a), tem-se a curva da equação virial correspondente a um polinômio de grau 3 (como a equação de van der Waals). Em (b), tem-se a curva da equação virial correspondente a um polinômio de grau 5. Em (c), tem-se a curva da equação virial correspondente a um polinômio de grau 7. E, em (d), tem-se a curva da equação virial correspondente a um polinômio de grau 9. Perceba que, quanto maior o grau da equação polinomial, mais a curva teórica se aproxima dos dados empíricos.

Fonte: MAGALHÃES, FERNANDES, CESAR, 2009, p. 15

Assim, de posse da equação de van der Waals, de suas variações e de um conhecimento mais consistente sobre as propriedades críticas dos fluidos, diversos gases tidos como “permanentes” puderam ser liquefeitos (Tabela 5). E, dentre eles, destaca-se o gás hélio (He), que apresenta temperaturas de liquefação próximas do limite inferior de temperatura da natureza (0 K; - 273,15 °C) (REIF-ACHERMAN, 2011).

Tabela 5 – Substâncias liquefeitas depois de 1873

FÓRMULA QUÍMICA DO GÁS	DADOS SOBRE A LIQUEFAÇÃO DO GÁS		
	TEMPERATURA DE LIQUEFAÇÃO A 1 atm (°C)	ANO	CIENTISTA RESPONSÁVEL
O ₂	- 183,0	1877	Louis P. Cailletet (1832-1913) & Raoul P. Pictet (1846- 1926)
ar atmosférico (≈ 0,9% de Ar)	- (- 185,8)	1883	Zygmunt F. von Wroblewski (1845- 1888) & Karol S. Olszewski (1846-1915)
CO	- 191,5		
N ₂	- 195,8		
Ne	- 246,0	Entre 1894 e 1898	William Ramsay (1852-1916)
Ar	- 185,8		
Kr	- 153,4		
Xe	- 108,1		
H ₂	- 252,9	1898	James Dewar (1842-1923)
He	- 268,9	1908	Heike K. Onnes (1853-1926)

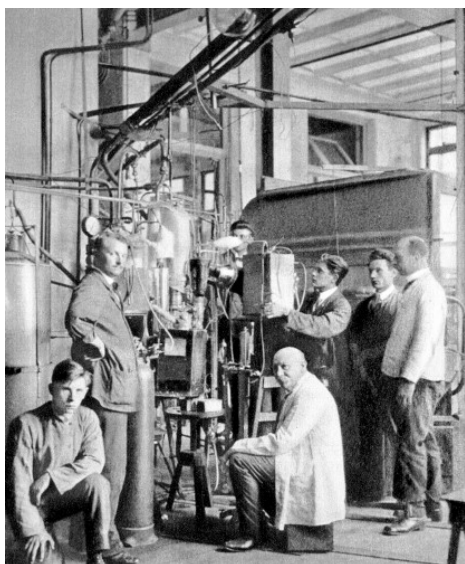
Fonte: FABBRIZZI, 2022; LEFÈVRE, 1897; ONNES, 1908

A liquefação do hélio foi publicada em 1908, também por Heike K. Onnes; e lhe proporcionou, em 1911, a descoberta de outro fenômeno físico: a *supercondutividade*, que consiste na alta condutividade elétrica de materiais submetidos a baixíssimas temperaturas (GOODSTEIN, GOODSTEIN, 2000; REIF-ACHERMAN, 2011). Na Figura 34, pode-se observar fotografias de Onnes com sua equipe (Figura 34a) e com van der Waals (Figura 34b).

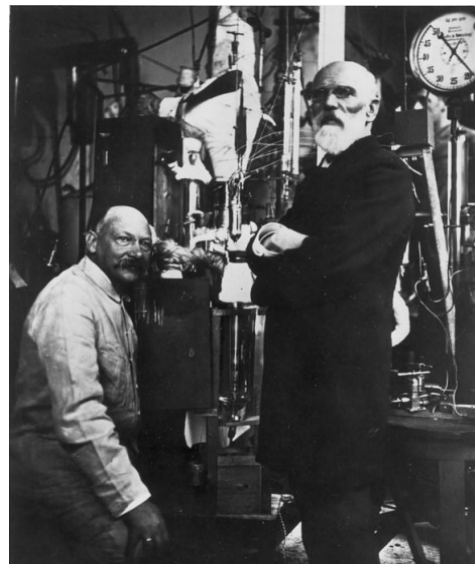
Diante disso, com os holofotes sobre a equação de estado do virial, não demorou pra que diversos pesquisadores se debruçassem na determinação dos coeficientes viriais de

diferentes substâncias químicas¹³⁰ e, posteriormente, relacionassem as magnitudes desses coeficientes à ordem de grandeza das forças intermoleculares (ROWLINSON, 2004).

Figura 34 – Fotografias de Heike Kamerlingh Onnes (a) com sua equipe de trabalho e (b) com van der Waals (à direita)



(a)



(b)

Fonte: DONOSO, 20--, p. 29; GOODSTEIN, GOODSTEIN, 2000, p. 36

Os segundos coeficientes viriais (B e B' das Equações 16 e 17, respectivamente) passaram a ser “rigorosamente relacionado[s] a uma integral da energia potencial entre um par de moléculas”¹³¹ (ROWLINSON, 2004, p. 197, tradução nossa). Em Jones (1924), é possível ver a citação de uma dessas relações, elucidada para moléculas esféricas (altamente simétricas):

$$B = 2\pi N \int_0^{\infty} r^2 \left(1 - e^{\frac{U(r)}{kT}} \right) dr$$

¹³⁰ A fim de conhecer a natureza das forças intermoleculares, várias substâncias foram empregadas tanto para os cálculos teóricos como para as medições experimentais do segundo coeficiente do virial: pares de átomos de hidrogênio com spins paralelos; átomos de hélio, neônio, argônio e de outros gases nobres; moléculas diatômicas, como as dos gases hidrogênio (H₂), nitrogênio (N₂), oxigênio (O₂), fluoreto de hidrogênio (HF) e cloreto de hidrogênio (HCl); e, por fim, moléculas poliatômicas, como as de hidrocarbonetos simples, a amônia (NH₃) e a água (H₂O). No entanto, até a década de 1920, “nenhum dos cálculos eletrostáticos feitos conseguia descrever [satisfatoriamente] o comportamento dessas substâncias” (ROWLINSON, 2004, p. 202).

¹³¹ O texto em língua estrangeira é: “[...] to be rigorously related to an integral of the potential between a pair of molecules”.

onde N é o número de moléculas do sistema gasoso, k é a constante de Boltzmann¹³², T é a temperatura e $U(r)$ é a energia potencial intermolecular, uma função da força de atração entre as moléculas, o que, por sua vez, dependeria de uma coordenada espacial r :

$$U(r) = - \int_r^{\infty} f(r) dr$$

Restara, então, conhecer a natureza de $f(r)$, a natureza das forças intermoleculares.

2.2.4.2. As “moléculas elétricas”

Foi o segundo programa de pesquisa derivado do trabalho de van der Waals que se encarregou de elucidar a natureza das forças intermoleculares. Nesse âmbito, a possibilidade das forças coesivas serem de natureza gravitacional já havia sido descartada há várias décadas. Por outro lado, a existência de forças eletrostáticas entre espécies atômicas já tinha sido uma ideia adotada por certos grupos de cientistas do século XIX. De acordo com Rowlinson (2004):

Uma relação íntima entre forças elétricas e ligações químicas tinha sido um lugar comum da discussão teórica ao longo do século XIX. Originou-se inicialmente dos experimentos e especulações de Davy [1778-1829] e Berzelius [1779-1848], mas logo ficou claro que tais forças eram [...] aplicáveis a muitos compostos inorgânicos, mas de pouca utilidade na interpretação da composição e estrutura dos compostos orgânicos. A relação entre átomos e eletricidade foi colocada em “pé de igualdade” com as leis de eletrólise de Faraday [1791-1867] de 1832-1833. Essas leis carregam a importante implicação de que, se a matéria é composta de átomos discretos, a eletricidade também deve ser “atômica”. [...] [E] o trabalho de Arrhenius [1859-1927] ampliou a compreensão de soluções aquosas condutoras e não-condutoras [de eletricidade], um campo frutífero que levou ao amadurecimento da nova disciplina físico-química¹³³ (p. 196, tradução nossa).

¹³² A constante de Boltzmann faz referência ao físico austríaco Ludwig Eduard Boltzmann (1844-1906) e possui valor igual a, aproximadamente, $1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$.

¹³³ O texto em língua estrangeira é: “An intimate relation between electrical forces and chemical bonding had been a commonplace of theoretical discussion throughout the 19th century. It stemmed initially from the experiments and speculations of Davy and Berzelius, but it soon became clear that such forces were [...] applicable to many inorganic compounds but of little use in interpreting the composition and structure of organic compounds. The relationship between atoms and electricity was put on a quantitative footing with Faraday’s laws of electrolysis of 1832–1833 [...]. These laws carry the important implication that if matter is composed of discrete atoms then electricity must also be ‘atomic’ [...]. Arrhenius’s work extended the understanding of conducting and non-conducting aqueous solutions and it was this fruitful field that led to the coming of age of the new discipline of physical chemistry”.

Todavia, no momento histórico em que foram propostas, essas (importantes) contribuições que relacionavam a eletricidade às espécies atômicas não geraram grandes impactos na discussão sobre as forças intermoleculares. Foi somente nos primeiros anos do século XX que a natureza elétrica passou a ser fortemente cogitada para as forças coesivas da matéria, vindo a atrair importantes nomes da ciência. E, aqui, vale questionar: O que provocou essa “reviravolta”? A descoberta dos elétrons em 1897, por Joseph John Thomson (1856-1940) (ROWLINSON, 2004).

O raciocínio foi imediato: Se os átomos são constituídos por elétrons e as moléculas são conjuntos de átomos, as moléculas também são constituídas por elétrons. Logo, tornou-se coerente admitir que as interações intermoleculares pudessem ter uma natureza eletrostática.

Max Reinganum (1876-1914) foi quem primeiro explorou a relação do segundo coeficiente do virial com uma integral de energia potencial elétrica – ou seja, um potencial definido em termos de forças de natureza eletrostática. E, segundo Rowlinson (2004):

Os jovens físicos holandeses com quem ele [Reinganum] trabalhou também fizeram essa conexão; e os primeiros vinte anos do novo século foram marcados por uma série de artigos nos quais modelos elétricos de moléculas foram concebidos e sua validade, ou não, testada por comparação de sua integral com os valores observados do segundo coeficiente virial¹³⁴ (p. 197, tradução nossa).

Johannes van Laar (1860-1938), por exemplo, admitiu que, em distâncias relativamente grandes, as forças intermoleculares eram atrativas; e que, em curtas distâncias, essas forças se tornariam repulsivas. Mas, apesar do seu modelo ser mais realista do que o de Reinganum, suas integrações do segundo coeficiente do virial não foram eficazes na explicação dos dados experimentais (ROWLINSON, 2004).

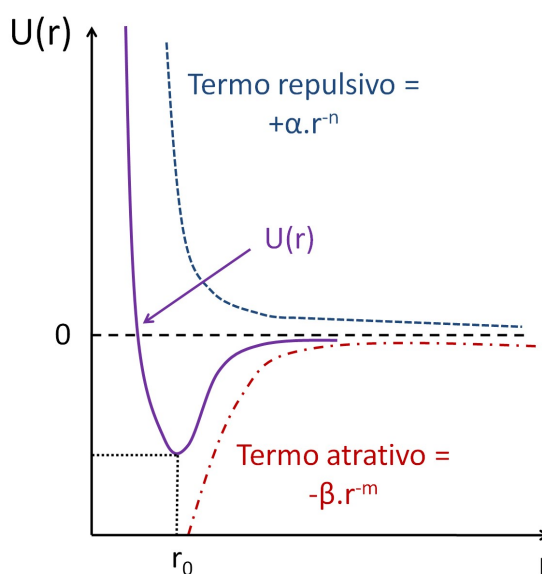
Também havia cientistas que abordavam o problema da natureza das forças intermoleculares de outras perspectivas. Gustav Mie (1868-1957), partindo da mesma premissa de van Laar, considerou outra expressão para a energia potencial intermolecular (MIE, 1903). A forma atualizada da sua expressão é dada por:

$$U(r) = \frac{\alpha}{r^n} - \frac{\beta}{r^m} \quad (\text{Equação 18})$$

¹³⁴ O texto em língua estrangeira é: “The young Dutch physicists with whom he worked made this connection also and the first twenty years of the new century were marked by a stream of papers in which electrical models of molecules were devised and their validity, or otherwise, tested by comparison of their integral with the observed values of the second virial coefficient”.

onde a energia potencial intermolecular resulta da soma de dois termos. O primeiro ($+\alpha r^{-n}$), de valor positivo, corresponde à energia da repulsão elétrica existente entre as moléculas. E o segundo ($-\beta r^{-m}$), negativo, corresponde à energia da atração elétrica. Assim, admitindo que $n > m$, a expressão da energia potencial intermolecular apresentaria uma distância (r_0) na qual duas entidades moleculares, interagindo entre si, constituiriam um sistema estável (Figura 35).

Figura 35 – Curvas da função de energia potencial de Gustav Mie



Fonte: O autor, 2024

De acordo com Rowlinson (2004), muitos cientistas seguiram o pensamento de Mie. Contudo, num primeiro momento, os resultados obtidos também se mostraram igualmente embaraçosos – várias propostas distintas foram feitas para os valores de n e de m da equação de Mie.

Até que, em 1908, o filho de van der Waals, chamado J. D. van der Waals Jr. (1873-1971), tendo continuado o programa de pesquisa de seu pai, assumiu a natureza eletrostática para as forças intermoleculares e introduziu, nesse campo, o conceito de *dipolo elétrico*. O dipolo, em uma molécula, consistiria em dois polos com cargas elétricas parciais de mesma intensidade, mas de sinais opostos (por exemplo, $-\delta$ e $+\delta$). A causa do dipolo seria uma distribuição não-homogênea da densidade eletrônica da própria molécula. Assim, uma vez separadas por uma distância intramolecular $\vec{d}$, essas cargas elétricas parciais formariam um *momento dipolar* ($\vec{\mu}$), cujo módulo seria dada por (ROWLINSON, 2004):

$$|\vec{\mu}| = \delta \cdot |\vec{d}| \quad (\text{Equação 19})$$

Somente de posse desses conceitos que Willem Hendrik Keesom¹³⁵ (1876-1956), durante os anos de 1912 a 1922, descreveu as forças intermoleculares do tipo “dipolo permanente-dipolo permanente” (ou, simplesmente, “dipolo-dipolo”), que acontecem entre moléculas polares (dotadas de um momento dipolar com módulo diferente de zero). E, durante os anos de 1920 e 1921, Peter Josephus W. Debye (1884-1966) descreveu as forças intermoleculares do tipo “dipolo permanente-dipolo induzido”, que acontecem entre moléculas polares e moléculas apolares (dotadas de um momento dipolar com módulo igual a zero) (ISRAELACHVILI, 2011; ROWLINSON, 2004).

A explicação de Debye para as interações do tipo “dipolo permanente-dipolo induzido” seria a existência de um *efeito indutivo*, onde as cargas elétricas parciais da molécula polar induziriam a formação de cargas parciais na molécula que, *a priori*, era apolar, deformando sua “nuvem” eletrônica (isto é, a distribuição dos elétrons ao longo da molécula) (ISRAELACHVILI, 2011; ROWLINSON, 2004). Finalmente, o problema da natureza das forças intermoleculares (que já se arrastava há séculos) estava recebendo suas primeiras soluções.

Nesse momento, entretanto, faltava descrever a forma matemática das forças do tipo “dipolo induzido-dipolo induzido”, que acontecem entre moléculas apolares. Mas o fato é que todas as conquistas mencionadas até então para a elucidação das forças de coesão da matéria baseavam-se no arcabouço teórico da física clássica. E essa física demonstrava-se cada vez mais inapropriada para elucidar as interações entre essas moléculas com momento dipolar nulo.

A percepção de que a mecânica clássica era inadequada para sistemas atômicos cresceu de forma constante depois que, primeiro, Planck e, depois, Einstein, Bohr e outros descobriram que a quantização da energia removia muitas das “nuvens” [...] que estavam obscurecendo a compreensão das propriedades ópticas, elétricas, mecânicas e térmicas da matéria. As regras de quantização foram inicialmente ad hoc, cada uma foi inventada para racionalizar um fenômeno particular; mas uma base coerente para uma nova mecânica foi desenvolvida em 1925 e 1926. A forma mais frutífera – a mecânica ondulatória de Erwin Schrödinger – foi aplicada com surpreendente velocidade e sucesso a uma ampla gama de fenômenos físicos e químicos¹³⁶ [...] (ROWLINSON, 2004, p. 235, tradução nossa).

¹³⁵ W. H. Keesom também realizou medições do segundo coeficiente da equação virial. E, em 1926, publicou a solidificação do hélio. Vide obras de 1915 e 1926.

¹³⁶ O texto em língua estrangeira é: “The realisation that classical mechanics was inappropriate for atomic systems grew steadily after first Planck and later Einstein, Bohr and others, found that the quantisation of energy removed many of the ‘clouds’ [...] that were obscuring the understanding of the optical, electrical, mechanical and thermal properties of matter. The rules for quantisation were at first ad hoc, each was invented to rationalise

Assim, à medida que a física quântica foi se desenvolvendo na década de 20 e sendo empregada no tratamento das forças intermoleculares, resultados promissores começaram a ser novamente publicados.

Em 1924, vale mencionar que o cientista John Edward Lennard-Jones (1894-1954) chegou a um resultado satisfatório para os expoentes n e m da equação de Gustav Mie (JONES, 1924). A teoria quântica assegurou o valor de $m = 6$ para o termo atrativo do potencial intermolecular¹³⁷. E o valor de $n = 12$, para o termo repulsivo, foi escolhido por conveniência matemática, uma vez que fora demonstrado que qualquer número dentro do intervalo de 14 ± 5 concordava razoavelmente com os dados experimentais (ISRAELACHVILI, 2011). Assim, obteve-se a equação:

$$U(r) = \frac{\alpha}{r^{12}} - \frac{\beta}{r^6} \quad (\text{Equação 20})$$

Porém, foi somente em 1930 que Fritz Wolfgang London (1900-1954), um aluno de Schrödinger (Figura 36) municiado de uma mecânica quântica apurada, descreveu as forças intermoleculares do tipo “dipolo induzido-dipolo induzido”, adaptando a ideia de efeito indutivo utilizada por Peter Debye (FABBRIZZI, 2022; ISRAELACHVILI, 2011; LONDON, 1936; ROWLINSON, 2004).

Figura 36 – Erwin Schrödinger e Fritz London (à direita) em Berlim, em 1928



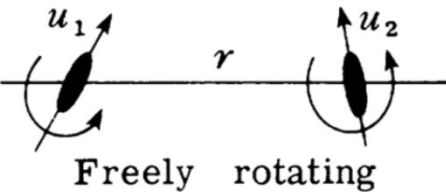
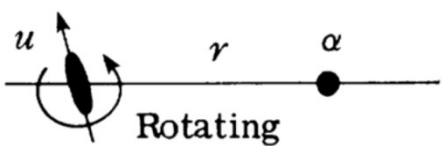
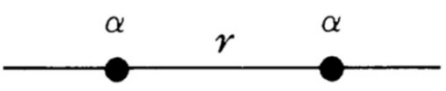
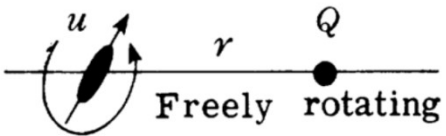
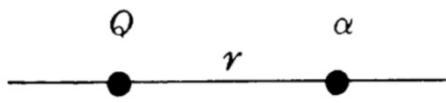
Fonte: FABBRIZZI, 2022, p. 10

a particular phenomenon, but a coherent basis for a new mechanics was developed in 1925 and 1926. The most fruitful form – Erwin Schrödinger’s wave mechanics – was applied with astonishing speed and success to a wide range of physical and chemical phenomena”.

¹³⁷ Note que o expoente $m = 6$, do termo atrativo do potencial intermolecular de Lennard-Jones, concorda com as soluções de Keesom, de Debye e de London, registradas na Tabela 6.

A partir da contribuição de London, outros tipos de forças que envolvem moléculas (entidades moleculares eletricamente neutras) passaram a ser descritas com relativa facilidade – como é o caso das interações do tipo íon-dipolo. Observe a Tabela 6.

Tabela 6 – Forma matemática dos potenciais das forças de van der Waals

TIPO DE INTERAÇÃO		ENERGIA POTENCIAL ASSOCIADA
NOME	REPRESENTAÇÃO	
Dipolo permanente – Dipolo permanente (Força de Keesom)		$-\frac{2}{3kT} \left(\frac{u_1 \cdot u_2}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \frac{1}{r^6}$
Dipolo permanente – Dipolo induzido (Força de Debye)		$-\frac{u^2 \alpha}{(4\pi\epsilon_0)^2} \frac{1}{r^6}$
Dipolo induzido – Dipolo induzido (Força de London)		$-\frac{3}{4} \frac{\alpha^2 I}{(4\pi\epsilon_0)^2} \frac{1}{r^6}$
Íon – Dipolo permanente		$-\frac{1}{6kT} \frac{u^2 Q^2}{(4\pi\epsilon_0)^2} \frac{1}{r^4}$
Íon – Dipolo induzido		$-\frac{1}{2} \frac{\alpha Q^2}{(4\pi\epsilon_0)^2} \frac{1}{r^4}$

Legenda: u corresponde ao módulo de um vetor momento dipolar, onde, para o caso da interação entre duas moléculas polares distintas, tem-se u_1 e u_2 ; α é uma medida da polarizabilidade¹³⁸ de uma molécula apolar; Q é a carga elétrica de um íon; I é a primeira energia de ionização de uma espécie atômica (o que indica que a fórmula tabelada do potencial da força de London foi deduzida para o caso de uma interação entre átomos do mesmo elemento químico); r é a distância entre as entidades moleculares; k é a constante de Boltzmann; T é a temperatura absoluta (em kelvin) e, por fim, ϵ_0 é a constante de permissividade elétrica do vácuo (aproximadamente, $8,8 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2 \cdot \text{J}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$).

Fonte: FABBRIZZI, 2022; ISRAELACHVILI, 2011

¹³⁸ A polarizabilidade de um átomo ou de uma molécula é uma grandeza que expressa a facilidade de deformação de sua nuvem eletrônica (ATKINS, JONES, 2012).

Todas essas forças agora elucidadas (a de Keesom, a de Debye e a de London) passaram a ser chamadas de “forças de van de Waals”, como forma de homenagem ao cientista holandês (FABBRIZZI, 2022).

E sabe-se que todas elas contribuem na coesão de substâncias formadas por átomos isolados ou moléculas. É válido, por exemplo, escrever a energia potencial intermolecular levando em consideração os potenciais de todas essas forças:

$$U(r)_{total} = U(r)_{Keesom} + U(r)_{Debye} + U(r)_{London} \quad (\text{Equação 21})$$

E a Tabela 7 confirma a contribuição dessas três forças intermoleculares na coesão de diferentes substâncias químicas:

Tabela 7 – Contribuições percentuais das energias potenciais intermoleculares de Keesom, de Debye e de London na coesão de duas moléculas idênticas de diferentes substâncias químicas a 300 K, interagindo no vácuo a uma distância de 20 Å

FÓRMULA MOLECULAR	CONTRIBUIÇÕES PERCENTUAIS		
	$U(r)_{Keesom}$	$U(r)_{Debye}$	$U(r)_{London}$
HCℓ	7,4	4,6	88,0
HBr	1,6	2,4	96,0
HI	0,1	0,6	99,3
CHCℓ ₃	1,0	1,6	97,4

Fonte: FABBRIZZI, 2022, p. 11 (adaptado)

Dessa maneira, estava resolvido em boa medida, o mistério que se estendia desde a Antiguidade: Como as partículas componentes da matéria interagem entre si.

No início da década de 1970, os *problemas centrais* da coesão haviam sido resolvidos em princípio. As forças atrativas ou de dispersão podiam ser calculadas a partir de uma teoria bem fundamentada (a mecânica quântica); a forma e a magnitude do restante do potencial intermolecular podiam ser encontradas a partir das propriedades do gás diluído, e esse potencial podia ser usado em outra teoria bem fundamentada (a mecânica estatística) para calcular as propriedades dos sólidos e, por fim, também dos líquidos¹³⁹ (ROWLINSON, 2004, p. 290, grifo nosso, tradução nossa).

¹³⁹ O texto em língua estrangeira é: “Thus by the early 1970s the core problems of ‘cohesion’ had been solved in principle. The attractive or dispersion forces could be calculated from a well-founded theory (quantum mechanics), the form and magnitude of the rest of the intermolecular potential could be found from the properties of the dilute gas, and this potential could be used in another well-founded theory (statistical mechanics) to calculate the properties of solids and, at last, of liquids also”.

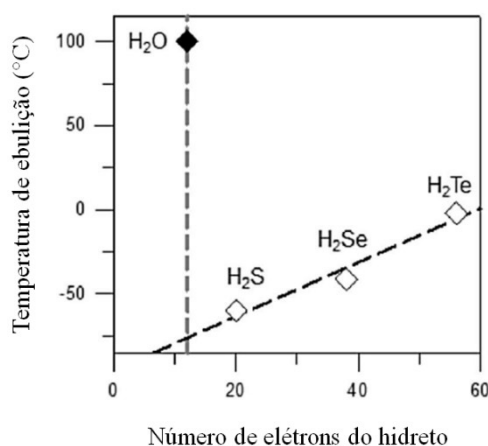
Os problemas que restaram, na quase totalidade, voltam-se para sistemas mais complexos, como é o caso dos polímeros, das micelas, dos colóides e das interações em sistemas biológicos. E, segundo Rowlinson (2004), “esses campos são imensos e muito trabalho está sendo feito agora, mas o progresso em direção à sua solução [...] é lento e necessariamente longe de ser gracioso”¹⁴⁰ (p. 262, tradução nossa).

Aqui, a história do conceito de interação intermolecular parece ter sido encerrada. No entanto, para completar o perfil epistemológico do conceito sob análise, é preciso retornar brevemente ao final do século XIX, ao prólogo de uma série de discussões voltadas, especificamente, para uma substância que, apesar de essencial e comum, é bastante complexa: a água.

2.2.5. A água e as ligações hidrogênio

Do final do século XIX ao início do XX, uma sucessão de observações sobre as propriedades “anômalas” da água e de suas misturas com outras substâncias foi publicada (HERBST, MONTEIRO FILHO, 2019). Dentre essas propriedades, pode-se citar como exemplo, a diferença grosseira da temperatura de ebulição da água com relação aos demais hidretos da família 16 da tabela periódica (os calcogênios) – observe a Figura 37.

Figura 37 – Gráfico das temperaturas de ebulição dos hidretos dos calcogênios em função de seus números de elétrons



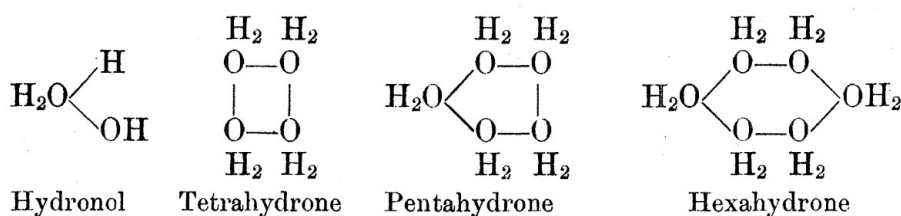
Fonte: FABBRIZZI, 2022 (adaptado)

¹⁴⁰ O texto em língua estrangeira é: “These fields are immense and much work is now being done, but progress towards their solution [...] is slow and necessarily far from elegant”.

Então, diante do volume dessas observações, fez-se necessária, a elaboração de um modelo teórico que as explicasse. E uma proposta bem sucedida na época foi feita pelo químico britânico Henry Edward Armstrong (1848-1937) em 1908. Para Armstrong,

a água seria uma mistura complexa formada pela “associação” de unidades moleculares fundamentais chamadas *hidrona* (OH_2), as quais formariam vários polimorfos em função da temperatura, sendo essa a explicação para as propriedades “anômalas” da água. [...] A *hidrona* seria o componente volátil da água, e a pressão de vapor estaria relacionada à proporção de *hidrona* na água. A proporção de moléculas de *hidrona* na água comum deveria ser pequena, pois se a água fosse apenas uma coleção de moléculas de *hidrona*, o ponto de ebulição do líquido seria muito menor, e seu ponto de congelamento também seria muito mais baixo (HERBST, MONTEIRO FILHO, 2019, p. 11-12, grifo do autor).

Figura 38 – Polimorfos da hidrona de acordo com Armstrong, em 1923



Fonte: ARMSTRONG, 1923, p. 611

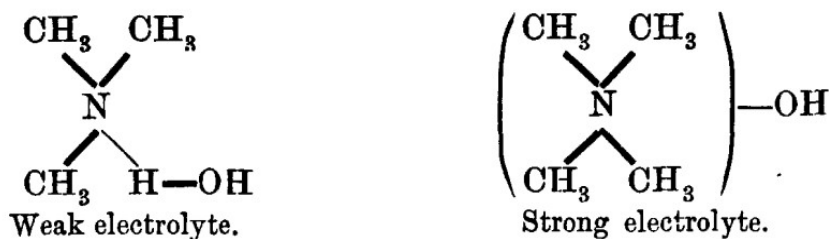
A Figura 38 ilustra diversos “graus de associação” das hidronas. Nessa figura, é interessante notar que, apesar das hidronas possuírem a mesma fórmula molecular da água, seus átomos de oxigênio podem realizar mais do que duas ligações químicas na formação dos polimorfos – o que não concorda com o pensamento químico atual, onde o oxigênio é tido como um elemento bivalente. Ainda assim, como salientam Herbst e Monteiro Filho (2019), a teoria das hidronas conseguiu resistir até a primeira metade da década de 1920, como indica a data do artigo que referencia a Figura 38.

O ponto é que, apesar da composição da água já ser conhecida há décadas, pouco se sabia sobre a estrutura molecular dessa substância nesse período, e uma teoria moderna das ligações químicas ainda seria elaborada.

Em 1912, estudando a condutividade elétrica de soluções aquosas de uma variedade de aminas e sais de amônio, Tom Sidney Moore (1881-1966) e Thomas Field Winmill propuseram, pela primeira vez, a existência das *ligações hidrogênio* – ainda que esse termo não tenha sido utilizado no artigo intitulado “The State of Amines in Aqueous Solution”. Segundo Fabbrizzi (2022),

eles mediram a condutividade de soluções aquosas de uma variedade de amins e sais de amônio e observaram que o hidróxido de trimetilamônio é um eletrólito fraco (uma base fraca), enquanto o hidróxido de tetrametilamônio é um eletrólito forte (uma base forte). Eles interpretaram tal comportamento com base nas fórmulas estruturais [...] [Figura 39]. Eles declararam: “As fórmulas a seguir, onde traços grossos significam uniões fortes e traços finos, uniões fracas, mostram aproximadamente a diferença entre hidróxido de trimetilamônio e hidróxido de tetrametilamônio”. Os traços grossos identificaram, implicitamente, o que G. N. Lewis estava, naqueles anos, definindo como ligações covalentes. E a linha fina na fórmula [do hidróxido de trimetilamônio], o elo mais fraco, corresponde a uma *ligação de hidrogênio*¹⁴¹ (p. 12, grifo nosso, tradução nossa).

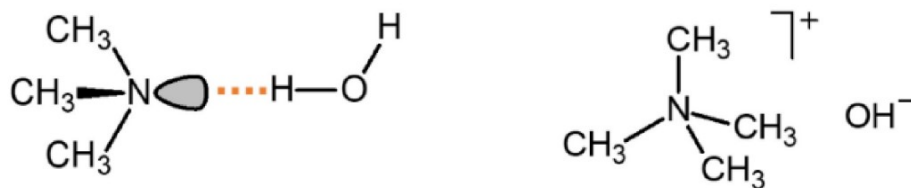
Figura 39 – Representações estruturais do hidróxido de trimetilamônio (à esquerda) e do hidróxido de tetrametilamônio (à direita) feitas por Moore e Winmill, em 1912



Fonte: MOORE, WINMILL, 1912, p. 1675

Essas fórmulas são, inclusive, muito semelhantes às atuais, dadas na Figura 40, onde a *ligação hidrogênio* é representada por uma linha pontilhada de cor vermelha.

Figura 40 – Representações estruturais atualizadas do hidróxido de trimetilamônio (à esquerda) e do hidróxido de tetrametilamônio (à direita)



Fonte: FABBRIZZI, 2022, p. 12

¹⁴¹ O texto em língua estrangeira é: “They measured the conductivity of aqueous solutions of a variety of amines and ammonium salts, and observed that trimethylammonium hydroxide is a weak electrolyte (a weak base), whereas tetramethylammonium hydroxide is a strong electrolyte (a strong base). They interpreted such behaviour on the basis of the structural formulas [...]. They stated: “The following formulae, where thick strokes mean strong unions and thin strokes weak unions, show roughly the difference between trimethylammonium hydroxide and tetramethylammonium hydroxide”. Thick strokes implicitly identified what G. N. Lewis was in these years defining covalent bonds. The thin line in formula a, the weaker link, corresponds to a hydrogen bond”.

Segundo Herbst e Monteiro Filho (2019), pouco se sabe sobre a receptividade da comunidade científica da época a esse artigo, a não ser uma nota pessoal de um editor da revista *Nature Chemistry*.

Em 1916, com o objetivo de explicar as ligações químicas considerando a natureza elétrica dos átomos, Gilbert Lewis (1875-1946) publicou o artigo “The Atom and The Molecule”, que inaugurou a conhecida *teoria das ligações de valência* – empregada até os dias de hoje para compreender a formação e a estrutura dos compostos químicos (LEWIS, 1916). No mesmo ano, Walther Kossel (1888-1956) sugeriu que a molécula de água teria uma geometria linear e simétrica (Figura 41), mas essa alegação foi profundamente criticada por diversos cientistas, pois, de 1914 a 1919, diferentes pesquisas experimentais demonstraram que a molécula de água é polar¹⁴², isto é, que possui um momento dipolar diferente de zero (ROWLINSON, 2004).

Figura 41 – Representação da molécula de água feita por W. Kossel, em 1916



Fonte: KOSSEL, 1916, p. 321

Então, em 1920, outro trabalho se somou à contribuição de Moore e Winmill na conceituação das *ligações hidrogênio*: o artigo “Polarity and Ionization from the Standpoint of the Lewis Theory of Valence”, de Wendell M. Latimer (1893-1955) e Worth H. Rodebush (1887-1959). Nesse artigo, Latimer e Rodebush – já bastante influenciados pela teoria de Lewis, como o título deixa claro – analisaram a ionização de compostos inorgânicos em solventes de diferentes polaridades. E ao tratarem do fenômeno da coesão entre moléculas de água, eles escreveram:

“[...] Em termos da teoria de Lewis, um par livre de elétrons em uma molécula de água poderia ser capaz de exercer força suficiente sobre um hidrogênio mantido por um par de elétrons em outra molécula de água para unir as duas moléculas”¹⁴³ (LATIMER, RODEBUSH, 1920, p. 1431, tradução nossa).

¹⁴² As medições do momento dipolar da água envolveram personalidades como J. J. Thomson, G. Holst e M. Jona (ROWLINSON, 2004).

¹⁴³ O texto em língua estrangeira é: “[...] in terms of the Lewis theory, a free pair of electrons on one water molecule might be able to exert sufficient force on a hydrogen held by a pair of electrons on another water molecule to bind the two molecules together”.

Por fim, essa ideia de que o hidrogênio poderia mediar a interação entre duas moléculas de água foi corroborada com a ilustração da Figura 42a; e também foi usada na explicação de outras substâncias, como o hidróxido de amônio (NH_4OH), representado na Figura 42b.

Figura 42 – Representações moleculares de Latimer e Rodebush, em 1920



Fonte: LATIMER, RODEBUSH, 1920, p. 1431

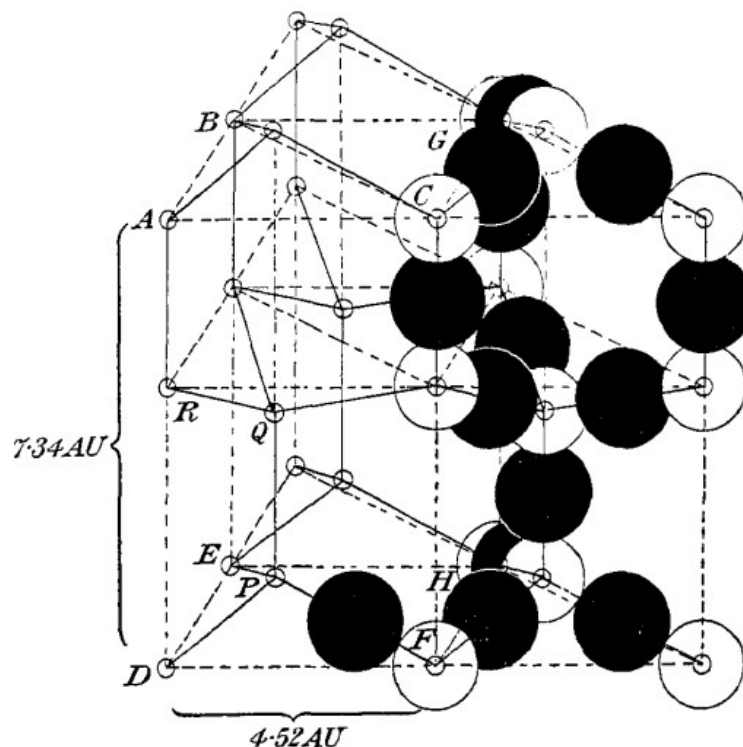
Sobre a recepção desse artigo na época, Herbst e Monteiro Filho (2019) relatam que ele sofreu uma forte oposição. Nas palavras dos comentadores:

Ao contrário do que se poderia supor, a proposta das ligações hidrogênio, embora oferecesse uma explicação razoável para as propriedades da água, além de várias outras “anomalias” de solventes e compostos orgânicos, não foi bem recebida sequer pelos colegas de departamento de Latimer e Rodebush, incluindo o próprio G. N. Lewis (HERBST, MONTEIRO FILHO, 2019, p. 12).

Em 1922, com o aprimoramento da técnica de análise por difração de raios-X, William Bragg (1862-1942) propôs uma estrutura para a água sólida. Ele assumiu que os cristais de água seriam formados por cátions hidrogênio (H^+) e ânions de oxigênio (O^{2-}) (Figura 43) (BRAGG, 1922). No entanto, sua ideia também não logrou êxito, pois, com a coerência dos trabalhos de Lewis, boa parte da comunidade científica já havia se convencido de que a água seria uma substância molecular (e não iônica), independentemente do estado físico (ROWLINSON, 2004).

No contexto das pesquisas sobre a estrutura molecular da água, também é preciso citar que, ante a várias medições do momento dipolar dessa substância, alguns cientistas até sugeriram que ela pudesse ter uma geometria linear e assimétrica. Contudo, em 1929, Peter Debye (o mesmo que descreveu as forças intermoleculares do tipo dipolo permanente-dipolo induzido) prontamente declarou que essa estrutura também não seria estável (ROWLINSON, 2004).

Figura 43 – A estrutura cristalina da água, proposta por William Bragg em 1922



Legenda: Os cátions hidrogênio estão representados por círculos pretos, enquanto que os ânions de oxigênio estão representados por círculos brancos.

Fonte: BRAGG, 1922, p. 99

O envolvimento de Debye nos problemas sobre a estrutura da água marcou, definitivamente, a história do conceito de ligação hidrogênio. Infelizmente, de acordo com Herbst e Monteiro Filho (2019), “as ligações hidrogênio foram paulatinamente elevadas à categoria de [...] [forças] intermoleculares do tipo dipolo-dipolo, consenso que adquiriu o status de dogma para a comunidade dos químicos” (p. 13).

No início da década de 30, a teoria das ligações de valência recebeu importantes acréscimos do químico estadunidense Linus Carl Pauling (1901-1994), através de um conjunto de artigos¹⁴⁴ publicados de 1929 a 1933 (PAULING, 1929, 1931a, 1931b, 1932a, 1932b, 1933).

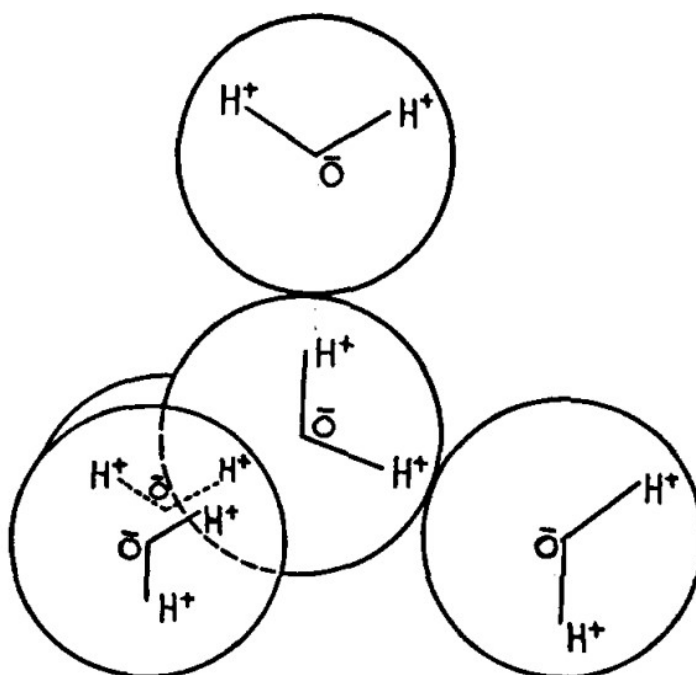
[E] é curioso notar que coube ao próprio Pauling, no início dos anos 1930, o reforço da interpretação puramente eletrostática das *ligações hidrogênio*, enquanto estudava as estruturas cristalinas de vários compostos inorgânicos, como, por exemplo, do hidrogenofluoreto de amônio, NH_4HF_2 [...]. Essa interpretação foi posteriormente abandonada (silenciosamente...) por Pauling, em favor de estruturas de ressonância,

¹⁴⁴ Esse conjunto de artigos deu origem ao livro “The Nature of the Chemical Bond and the Structure of Molecules and Crystals” (A Natureza da Ligação Química e a estrutura das Moléculas e dos Cristais), cuja primeira edição foi publicada entre 1938 e 1939 (PAULING, 1960).

em maior acordo com a teoria de ligação de valência, quando iniciou seus estudos de cristalografia de compostos orgânicos. [Ainda] assim, quase um século após o surgimento da definição da *ligação hidrogênio*, e mesmo considerando o formidável avanço nas técnicas espectroscópicas e da química quântica no período, os químicos continuam repetindo o mantra das “interações dipolo-dipolo” (HERBST, MONTEIRO FILHO, 2019, p. 12-13, grifo nosso).

Pois bem... No ano de 1933, John Desmond Bernal (1901-1971) e Ralph Howard Fowler (1889-1944), combinando resultados de diferentes técnicas – como a difração de raios-X e a espectroscopia no infravermelho –, elucidaram a real geometria da molécula de água: uma geometria angular (com ângulo de ligação de, aproximadamente, $104,5^\circ$). E, a partir dessa constatação, também explicaram várias propriedades dessa substância, como sua constante dielétrica, sua estrutura cristalina, a variação de sua densidade com a temperatura e a viscosidade de suas soluções com compostos iônicos diluídos e com ácidos concentrados (BERNAL, FOWLER, 1933). A Figura 44, extraída do artigo de Bernal e Fowler, faz um esboço do arranjo de cinco moléculas de água no gelo.

Figura 44 – Arranjo tetraédrico de cinco moléculas de água no gelo



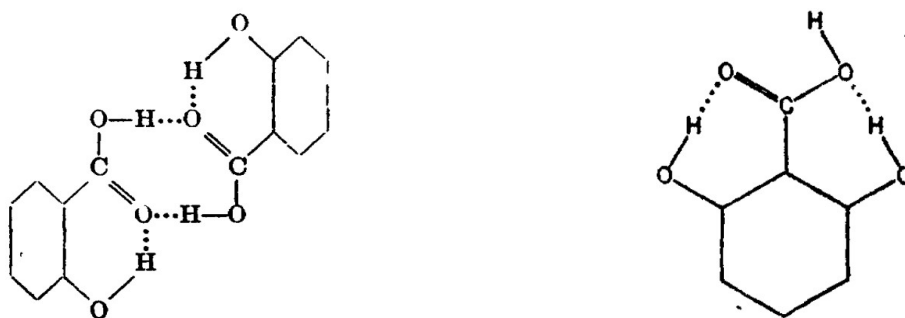
Fonte: BERNAL, FOWLER, 1933, p. 520

Definitivamente, o uso da técnica de difração de raios-X foi crucial para o entendimento de diversas substâncias ao longo das décadas de 20 e de 30, como a hexametenotetramina (DICKINSON, RAYMOND, 1923), vários compostos orgânicos de

cadeia longa (MÜLLER, 1923, 1928; SAVILLE, SHEARER, 1925; CASPARI, 1928; PIPER, 1929) e a ftalocianina (ROBERTSON, 1936). E muitos dos resultados obtidos experimentalmente só puderam ser satisfatoriamente interpretados com a admissão da existência das *ligações hidrogênio*. Foi assim também com outras técnicas de análise instrumental, como a espectroscopia no infravermelho (HERBST, MONTEIRO FILHO, 2019). Desse modo, de acordo com Oliveira (2015),

ainda era 1934 quando Pauling e Brockway confirmaram experimentalmente a conjectura outrora apresentada por Latimer e Rodebush de que ácidos carboxílicos podem formar ligações de hidrogênio [Figura 45] (p. 1313).

Figura 45 – Ligações hidrogênio intermoleculares (à esquerda) e intramoleculares (à direita) realizadas por ácidos carboxílicos, numa representação de Linus Pauling



Legenda: As ligações hidrogênio estão representadas por linhas pontilhadas.
 Fonte: PAULING, 1960, p. 478, 479

E, “no final dos anos 1930, o conceito de ligação hidrogênio estava consolidado e incorporado pela comunidade dos químicos, ao ponto de não necessitar de referências bibliográficas nos livros didáticos” (HERBST, MONTEIRO FILHO, 2019, p. 12).

Quane (1990 apud HERBST, MONTEIRO FILHO, 2019) levanta duas hipóteses para o fato das explicações químicas das ligações hidrogênio terem sido menosprezadas por tanto tempo. Para ele, “teria sido somente após cerca de vinte anos que evidências definitivas da ligação hidrogênio se acumularam” (p. 12), e evidências experimentais eram essenciais à época onde a maioria dos químicos era experimentalista, e não teórica. E, além disso, nesse extenso período,

a ligação do hidrogênio a dois átomos havia sido reconhecida e descrita sob diferentes termos, como *valência parcial*, *forças secundárias*, *ligação hidrogênio*, *anel quelato*, *coordenação*, *associação*, *associação intermolecular* e *efeito orto*.

Essa multiplicidade de nomes reflete o caráter amorfo do conceito e sua aparição dispersa na literatura nas duas décadas anteriores à sua assimilação (QUANE, 1990 apud HERBST, MONTEIRO FILHO, 2019, p. 12, grifo nosso).

Assim, fica demonstrado (historicamente) que a ligação hidrogênio é um conceito originalmente da química, e não da física. Segundo Fabbrizzi (2022),

a teoria das ligações hidrogênio desenvolveu-se independentemente das teorias das forças intermoleculares formuladas por físicos holandeses e que culminaram no tratamento de mecânica quântica por London¹⁴⁵ (p. 12, tradução nossa).

Ou seja, ao se falar sobre a interação intermolecular do tipo *ligação hidrogênio*, não está se falando sobre um “caso especial” das forças de van der Waals; mas, sim, sobre a ligação simultânea de um átomo de hidrogênio a dois outros átomos. É o que está na mais recente definição dada pela União Internacional de Química Pura e Aplicada (IUPAC) (2014):

Ligação hidrogênio [...]: Um tipo particular de multicentro (três centros - quatro elétrons) $X-H \cdots Y$, em que o átomo de hidrogênio central, ligado covalentemente a um átomo eletronegativo X (C, N, O, S..), forma uma *ligação adicional mais fraca* com o átomo Y (N, O, S..) na direção de seu orbital do par de elétrons não-compartilhado¹⁴⁶ [...] (p. 697, grifo nosso, tradução nossa).

Como essa definição deixa claro, a *ligação hidrogênio* é uma ligação química tal como a ligação covalente, diferindo apenas em grau. E o modelo empregado para explicar, hoje, a formação dessas ligações excepcionais é a *teoria da ressonância*, que encontra raízes na teoria das ligações de valência.

Esta teoria afirma que sempre que uma molécula ou um íon puder ser representado por duas ou mais estruturas de Lewis, *que diferem somente nas posições dos elétrons*, duas coisas serão verdadeiras:

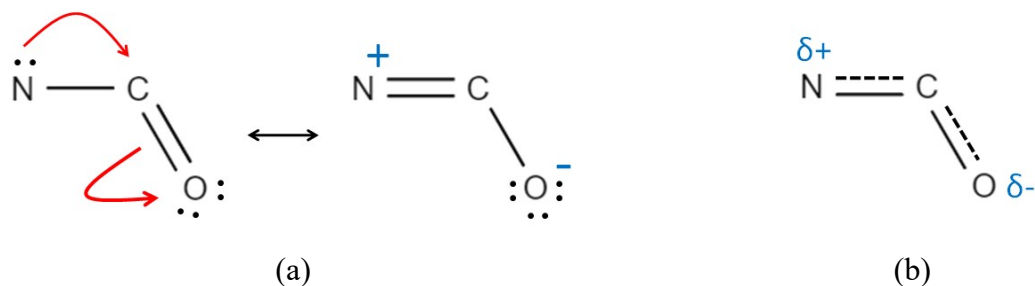
1. Nenhuma destas estruturas, chamadas de *estruturas de ressonância* [, formas canônicas] ou *contribuintes de ressonância*, será uma representação correta para a molécula ou o íon. Nenhuma estará completamente de acordo com as propriedades físicas ou químicas da substância.
2. A molécula ou o íon real será mais bem representado por um *híbrido (média) destas estruturas* (SOLOMONS, FRYHLE, 2012, p. 16, grifo do autor).

¹⁴⁵ O texto em língua estrangeira é: “[...] hydrogen bonding theory developed independently from the theories of intermolecular forces formulated by Dutch physicists and culminating in the quantum mechanical treatment by London”.

¹⁴⁶ O texto em língua estrangeira é: “Hydrogen Bond [...]: A particular type of multicenter (three center - four electron) $X-H \cdots Y$ in which the central hydrogen atom covalently linked to an electronegative atom X (C, N, O, S..) forms an additional weaker bond with atom Y (N, O, S..) in the direction of its lone electron pair orbital”.

Considere, por exemplo, as estruturas de ressonância do grupo funcional das amidas, presentes na Figura 46a.

Figura 46 – (a) As estruturas de ressonância e (b) o híbrido das amidas

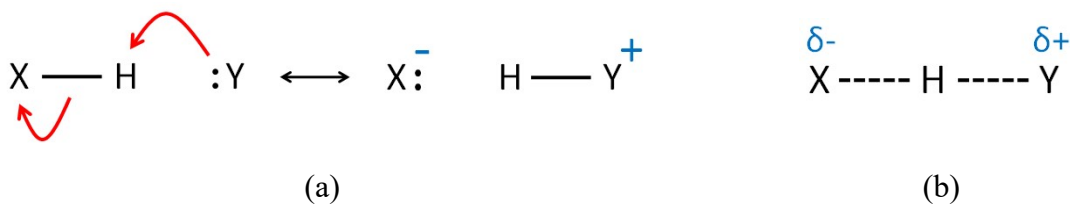


Fonte: O autor, 2024

Sabendo que “a *ordem de ligação* é o número de ligações que une um par específico de átomos” (ATKINS, JONES, 2012, p. 64), pode-se inferir que, na primeira estrutura de ressonância (à esquerda da Figura 46a), a ordem da ligação nitrogênio-carbono é igual a 1 e que a ordem da ligação carbono-oxigênio é igual a 2. Já na segunda estrutura (à direita da Figura 46a), pode-se admitir que os valores das ordens se invertem para as ligações.

No entanto, tendo como base a molécula de formamida (CH_3ON), Weinhold e Klein (2014) calcularam ordens fracionárias para essas ligações. Para a ligação nitrogênio-carbono, encontraram o valor de 1,305; e para a ligação carbono-oxigênio, o valor de 1,743. Essas ordens fracionárias constituem-se de uma evidência do fenômeno da *ressonância* (também chamado de *conjugação*) no grupo funcional das amidas, e atestam o fato de que o híbrido de ressonância (Figura 46b) é a “melhor” representação para essa estrutura molecular.

Figura 47 – (a) As estruturas de ressonância e (b) o híbrido de uma ligação hidrogênio genérica $\text{X-H} \cdots \text{Y}$

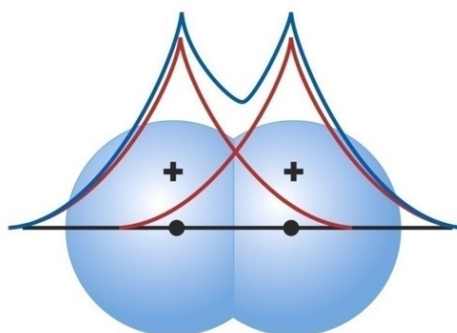


Fonte: O autor, 2024

Esse exemplo, todavia, demonstra a *ressonância intramolecular*, presente na estrutura particular de uma molécula. A ligação hidrogênio, por outro lado, pode ser entendida através da elucidação da *ressonância intermolecular*, entre moléculas distintas (Figura 47) (WEINHOLD, KLEIN, 2014).

Ou seja, num primeiro momento, até pode ocorrer uma atração mútua entre o átomo de hidrogênio, ligado a um átomo X muito eletronegativo, e uma espécie Y, dotada de elétrons não-compartilhados. Mas essa atração intermolecular não tem um fim na mera aproximação das moléculas. Devido ao pequeno raio do átomo de hidrogênio, ocorre uma *interferência* entre as densidades eletrônicas da ligação X–H e de Y (da mesma maneira que acontece na formação de uma ligação interatômica, como representado na Figura 48). E o resultado dessa interferência é, então, o aumento da densidade eletrônica entre as espécies X–H e Y, caracterizando a formação de uma *ligação hidrogênio* (ZHANG et al., 2013).

Figura 48 – Ilustração do fenômeno de interferência de onda na formação de uma ligação química



Legenda: Os pontos (em preto) sobre a linha horizontal representam os dois núcleos atômicos envolvidos na ligação química. As linhas em vermelho representam as funções de onda correspondentes a dois orbitais atômicos de mesma fase (+). E a linha em azul representa a função de onda correspondente ao orbital molecular, resultado da *interferência construtiva* entre os orbitais atômicos. Note que o orbital molecular gerado a partir da interferência construtiva é caracterizado por um aumento da amplitude entre os dois átomos, o que indica um aumento da densidade eletrônica entre os núcleos.

Fonte: ATKINS, JONES, 2012, p. 115

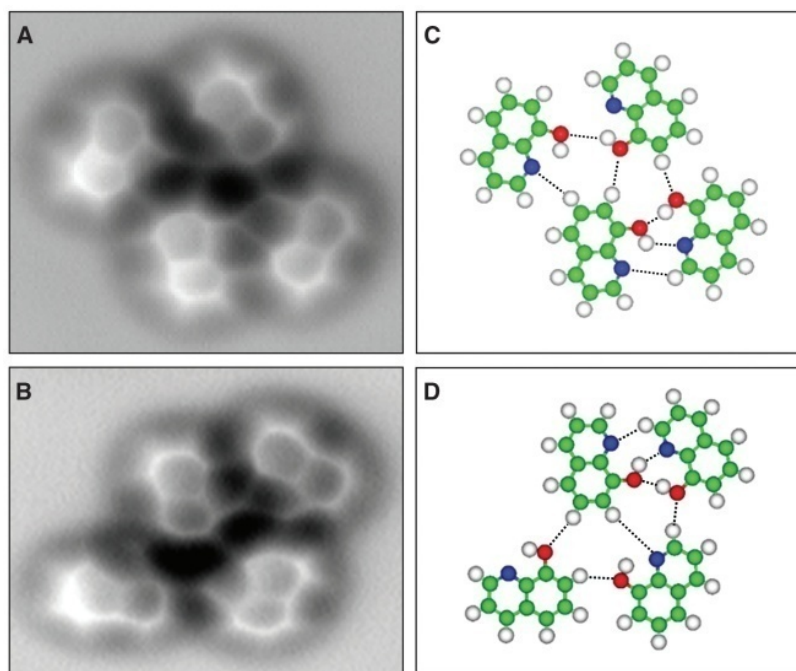
Assim, a diferença primordial entre uma *ligação hidrogênio* (como $H \cdots Y$, no exemplo anterior) e uma ligação covalente qualquer (como X–H) está na ordem de ligação¹⁴⁷.

¹⁴⁷ No início do capítulo, na definição do conceito de interação intermolecular, foi pontuado que as interações – diferentemente das reações – preservam as composições químicas das entidades moleculares interagentes. E isso ocorre nas ligações hidrogênio, apesar de serem, por definição, tipos particulares (multicentro) das ligações

A ordem de uma *ligação hidrogênio* será sempre fracionária e menor do que 1 (WEINHOLD, KLEIN, 2014).

Em 2013, pouco mais de um século depois do trabalho de Moore e Winmill, cientistas chineses exibiram a primeira imagem correspondente a uma *ligação hidrogênio*, obtida através da técnica de microscopia de força atômica (Figura 49)¹⁴⁸ (ZHANG et al., 2013). E, em 2016, um estudo de colaboração internacional levantou a possibilidade das consagradas forças de van der Waals também serem interpretadas através do fenômeno de interferência de onda, à luz da teoria quântica (AMBROSETTI et al., 2016).

Figura 49 – Primeira imagem de uma ligação hidrogênio, obtida através da técnica de microscopia de força atômica em 2013



Legenda: As imagens A e B foram obtidas através de microscopia de força atômica. C e D são, respectivamente, as representações de suas moléculas; onde os átomos de carbono estão coloridos em verde, os átomos de nitrogênio estão em azul, os átomos de oxigênio estão em vermelho e os de hidrogênio estão na cor branca. As ligações covalentes estão representadas por traços cheios, enquanto as ligações hidrogênio estão representadas por linhas pontilhadas.

Fonte: ZHANG et al., 2013, p. 612

químicas covalentes. Pois, ainda que ocorra a formação de um híbrido de ressonância intermolecular nas ligações hidrogênio, a estrutura de ressonância que mais contribui para o híbrido é aquela em que as composições químicas das entidades interagentes se preservam, de acordo com Solomons e Fryhle (2012).

¹⁴⁸ No ano seguinte, imagens semelhantes também foram obtidas por outros grupos de pesquisa (HÄMÄLÄINEN et al., 2014; SWEETMAN et al., 2014).

Dessa maneira, o que foi descrito ao longo de todo o segundo capítulo reforça a ideia de que a ciência não é um conhecimento fechado e de atributos inquestionáveis. Isso é característica dos dogmas! A ciência, como pôde ser visto através da história do conceito de interação intermolecular, é um conhecimento em permanente construção, e sua história é marcada por inúmeras controvérsias e expressões da brilhante e vaidosa natureza humana.

No capítulo 3, então, essa narrativa será analisada segundo as categorias de Gaston Bachelard. O resultado imediato dessa análise será a “materialização” do perfil epistemológico do conceito de interação intermolecular. E, uma vez com o perfil, o produto da dissertação poderá ser justificado e os resultados coletados na pesquisa realizada com docentes de química, sobre as interações intermoleculares, serão apresentados.

Capítulo III –

O perfil epistemológico do conceito de interação intermolecular e as concepções dos docentes de química

Após a análise histórica e epistemológica de diversos conceitos científicos, Gaston Bachelard concluiu que há uma ordem “genética” para a maturação dos conceitos. Como já foi abordado no capítulo 1 (precisamente, no tópico 1.5), essa ordem compreende cinco compromissos filosóficos distintos, que se sucedem, invariavelmente, de acordo com a sequência: realismo ingênuo → empirismo claro e positivista → racionalismo clássico → racionalismo completo → racionalismo discursivo. Essas são as zonas possíveis de um perfil epistemológico (BACHELARD, 1978a).

No entanto, como afirmou Bachelard (1978a), nem todos os conceitos têm o mesmo “poder dispersivo” (p. 29). Ou seja, nem todos os conceitos científicos foram ou serão descritos de acordo com todas as possibilidades filosóficas existentes. E, em verdade, para o epistemólogo, “é raro que uma noção tenha um espectro completo. Existem ciências em que o racionalismo quase não existe. Existem outras em que o realismo está quase eliminado” (BACHELARD, 1978a, p. 29).

Todavia, a partir da pesquisa historiográfica realizada sobre o conceito de interação intermolecular – cujos resultados foram registrados no capítulo 2 –, foi possível identificar, à luz das categorias filosóficas adotadas por Bachelard, que o conceito sob investigação possui um perfil epistemológico completo, com as cinco zonas possíveis. E mais... Todas as concepções associadas a essas zonas estariam em uso no discurso científico em vigor, numa clara demonstração da vivacidade e da complexidade desse conceito. Dessa forma, a seguir, as zonas do perfil epistemológico do conceito de interação intermolecular serão caracterizadas.

3.1. O PERFIL EPISTEMOLÓGICO DO CONCEITO DE INTERAÇÃO INTERMOLECULAR

I

Sob a sua primeira forma, *realista e ingênua*, o conceito de interação intermolecular circunscreve, pelo menos, três processos: a colisão, o encaixe e o entrelaçamento. É o que pôde ser observado, grosso modo, do século V a.C., a partir do pensamento de Leucipo de Mileto (século V a.C.), até o século XVII, com as hipóteses de Giovanni Borelli (1608-1679) para a explicação da ascensão capilar.

Nesse extenso período, ainda que em contextos sócio-históricos e “cenários” epistemológicos distintos, as personalidades que se debruçaram sobre o problema das interações entre as partículas da matéria recorreram à ideia de que, se dois ou mais entes interagem entre si, deve haver contato entre eles. O contato é, portanto, a raiz de todos os processos abarcados na primeira zona do perfil epistemológico do conceito de interação intermolecular. E a impressionante durabilidade dessa ideia na história pode ser explicada com base na importância do toque para as experiências cotidianas.

Por exemplo... O lactente chora incessantemente, em resposta à dor que sente em seu corpo, provocada pela fome, até que os seios de sua mãe lhe tocam. As palavras e as canções proferidas à distância, por mais carinhosas que sejam, não suspendem os incômodos de sua “barriga vazia”. Posteriormente, o lactente passa a incorporar novos objetos à sua estrutura cognitiva, objetos esses que vão além dos previstos em sua programação orgânica e que estão ligados aos seus reflexos hereditários (como o de sucção). E a forma como a assimilação desses novos objetos se dá é imprevista.

O lactente procura apreender um objeto pendurado, mas, no decorrer de uma tentativa frustrada, limita-se a *tocá-lo* e se segue então um balançar que lhe interessa como espetáculo inédito. Então, ele tentará consegui-lo novamente, [...] [fazendo] novamente o mesmo gesto (PIAGET, 1983a, p. 9, grifo nosso).

Ou seja, é através do toque que o indivíduo começa a assimilar o mundo e, através das inúmeras concessões e resistências, toma consciência de si e do ambiente que o cerca – o “outro” (PIAGET, 1983a, 1983b). Assim, a prevalência do contato, como fator determinante de uma interação, se reforça nas incontáveis observações do mundo macroscópico – na colisão de dois brinquedos, no encaixe de um smartphone com o seu carregador, no entrelaçamento de duas mãos etc. Conceber que dois corpos podem interagir entre si à distância, sem que nenhuma evidência sensorial seja perceptível ou sem que haja qualquer elo concreto entre eles, é algo absurdo para a mentalidade realista e ingênua.

E Gaston Bachelard (2006) discorreu sobre essa prevalência do contato na explicação das interações entre dois corpos, o que ele chamou de “choquismo” (p. 64). Segundo o epistemólogo,

com a noção de *choque* encontramos-nos diante de uma espécie de monstruosidade epistemológica. Considera-se como *simples* e é de uma complexidade inicial, pois que sintetiza noções geométricas e noções materialistas. Constrói-se assim ciência e filosofia sobre um conjunto de imagens grosserias e ingênuas (BACHELARD, 2006, p. 64, grifo do autor).

Isso porque,

basta pensar em fenômenos de interação de partículas de *natureza diferente*, como o fóton e o elétron, para compreender que esta interação não pode ser estruturada como um choque de duas bolas de idêntico marfim. [...] Assim, [...] tais filosofias entrega-nos à escravidão das nossas intuições primeiras relativas ao espaço e à força. [...] A noção de corpúsculo concebido como um pequeno corpo, a noção de interação corpuscular concebida como um choque de dois corpos, eis precisamente *noções-obstáculos*, noções paragem-de-cultura contra as quais é necessário precaver-se (BACHELARD, 2006, p. 66, grifo do autor).

II

O segundo nível sobre o qual se pode estudar o conceito de interação intermolecular, denominado *empirismo claro e positivista*, está associado ao uso sistemático do tubo capilar. Foi o que ocorreu do século XVII, ainda com Giovanni Borelli (1608-1679), até os primórdios do XVIII. Nesse período, o uso de um instrumento fez com que, vagarosamente, a subjetividade e o tom especulativo típicos do realismo ingênuo fossem cedendo espaço, na compreensão das interações intermoleculares, à objetividade.

Ou seja, antes mesmo da publicação de uma teoria consistente sobre a capilaridade – o que só ocorreu com os trabalhos de Thomas Young (1773-1829) e Pierre-Simon Laplace (1749-1827) no início do século XIX –, medições e correlações entre as grandezas envolvidas na ascensão capilar foram registradas, como a relação inversamente proporcional entre o raio interno de um tubo capilar e a altura que um líquido atinge nele. E esses dados empíricos permitiram que inferências mais consistentes fossem feitas a respeito das interações entre as partículas da matéria.

Desse modo, o empirismo claro e positivista define as interações intermoleculares como processos mensuráveis a partir da verificação das propriedades e das transformações da matéria. A natureza e a intensidade das interações são descritas, por exemplo, em função de observações da adesão entre os materiais, das solubilidades mútuas entre as substâncias químicas, de suas temperaturas de fusão e de ebulição, de suas viscosidades etc.

III

A terceira zona do perfil epistemológico do conceito de interação intermolecular, caracterizada pelo *racionalismo clássico*, corresponde ao período que se estende do início do século XVIII, com Isaac Newton (1643-1727), até as primeiras décadas do século XX, com o trabalho de Willem Hendrik Keesom (1876-1956). E a principal contribuição dessa zona é a concepção das interações intermoleculares como atrações (e repulsões) mediadas por forças que atuam à distância.

O formalismo matemático de Newton e a sua sugestão de que poderiam existir forças específicas associadas à coesão das partículas da matéria permitiram que as relações empíricas obtidas no estudo da ascensão capilar fossem, finalmente, combinadas, originando fórmulas matemáticas. Em suma, a *lei de Jurin* (Equação 6), atribuída a James Jurin (1684-1750), e a *equação de Young-Laplace* (Equação 7), deduzida pelos cientistas Thomas Young e Pierre-Simon Laplace, tornaram-se possíveis.

No entanto, a discussão sobre a natureza das forças intermoleculares persistiu. E o primeiro avanço substancial no entendimento da natureza dessas forças só ocorreu com a tese do cientista holandês Johannes Diderik van der Waals (1837-1923), ao concatenar as tradicionais pesquisas sobre a capilaridade com as recentes descobertas da termodinâmica. Debruçando-se sobre o estado dos gases reais, van der Waals elucidou o que seria a primeira fórmula das forças intermoleculares. E, nela, as forças de interação entre as entidades moleculares de um gás real são inversamente proporcionais ao quadrado do volume ocupado pelo material. Vide a Equação 22, onde k é uma constante:

$$F = \frac{k}{V^2} \quad (\text{Equação 22})$$

Porém, com a descoberta do elétron e a aceitação da natureza elétrica das entidades moleculares, as forças intermoleculares passaram a receber uma abordagem eletrostática. E foi somente após a aplicação dos conceitos de dipolo elétrico e de momento dipolar às moléculas que Keesom, durante os anos de 1912 a 1922, descreveu as forças intermoleculares do tipo “dipolo permanente-dipolo permanente” (ou, simplesmente, “dipolo-dipolo”) – que acontecem entre moléculas polares, dotadas de um momento dipolar (u) com módulo diferente de zero.

Na fórmula de Keesom, as forças intermoleculares são inversamente proporcionais à sétima potência das distâncias (r) entre as entidades moleculares, como pode ser deduzido¹⁴⁹ a partir da fórmula da energia potencial intermolecular abaixo, atribuída ao cientista (FABBRIZZI, 2022; ISRAELACHVILI, 2011):

$$- \frac{2}{3kT} \left(\frac{u_1 \cdot u_2}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \frac{1}{r^6} \quad (\text{Equação 23})$$

Assim, dentro da mesma zona epistemológica, já é possível notar a complexidade crescente das formulações matemáticas, o que é uma marca do racionalismo.

IV

O que diferencia, portanto, o racionalismo clássico do *racionalismo completo*, que demarca a quarta zona de um perfil epistemológico, é a “relativização dos antigos absolutos”. Na primeira forma do racionalismo, o momento dipolar era tido como uma grandeza absoluta, de módulo constante. O dipolo era permanente. Agora, na segunda forma do racionalismo, o momento dipolar também passa a ser definido em função da distância entre as entidades interagentes.

Isso porque, na aproximação de duas entidades, devido às repulsões de suas nuvens eletrônicas, os seus momentos dipolares podem sofrer alterações. Uma molécula polar pode induzir um dipolo em outra, que, *a priori*, tinha o momento dipolar resultante de módulo igual a zero. E duas entidades que, a princípio, eram apolares também podem, com a proximidade, induzir um dipolo uma na outra. Trata-se do chamado *efeito indutivo*, descrito por Peter Josephus W. Debye (1884-1966) e corroborado por Fritz Wolfgang London (1900-1954), ainda durante a primeira metade do século XX.

E, assim, de maneira semelhante à física relativística de Einstein, que “englobou” a física newtoniana, a aplicabilidade das interações de London supera a de Keesom. De acordo com Atkins e Jones (2012), “as interações de London são “universais”, no sentido de que elas se aplicam a todas as moléculas, independentemente de sua identidade química” (p. 178). Vide, novamente, a Tabela 7. Mas, como disse Bachelard (1978a), “nenhuma destas extensões é o resultado de um estudo realista do fenômeno. Têm todas o caráter numeral. Apresentam-se todas inicialmente como números à procura do seu fenômeno” (p. 19).

¹⁴⁹ Como já foi dito outrora, a energia potencial – $U(r)$ – é definida em função de uma força – $F(r)$ – dependente da distância (r), segundo a equação genérica: $U(r) = F(r) \cdot r$. Desse modo, se a energia potencial intermolecular de Keesom é inversamente proporcional à sexta potência da distância – ou seja, $U(r) \propto r^{-6}$ –, pode-se concluir que a força intermolecular de Keesom é inversamente proporcional à sétima potência da distância.

V

Por fim, fica a cargo do *racionalismo discursivo*, inaugurar uma nova perspectiva do conceito. E, na história das interações intermoleculares, essa novidade surgiu dos estudos mais recentes sobre as ligações hidrogênio, datando do final do século XX até o momento atual. De acordo com esses estudos, a forma mais adequada de conceber as ligações hidrogênio não é as interpretando como forças intermoleculares “especiais”, e sim como manifestações do fenômeno de *interferência de ondas* de matéria – no caso, a interferência mútua dos elétrons das entidades moleculares interagentes.

Como foi abordado no capítulo 2, o fenômeno da interferência de ondas já é amplamente aceito e difundido para a explicação das ligações químicas. Todavia, essa aceitação e difusão não se repete para as interações intermoleculares. “É então que entra em cena a filosofia dialética do “por que não?”, que é característica do novo espírito científico” (BACHELARD, 1978a, p. 21). Por que as interações intermoleculares não podem ser resultantes do fenômeno de interferência de ondas?

Talvez seja porque, se as nuvens eletrônicas de duas entidades moleculares interferirem construtivamente, uma densidade eletrônica surgirá entre as entidades, acarretando na formação de uma ligação química entre elas. E a formação de uma ligação põe em xeque a própria definição do que é uma interação intermolecular – um processo que ocorre entre entidades moleculares *com a preservação de suas composições químicas*. Ou seja, a formação de uma ligação, supostamente, não preservaria a composição química das espécies em interação.

Contudo, esse argumento não se sustenta. Porque, de acordo com a teoria da ressonância, aplicada às ligações hidrogênio, a interferência de duas entidades moleculares forma um híbrido de ressonância intermolecular; e a estrutura de ressonância que mais contribui para a formação desse híbrido é aquela em que as composições químicas das entidades interagentes se preservam. Dessa maneira, a interferência produz uma ligação química não-convencional, com uma ordem de ligação fracionária e menor que 1 (um). Logo, conceber a interferência de ondas como uma modalidade das interações intermoleculares não prejudica o conceito das interações.

E, com isso, o fenômeno de interferência diz “não” às forças de atração e repulsão atuantes à distância. Mas, de forma alguma, é um “não” que despreza ou busca suprimir a existência das forças intermoleculares. É, certamente, um “não” que exclama “não é só isso!”, como propõe a noção bachelardiana de generalização dialética. Devido à existência de forças

intermoleculares que atuam à distância, duas entidades moleculares podem se aproximar e, até mesmo, deformar a nuvem eletrônica uma da outra, como descrito pelo efeito indutivo. Mas essa interação pode “evoluir”, levando à interferência construtiva dessas nuvens. E, assim, o fenômeno de interferência completa o perfil epistemológico das interações intermoleculares.

Concluindo, vale frisar que a concepção das interações intermoleculares como interferências de onda de matéria já possui sólidas evidências experimentais, como as evidências mais recentes das ligações hidrogênio (ZHANG et al., 2013; HÄMÄLÄINEN et al., 2014; SWEETMAN et al., 2014). Afinal, pode-se dizer que essa concepção surgiu desses estudos. Entretanto, é bem verdade que, para substâncias cujas moléculas não realizam ligações hidrogênio nas condições ambientes, pesquisas ainda estão sendo desenvolvidas em busca de uma “realização” mais generalista dessa teoria. Os estudos de Ambrosetti e colaboradores (2016), que caminham nesse sentido, ainda devem render bons frutos.

Por ora, pensando na consolidação dessa última zona do perfil epistemológico, fica o incentivo de que “o cientista deve procurar esta realização completa. É preciso forçar a natureza a ir tão longe quanto o nosso espírito” (BACHELARD, 1978a, p. 21).

3.1.1. O perfil em uso hoje

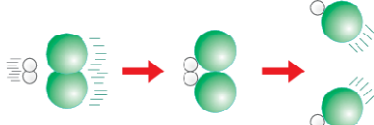
Um fato é que todas as zonas do perfil epistemológico das interações intermoleculares se encontram em uso no discurso científico atual. E a literatura de química (tanto da Educação Básica como da Educação Superior), atrelada à experiência cotidiana de sala de aula e de formação continuada, deixam isso muito claro.

A concepção das interações intermoleculares como processos de contato – colisão, encaixe e entrelaçamento – se revela, por exemplo, no ensino de cinética química (com a chamada *teoria das colisões*); no ensino de como as enzimas, enquanto catalisadores biológicos, se associam aos substratos (através do *modelo chave-fechadura* ou da *teoria do encaixe induzido*); e no ensino das propriedades dos polímeros e das biomoléculas. Demonstrando que “temos, como toda a gente, as nossas horas de realismo” (BACHELARD, 1978a, p. 26), e que

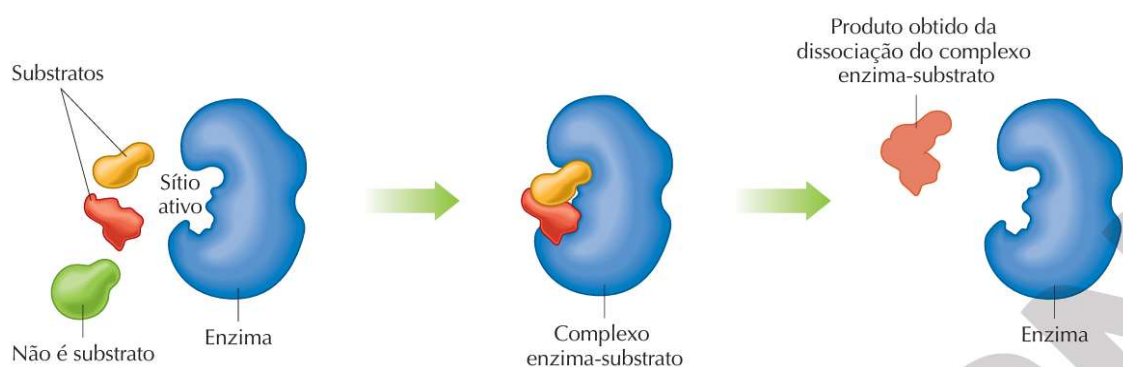
mesmo numa ciência muito avançada, as *condutas realistas* subsistem. Mesmo numa prática inteiramente comprometida com uma teoria se manifestam retornos a condutas realistas (BACHELARD, 1978a, p. 15, grifo do autor).

Vide a Figura 50:

Figura 50 – Imagens retiradas de livros de química recentes, da Educação Básica e Superior, e que apresentam as interações intermoleculares como processos de contato – colisão, encaixe e entrelaçamento

Algumas orientações possíveis durante a colisão	Resultado
	Orientação desfavorável: a colisão não é efetiva e não ocorre reação.
	Orientação desfavorável: a colisão não é efetiva e não ocorre reação.
	Orientação favorável: a colisão pode ser efetiva e pode ocorrer reação.

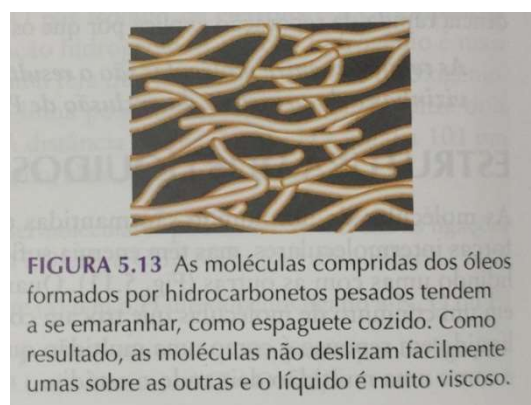
(a)



(b)



(c)



(d)

Legenda: (a) Algumas orientações possíveis para a colisão de duas moléculas diatômicas diferentes. (b) Representação esquemática da ação específica de uma enzima sobre dois substratos. (c) e (d) Macromoléculas lineares se entrelaçando como fios.

Fontes: REIS, 2016b, p. 157; LOPES, ROSSO, 2020b, p. 107; WAN, GALEMBECK, GALEMBECK, 2001, p. 7; ATKINS, JONES, 2012, p. 180

Da mesma forma, inferências sobre as interações intermoleculares a partir de verificações empíricas das propriedades e das transformações dos materiais são bastante comuns. Observe como exemplo, o trecho a seguir, retirado de um “manual do professor” contido em um livro didático de química da Educação Básica (também aprovado no Programa Nacional do Livro Didático – PNLD – de 2021):

Para o levantamento de conhecimentos prévios dos estudantes sobre as forças intermoleculares, faça alguns questionamentos, os quais poderão orientar o modo de trabalho com o conteúdo deste tema. Veja a seguir algumas sugestões:

- “O que são forças intermoleculares?”. É esperado que os estudantes apontem que são forças estabelecidas entre moléculas, devido ao próprio nome da expressão. Verifique outras eventuais respostas que demonstrem suas concepções espontâneas.
- “Considere que a temperatura de ebulição de um líquido (líquido A) seja 60 °C e que a temperatura de ebulição de outro líquido (líquido B) seja 110 °C. Em qual deles existe uma ligação mais forte entre suas moléculas?”. Peça aos estudantes que justifiquem suas respostas. Não é esperado que eles saibam responder neste momento, mas que reflitam sobre o assunto. *Diga a eles que devido à maior temperatura de ebulição, pode-se concluir que a atração entre as moléculas que formam o líquido B é mais forte que as que foram o líquido A.* Logo, é pertinente deduzir que, quanto maior for a força que atrai as moléculas que compõem uma substância, maior é a interação entre elas, portanto, maior será a temperatura de fusão e de ebulição da substância (GODOY, DELL’AGNOLO, MELO, 2020, p. 234, grifo nosso).

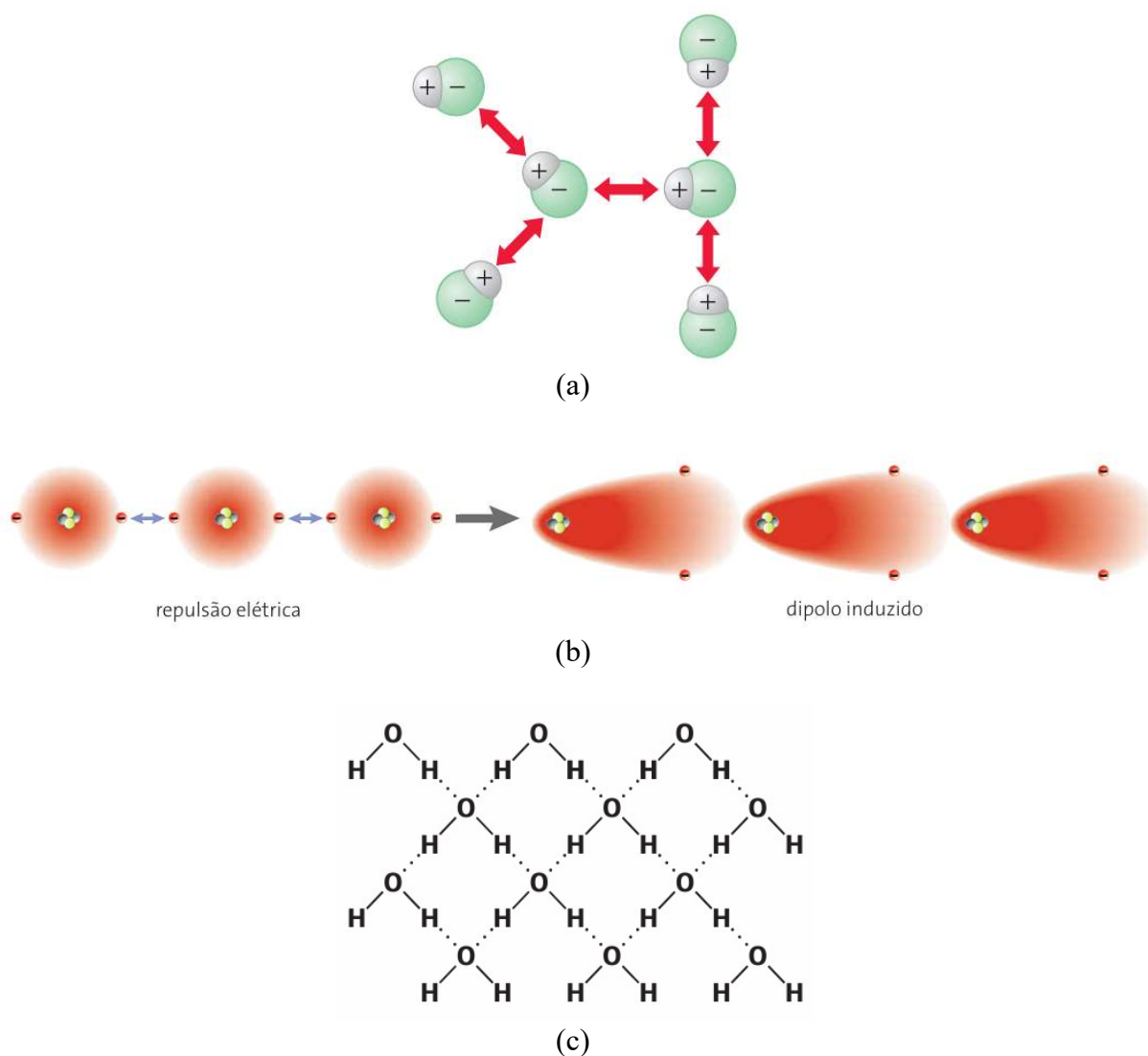
E como era esperado, as concepções racionalistas das interações intermoleculares imperam. A própria confusão entre os termos “interação intermolecular” e “força intermolecular”, discutida no início do capítulo 2, já deixa isso evidente.

Assim sendo, na Figura 51a, tem-se uma representação das forças intermoleculares do tipo dipolo-dipolo. As moléculas interagentes, que aparentam ser da mesma substância química, são dotadas de dipolos permanentes. Seus átomos são representados por esferas “rígidas” e com cargas parciais bem definidas e demarcadas. E as forças de atração mútuas são ilustradas por setas vermelhas duplamente orientadas, expressando a direção e o sentido do movimento das moléculas.

Diferente da figura anterior, tem-se, na Figura 51b, átomos com uma estrutura mais “maleável”, “dinâmica”. Os núcleos atômicos permanecem fixos, mas as nuvens eletrônicas circundantes apresentam mobilidade. Dessa maneira, com a ilustração das repulsões que ocorrem, mutuamente, entre os elétrons constituintes das nuvens, observa-se a formação de dipolos induzidos, o que explica as forças intermoleculares dos tipos dipolo permanente-dipolo induzido e dipolo induzido-dipolo induzido.

Finalmente, na Figura 51c, as ligações hidrogênio estão representadas. E com o intuito de destacar o caráter não-convencional dessas ligações, elas foram ilustradas por traços pontilhados, dando a entender que são mais “fracas” do que as ligações covalentes simples que formam as moléculas de água em interação.

Figura 51 – Imagens retiradas de literaturas de química recentes e que apresentam as interações intermoleculares segundo concepções racionalistas



Legenda: Representações (a) das forças intermoleculares do tipo dipolo-dipolo, (b) do efeito indutivo e (c) das ligações hidrogênio entre moléculas de água.

Fontes: FELTRE, 2004, p. 176; REIS, 2016a, p. 215; SANTOS et al., 2012, p. 300

E, dessa forma, todas as concepções das interações intermoleculares que permeiam o conhecimento científico atual também podem ser partilhadas pelo mesmo indivíduo ou, em termos bachelardianos, pelo mesmo “espírito particular” (BACHELARD, 1978a, p. 25).

3.2. O PRODUTO EDUCACIONAL DA DISSERTAÇÃO

De posse do perfil epistemológico do conceito de interação intermolecular, pôde-se confeccionar o produto educacional desta dissertação, atendendo o regulamento do Programa de Pós-Graduação em Ensino de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro (PEQui-UFRJ)¹⁵⁰ e, primariamente, o compromisso assumido por todos os mestrados profissionais da área do ensino, como salienta Rizzatti et al. (2020). E dentre os diversos tipos e formatos possíveis para os produtos educacionais, optou-se pela criação de um livro digital no formato *e-book*¹⁵¹.

Seu objetivo não é, simplesmente, responder a um problema real observado durante a formação acadêmica e a experiência profissional de seu autor, como orienta uma publicação do Ministério da Educação (BRASIL, 2019). Mas, também, segundo as proposições de Rizzatti et al. (2020), “servir de produto interlocutivo à professores e professoras que se encontram nos mais diferentes contextos do nosso país” (p. 2).

Seu intuito é contribuir para um ensino e uma aprendizagem de ciências mais críticos, dialógicos, significativos e lúdicos. Entendendo, através de um conceito específico da química, que o conhecimento científico evolui com o progresso da história, estando sujeito a controvérsias e rupturas. Mas que, apesar de toda essa inerente complexidade, sua divulgação não precisa ser descontextualizada, mecânica, nem extensivamente normativa e classificatória. E, dessa forma, desde que seja devidamente referenciado, o conteúdo do produto educacional pode ser integralmente usado ou, ainda, ser adaptado – modificado ou combinado a outros materiais –, traduzido e compartilhado pelos professores de ciências.

A escolha da confecção de um *e-book* se deu a partir (i) da análise do contexto atual e (ii) dos benefícios atrelados a esse tipo e formato de produto.

No período mais crítico da pandemia de COVID-19, o aumento do consumo de *e-books* foi amplamente noticiado pela mídia brasileira (FOLHA DE SÃO PAULO, 2020; CORREIO BRAZILIENSE, 2021; VEJA, 2022). E de acordo com o último Panorama do

¹⁵⁰ De acordo com o regulamento do Programa de Pós-Graduação em Ensino de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro (PEQui-UFRJ), um dos objetivos do mestrado profissional em ensino de química é “formar profissionais com capacidade de identificar e utilizar os resultados de pesquisas no campo do Ensino de Química para atuarem na ampliação dos conhecimentos da área, na melhoria da qualidade do ensino, e no desenvolvimento de metodologias que focalizem a criação de *produtos e processos educacionais* específicos no segmento da Química, que possam ser implementados em condições reais de ensino” (UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, 2024, n.p., grifo nosso).

¹⁵¹ A Câmara Brasileira do Livro (CBL) (2023) divide a categoria dos livros digitais em dois formatos: o *e-book* e o *audiobook*.

Consumo de Livros elaborado pela Câmara Brasileira do Livro (CBL), essa tendência se manteve país (CÂMARA BRASILEIRA DO LIVRO, 2023).

Isso porque, apesar dos *e-books* não promoverem a mesma experiência sensorial dos livros físicos e estarem sujeitos às limitações dos aparelhos eletrônicos (como o descarregamento de suas baterias e a facilitação da distração e da dispersão na leitura), eles (1) não ocupam espaço físico, o que facilita o transporte e a apropriação de seus conteúdos na rotina, (2) são sustentáveis, (3) são economicamente mais acessíveis e, (4) uma vez adquiridos, são imediatamente recebidos. Além disso, na perspectiva do criador do conteúdo, os *e-books*, hoje, são facilmente (5) editáveis com os recursos disponíveis na internet e (6) compartilháveis através dos sites e das mídias sociais.

Nesse sentido, o *e-book* elaborado a partir desta pesquisa de mestrado foi intitulado *Coesão – Cinco histórias sucintas sobre as interações intermoleculares*. Seu nome faz referência à obra de Rowlinson (2004), que foi fundamental para a pesquisa historiográfica relatada no capítulo 2 desta dissertação. E sua capa pode ser vista a seguir:

Figura 52 – Capa do *e-book* elaborado como produto educacional da dissertação



Fonte: O autor, 2024

Tendo o total de 45 folhas, o *e-book* compreende 5 (cinco) capítulos, cada um deles identificado por um ícone e contendo uma história relativa ao conceito de interação intermolecular. Observe:

CAPÍTULO 1 –

Como os atomistas gregos antigos explicavam a origem do universo

CAPÍTULO 2 –

Do solo até as folhas de um Angelim

CAPÍTULO 3 –

“Os opostos se atraem!”

CAPÍTULO 4 –

Uma lagartixa na parede e um velho cientista holandês

CAPÍTULO 5 –

Como uma onda no mar...

Para o leitor desatento, aparentemente, não há uma forte conexão entre os capítulos, uma vez que possuem temas e estilos distintos. E, de fato, foi proposital que eles tivessem certo grau de independência, para também serem usados separadamente. No entanto, à luz do perfil epistemológico do conceito de interação intermolecular, suas histórias se conectam e ganham um sentido. Do capítulo 1 ao 5, as cinco zonas do perfil epistemológico são contempladas, na mesma ordem em que foram postuladas por Gaston Bachelard e confirmadas nesta pesquisa: realismo ingênuo → empirismo claro e positivista → racionalismo clássico → racionalismo completo → racionalismo discursivo.

Além disso, cada capítulo do *e-book* também traz consigo, sugestões de vídeos e de simuladores, visando um aprofundamento nas diferentes concepções do conceito de interação intermolecular. E, assim, esse produto educacional está habilitado tanto para estudantes de química da Educação Básica e Superior, como para docentes de química – que serão colocados, mesmo através de uma abordagem muito “sucinta” (como diz o título do material), diante de uma perspectiva mais ampla das interações, indo além da ideia tão difundida de que elas se resumem a “forças intermoleculares”. O *e-book* pode ser encontrado, junto desta dissertação, no site oficial do PEQui-UFRJ e na Plataforma EduCapes.

3.3. A UTILIZAÇÃO DO PERFIL EPISTEMOLÓGICO JUNTO A DOCENTES DE QUÍMICA

Na utilização do perfil epistemológico do conceito de interação intermolecular, optou-se pela realização de uma pesquisa com docentes de química. E como foi descrito na metodologia desta dissertação, essa pesquisa se deu através de um formulário estruturado em três blocos, contendo questões objetivas e discursivas (Apêndice A). Ao todo, foram coletadas 20 (vinte) respostas, que correspondem a 20 (vinte) docentes de química – identificados pelos códigos D01, D02, (...), D20 (na ordem em que preencheram o formulário), devido ao anonimato. Todos os participantes concordaram com o termo de consentimento livre e esclarecido.

Os dados brutos obtidos com o formulário estão no Apêndice B. Os resultados da pesquisa e as suas discussões encontram-se a seguir.

3.3.1. BLOCO 1 – A formação acadêmica e a experiência profissional dos docentes

No Bloco 1 (B1), foram elencadas 8 questões (B1-Q1, B1-Q2, (...), B1-Q8) com o propósito de conhecer a formação acadêmica e a experiência profissional dos docentes. Informações de ordem mais pessoal (como o nome, a idade, o sexo/gênero, o e-mail etc.) não foram perguntadas no formulário. Vide os resultados:

3.3.1.1. A formação acadêmica

De acordo com as respostas dadas à questão B1-Q1 (compiladas na Tabela 8), que perguntou o curso de graduação dos docentes, a pesquisa contou com a participação de um público formado, na maior parte, por licenciados em química ($n = 13$; $p = 65,0 \%$).

Quanto aos não licenciados ($n = 7$, $p = 35,0 \%$), sabe-se que todos cursaram o mestrado e que três cursaram o doutorado (D08, D15, D20). A média do tempo de ensino desses professores na Educação Superior é de, aproximadamente, 4,0 anos (com mínimo de zero e máximo de 25 anos). E ainda que o curso de licenciatura plena seja um requisito para a atuação na Educação Básica, segundo o Artigo 62¹⁵² da Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional (LDBEN, Lei nº 9.394/1996) (BRASIL, 1996), o tempo médio de ensino desses

¹⁵² O caput do Art. 62 da Lei nº 9.394/96 diz: “A formação de docentes para atuar na educação básica far-se-á em nível superior, em curso de licenciatura plena, admitida, como formação mínima para o exercício do magistério na educação infantil e nos cinco primeiros anos do ensino fundamental, a oferecida em nível médio, na modalidade normal” (BRASIL, 1996, grifo nosso).

participantes nesse nível educacional é de, aproximadamente, 6,6 anos (com mínimo de zero e máximo de 28 anos), um tempo de atuação maior do que na Educação Superior.

Tabela 8 – Resultados da questão B1-Q1 da pesquisa com docentes: Qual foi o seu curso de graduação?

CURSO DA GRADUAÇÃO	FREQUÊNCIA (n)	PORCENTAGEM (p)	RESPONDENTES
Química	3	15,0 %	D08, D10, D20
Licenciatura em Química	13	65,0 %	D01, D02, D03, D04, D06, D07, D09, D11, D13, D14, D16, D18, D19
Química com Atribuições Tecnológicas	1	5,0 %	D15
Tecnologia em Processos Químicos	1	5,0 %	D12
Engenharia Química	1	5,0 %	D05
Engenharia Metalúrgica	1	5,0 %	D17
SOMA:	20	100,0 %	-

Fonte: O autor, 2024

Dentre esses profissionais não licenciados, é preciso pontuar que muitos já atuaram ou atuam na rede pública federal de ensino (D05, D10, D15, D17, D20), em institutos federais ou universidades. Assim, é possível que suas práticas docentes na Educação Básica tenham relação com a formação técnica na área de química ou em áreas afins. Todavia, quase todos também já atuaram ou atuam na rede privada de ensino (D05, D08, D10, D12, D17, D20).

Esse resultado não sugere somente um descumprimento da lei. Acredita-se que ele também revela a crença de que, para atuar na Educação Básica, basta que o profissional apresente um notório saber da disciplina que pretende lecionar, desprezando completamente os conhecimentos pedagógicos e as experiências passíveis de serem acumuladas no estágio supervisionado das licenciaturas.

No que tange à pós-graduação *lato sensu*, que abrange o aperfeiçoamento e a especialização, a questão B1-Q2 perguntou quais docentes realizaram essas modalidades de formação continuada e quais foram os cursos efetuados.

Nas respostas, pôde-se observar que a maioria dos professores participantes não fez uma pós-graduação do tipo *lato sensu* (n = 15; p = 75,0 %) (D01, D02, D03, D04, D05, D06,

D08, D11, D12, D13, D14, D15, D16, D19, D20). E dos professores que fizeram ($n = 5$; $p = 25,0 \%$), verificou-se que a maioria ($n = 4$) realizou seus cursos em campos educacionais – principalmente, voltados à educação científica, como explicita a Tabela 9.

Tabela 9 – Resultados da questão B1-Q2 da pesquisa com docentes: Fez ou faz especialização ou aperfeiçoamento? Se sim, qual a sua área de especialização ou aperfeiçoamento?

CURSO DA PÓS-GRADUAÇÃO LATO SENSU	CAMPOS	FREQUÊNCIA (n)	RESPONDENTES
Ensino de Ciências	Educacionais	1	D07
Ensino de Química		2	D09, D18
Psicopedagogia		1	D10
Metalurgia	Outros	1	D17
SOMA:	-	5	-

Fonte: O autor, 2024

Com relação à pós-graduação *stricto sensu*, que abrange os programas de mestrado e de doutorado, foram feitas duas perguntas distintas.

A questão B1-Q3 perguntou quais docentes realizaram o mestrado e quais foram os cursos efetuados. Através dela, constatou-se que o público de participantes foi formado, integralmente, por professores que cursaram mestrado ($n = 20$; $p = 100,0 \%$), no qual um número substancial ($n = 8$; $p = 40,0 \%$) realizou seus cursos em campos relacionados à educação – principalmente, o ensino de química. O docente D10, apesar de não ter feito a licenciatura, fez uma pós graduação *lato sensu* e um mestrado em áreas educacionais. Vide a Tabela 10.

A questão B1-Q4, por sua vez, perguntou quais docentes realizaram o doutorado e quais foram os cursos efetuados. Nela, verificou-se que a maioria dos respondentes não fez o doutorado ($n = 14$; $p = 70,0 \%$) (D01, D02, D03, D04, D05, D09, D10, D11, D12, D14, D16, D17, D18, D19). E, em meio aos professores que o fizeram ($n = 6$; $p = 30,0 \%$), observou-se que a maioria ($n = 5$) realizou os seus cursos no campo da “química dura”, como apresentado na Tabela 11.

Tabela 10 – Resultados da questão B1-Q3 da pesquisa com docentes: Fez ou faz mestrado?
Se sim, qual a sua área de mestrado?

CURSO DO MESTRADO	CAMPOS	FREQUÊNCIA (n)	RESPONDENTES
Catálise	Química	1	D06
Ciência e Tecnologia de Polímeros		2	D05, D12
Educação	Educacionais	1	D07
Ensino de Química ou Mestrado Profissional em Química		7	D01, D02, D03, D04, D10, D16, D18
Físico-Química	Química	2	D13, D15
Fotoquímica		1	D14
Química		3	D08, D11, D17
Química Analítica		2	D09, D20
Química Inorgânica		1	D19
SOMA:	-	20	-

Fonte: O autor, 2024

Tabela 11 – Resultados da questão B1-Q4 da pesquisa com docentes: Fez ou faz doutorado?
Se sim, qual a sua área de doutorado?

CURSO DO DOUTORADO	CAMPOS	FREQUÊNCIA (n)	RESPONDENTES
Catálise	Química	1	D06
Educação	Educacionais	1	D07
Físico-Química	Química	2	D13, D15
Química		1	D08
Química Analítica		1	D20
SOMA:	-	6	-

Fonte: O autor, 2024

Finalmente, na questão B1-Q5, perguntou-se sobre quem fez pós-doutorado e em qual área. E a quase totalidade dos respondentes declarou não ter feito o pós-doutorado ($n = 19$; $p = 95,0\%$). Apenas o docente D15 cursou essa modalidade de estágio de pesquisa, na área de físico-química.

3.3.1.2. A experiência profissional

Com base nas respostas dadas à questão B1-Q6, que perguntou sobre os anos de experiência dos docentes no ensino de química na Educação Básica, constatou-se que, no grupo de respondentes, a média do tempo de ensino de química nesse nível educacional foi de 9,1 anos, com mínimo de zero (D15, D20) e máximo de 28 anos (D17). Observe a tabela:

Tabela 12 – Resultados da questão B1-Q6 da pesquisa com docentes: Quantos anos de experiência você possui no ensino de química na Educação Básica?

ANOS DE EXPERIÊNCIA	NÚMERO DE DOCENTES/ FREQUÊNCIA (n)				PORC. (p)	RESPOND.
	1	2	3	4		
Nenhum					10,0 %	D15, D20
Menos de 1					5,0 %	D12
1 a 2					15,0 %	D03, D08, D09
3 a 4					15,0 %	D02, D04, D05
5 a 6						
7 a 8					10,0 %	D01, D14
9 a 10					10,0 %	D13, D19
11 a 12					5,0 %	D10
13 a 14					5,0 %	D11
15 a 16						
17 a 18					5,0 %	D06
19 a 20					10,0 %	D07, D18
21 a 22						
23 a 24					5,0 %	D16
25 a 26						
27 a 28					5,0 %	D17
SOMA:					100,0 %	-

Fonte: O autor, 2024

E quanto à experiência dos docentes no ensino de química na Educação Superior, alvo da questão B1-Q7, o tempo médio foi de 2,7 anos, com mínimo de zero (D01, D02, D03, D04, D08, D09, D10, D12, D14, D16, D18, D19) e máximo de 25 anos (D20). Observe a Tabela 13.

Ou seja, os respondentes da pesquisa possuem uma experiência na Educação Básica, aproximadamente, *três vezes maior* do que na Educação Superior, concernente ao ensino de química.

Tabela 13 – Resultados da questão B1-Q7 da pesquisa com docentes: Quantos anos de experiência você possui no ensino de química na Educação Superior?

ANOS DE EXPERIÊNCIA	NÚMERO DE DOCENTES/ FREQUÊNCIA (n)													PORC. (p)	RESP.
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13		
Nenhum														60,0 %	D01, D02, D03, D04, D08, D09, D10, D12, D14, D16, D18, D19
Menos de 1 ano														5,0 %	D05
1 a 2														15,0 %	D13, D15, D17
3 a 4															
5 a 6														10,0 %	D07, D11
7 a 8															
9 a 10															
11 a 12															
13 a 14															
15 a 16														5,0 %	D06
17 a 18															
19 a 20															
21 a 22															
23 a 24															
25 a 26														5,0 %	D20
SOMA:												100,0 %	-		

Fonte: O autor, 2024

No que diz respeito às redes de ensino nas quais já atuaram ou atuam – tema da questão B1-Q8 –, notou-se que a maior parte dos docentes participantes da pesquisa possui experiência no ensino de química nas redes privada ($n = 16$; $p = 80,0 \%$) e federal ($n = 10$; $p = 50,0 \%$), como apresentado na Tabela 14.

Obviamente, esses resultados obtidos no Bloco 1 (B1) do formulário não traduzem a formação acadêmica e a experiência profissional da população de professores de química do Brasil. Essa amostra, que contém, por exemplo, todos os professores com mestrado e metade deles com vivência na rede federal, está claramente enviesada, podendo ter sido fortemente influenciada pelo círculo de convivência do autor desta dissertação.

Tabela 14 – Resultados da questão B1-Q8 da pesquisa com docentes: Em qual(is) rede(s) de ensino você já atuou ou atua como docente?

REDES DE ENSINO ONDE JÁ TRABALHOU	FREQUÊNCIA (n)	PORCENTAGEM (p')*	RESPONDENTES
Rede privada	16	80,0 %	D01, D03, D04, D05, D06, D07, D08, D10, D11, D12, D13, D14, D16, D17, D19, D20
Rede pública municipal	2	10,0 %	D02, D09
Rede pública estadual	7	35,0 %	D06, D07, D10, D11, D16, D17, D18
Rede pública federal	10	50,0 %	D05, D06, D10, D11, D13, D14, D15, D17, D19, D20

* Em relação ao total de respondentes (n = 20);

Fonte: O autor, 2024

3.3.2. BLOCO 2 – A experiência dos docentes no ensino das interações intermoleculares

No Bloco 2 (B2), foram arroladas 4 questões (B2-Q1, (...), B2-Q4) com o intuito de conhecer, especificamente, a experiência dos docentes no ensino das interações intermoleculares.

Com esse fim, na questão B2-Q1, os participantes da pesquisa foram perguntados se já ensinaram sobre as interações intermoleculares na Educação Básica ou Superior. E a maioria dos respondentes do formulário (n = 17; p = 85,0 %) declarou já ter ensinado sobre as interações intermoleculares. Apenas três professores (p = 15,0 %) (D09, D12, D15) responderam negativamente.

Desses professores que nunca ensinaram sobre o conceito, dois possuem o mestrado como maior titulação (D09, D12) e um possui pós-doutorado (D15). Os professores D09 e D12 possuem, respectivamente, 2 anos e 6 meses de experiência na Educação Básica; e suas vivências se concentram, respectivamente, nas redes privada e pública municipal. Talvez, por atuarem no Ensino Fundamental, em que os aspectos submicroscópicos da matéria não são tão

bem explorados como acontece a partir do Ensino Médio, esses docentes nunca tiveram a oportunidade de abordar, direta e aprofundadamente, o conceito.

Já o professor D15, por sua vez, possui apenas 2 anos de experiência na Educação Superior, atuando na rede pública federal. Quanto a ele, parece improvável que, ministrando aulas no curso universitário de química, nunca tenha abordado sobre as interações intermoleculares. É mais provável que esse conceito nunca tenha sido o tema principal de alguma de suas aulas, o que o fez responder negativamente a esse questionamento da pesquisa.

Na questão B2-Q2, perguntou-se sobre a frequência com a qual os docentes ensinam sobre as interações intermoleculares. E a maior frequência relatada foi *anualmente* (n = 11). Observe a Tabela 15, relativa aos 17 (dezessete) docentes que responderam positivamente à questão anterior (a B2-Q1).

Tabela 15 – Resultados da questão B2-Q2 da pesquisa com docentes: Com qual frequência você ensina sobre as interações intermoleculares?

FREQUÊNCIA DE ENSINO	FREQUÊNCIA (n)	RESPONDENTES
Mensalmente	0	-
Semestralmente	4	D05, D08, D11, D20
Anualmente	11	D01, D02, D03, D06, D07, D10, D14, D16, D17, D18, D19
Esporadicamente	2	D04, D13
SOMA:	17	-

Fonte: O autor, 2024

As abordagens anuais e semestrais concordam com os formatos dos períodos letivos que costumam ser adotados, respectivamente, na Educação Básica e na Superior. E como os docentes participantes da pesquisa possuem uma experiência profissional maior na Educação Básica, o ensino anual das interações intermoleculares é justificado.

Na questão B2-Q3, os professores foram perguntados se eles consideram o estudo das interações intermoleculares relevante; e, se sim, por qual motivo.

Respondendo a primeira pergunta, os professores foram unânimes quanto à relevância do estudo das interações intermoleculares. Entretanto, suas justificativas puderam ser divididas em duas categorias. Uma delas destaca a aplicabilidade do conceito de interação

intermolecular na explicação das propriedades e das transformações dos materiais. Observe, como exemplo, a resposta do docente D10:

D10 – *“Ajuda na compreensão de alguns fenômenos importantes, por exemplo como as substâncias se dissolvem ou não uma nas outras”.*

E a outra categoria aborda o potencial das interações intermoleculares na contextualização da química e na fundamentação de outros conceitos. Leia um trecho da resposta do docente D04:

D04 – *“Porque é um conceito base para entender outros assuntos das áreas de química em níveis aprofundados [...]”.*

A incidência dessas categorias foi registrada na tabela a seguir, onde se observa que a maioria dos professores ($n = 18$; $p = 90,0 \%$) pontuou a aplicabilidade do conceito de interação intermolecular na explicação das propriedades e das transformações dos materiais.

Tabela 16 – Resultados da questão B2-Q3 da pesquisa com docentes: Motivos pelos quais o estudo das interações intermoleculares é relevante

JUSTIFICATIVAS DA RELEVÂNCIA DO ESTUDO DAS INTERAÇÕES INTERMOLECULARES	FREQUÊNCIA (n)	PORCENTAGEM (p')*	RESPONDENTES
Aplicabilidade na explicação das propriedades e das transformações dos materiais	18	90,0 %	D01, D02, D03, D04, D05, D06, D08, D09, D10, D11, D13, D14, D15, D16, D17, D18, D19, D20
Contextualização da química e fundamentação de outros conceitos	4	20,0 %	D04, D09, D11, D13

* Em relação ao total de respondentes ($n = 20$);

Fonte: O autor, 2024

E dentre as propriedades dos materiais possíveis de serem explicadas através das interações intermoleculares, as mais citadas foram: as temperaturas de fusão e de ebulição (D01, D16) e a solubilidade (D06, D09, D10, D20).

Na última questão do Bloco 2 (a B2-Q4), os participantes foram perguntados se as interações intermoleculares são um tema sobre o qual eles buscam se atualizar e/ou se aprofundar. A maioria dos respondentes ($n = 13$; $p = 65,0 \%$) (D02, D04, D05, D07, D08, D09, D12, D13, D14, D15, D17, D19, D20) declarou que busca se atualizar ou se aprofundar sobre o conceito. E, ao serem questionados sobre o modo como fazem isso, muitas fontes foram citadas, com destaque para os *livros didáticos* ($n = 7$) e os *artigos científicos* ($n = 6$). Vide a Tabela 17:

Tabela 17 – Resultados da questão B2-Q4 da pesquisa com docentes: Como os docentes de química buscam se atualizar e/ou se aprofundar sobre o conceito de interação intermolecular

MEIOS USADOS NA ATUALIZAÇÃO DOCENTE SOBRE AS INTERAÇÕES INTERMOLECULARES	FREQUÊNCIA (n)	RESPONDENTES
Artigos científicos	6	D04, D08, D13, D15, D19, D20
Discussão com os pares	1	D14
Livros didáticos/Literatura	7	D02, D04, D05, D07, D09, D13, D14
Sites científicos	1	D02

Fonte: O autor, 2024

Benedicto e Silva (2018), tendo pesquisado sobre as formas de atualização de 18 professores de química brasileiros do Ensino Médio, relataram que todos os participantes afirmaram que a atualização nos conceitos e nos procedimentos da química é “essencial para que o docente possa aprimorar sua prática profissional” (p. 285). Aparentemente, essa conclusão é consensual. Mas, ao serem questionados sobre o modo como se atualizam, esses docentes também suscitaram diferentes meios, com destaque para a leitura de revistas de divulgação científica, a internet e a realização de cursos.

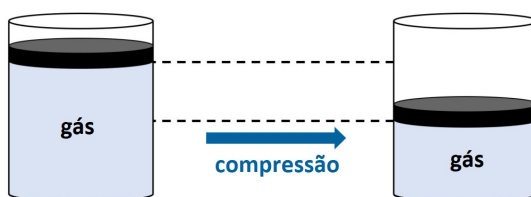
Os resultados encontrados nesta dissertação, na questão B2-Q4, e na pesquisa de Benedicto e Silva (2018) demonstram o caráter fortemente subjetivo do processo de atualização docente. Os professores de química, ainda que estejam ligados pelo compromisso de ensinarem a mesma ciência, são pessoas com diferentes histórias, realidades e interesses. E, dessa maneira, buscam se atualizar da forma que os apraz, com os recursos que estão à disposição, recorrendo a diversos meios para darem continuidade às suas formações

acadêmicas e profissionais – meios esses que extrapolam as fronteiras das pós-graduações e tomam o cotidiano.

3.3.3. BLOCO 3 – Como os docentes de química concebem as interações intermoleculares e explicam fenômenos associados a elas

No Bloco 3 (B3), foram elencadas 5 questões (B3-Q1, (...), B3-Q5), nas quais o objetivo era saber como os docentes de química concebem as interações intermoleculares e explicam fenômenos associados (como a coesão da matéria, as transformações dos estados físicos e a solubilidade mútua entre as substâncias). Vide os resultados:

B3-Q1. O cloreto de hidrogênio (HCl) é um gás nas condições ambientes (25°C e 1 atm). Sendo assim, imagine um recipiente com pistão móvel contendo esse gás. Se o pistão for pressionado continuamente, diminuindo o espaçamento entre as moléculas de HCl , o que ocorrerá com as interações intermoleculares?



Nessa questão, que aborda a *compressibilidade dos gases*, 10 (dez) possibilidades de resposta foram apresentadas, todas ligadas às zonas do perfil epistemológico do conceito de interação intermolecular (excetuando-se a zona empirista). Observe as afirmativas:

- 1 - ☐ Aumentará o contato entre as moléculas.
- 2 - ☐ As moléculas se encaixarão ou se entrelaçarão umas nas outras.
- 3 - ☐ As moléculas formarão agregados, que passarão a se encaixar e se entrelaçar uns nos outros.
- 4 - ☐ Forças atrativas surgirão entre moléculas que, anteriormente, não se atraíam.
- 5 - ☐ Nenhuma força atrativa surgirá, pois já existiam forças atrativas entre todas as moléculas.
- 6 - ☐ A intensidade das forças atrativas aumentará.
- 7 - ☐ As moléculas distorcerão as densidades eletrônicas umas das outras.
- 8 - ☐ As cargas elétricas parciais (δ) existentes nas moléculas terão suas intensidades alteradas.
- 9 - ☐ Densidades eletrônicas surgirão entre as moléculas, como ocorre entre os átomos na formação das ligações químicas.
- 10 - ☐ Híbridos de ressonância intermolecular serão formados.

As três primeiras afirmativas (1, 2 e 3) estão relacionadas, a princípio, ao realismo ingênuo. As afirmativas 4, 5 e 6 contemplam tanto o racionalismo clássico como o completo. As afirmativas 7 e 8 estão relacionadas ao racionalismo completo. E as duas últimas afirmativas (9 e 10) contemplam o racionalismo discursivo.

Desse modo, entendendo que os indivíduos podem possuir mais de uma concepção sobre um mesmo conceito científico, os respondentes do formulário foram habilitados a marcar mais de uma afirmativa, a depender da maneira como interpretam o fenômeno. Observe a frequência de uso de cada uma das zonas do perfil epistemológico por parte dos professores respondentes da pesquisa:

Tabela 18 – Resultados da questão B3-Q1 da pesquisa com docentes, sobre a compressibilidade dos gases

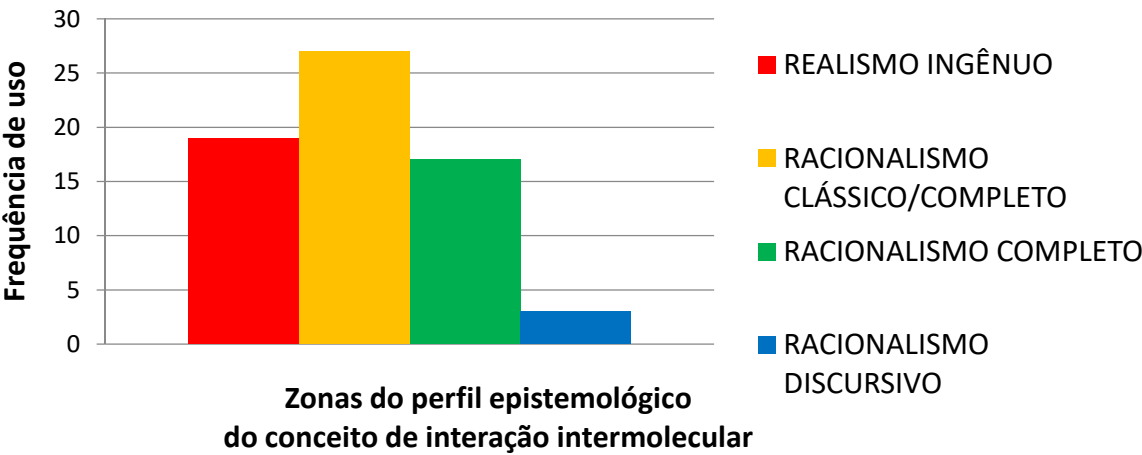
AFIRMATIVAS		ZONA		FREQ. (n)	RESPOND.
1	Aumentará o contato entre as moléculas.	Realismo ingênuo (n _{total} = 19)		15	D01, D02, D03, D04, D05, D06, D07, D08, D10, D11, D12, D13, D17, D18, D19
2	As moléculas se encaixarão ou se entrelaçarão umas nas outras.			3	D02, D05, D18
3	As moléculas formarão agregados, que passarão a se encaixar e se entrelaçar uns nos outros.			1	D04
4	Forças atrativas surgirão entre moléculas que, anteriormente, não se atraíam.	Racionalismo	Clássico/Completo (n _{total} = 27)	8	D01, D03, D09, D12, D17, D18, D19, D20
5	Nenhuma força atrativa surgirá, pois já existiam forças atrativas entre todas as moléculas.			5	D02, D04, D06, D14, D16

6	A intensidade das forças atrativas aumentará.			14	D01, D03, D05, D06, D09, D10, D11, D12, D13, D14, D15, D17, D19, D20
7	As moléculas distorcerão as densidades eletrônicas umas das outras.		Completo ($n_{\text{total}} = 17$)	11	D01, D02, D04, D06, D12, D13, D16, D17, D18, D19, D20
8	As cargas elétricas parciais (δ) existentes nas moléculas terão suas intensidades alteradas.			6	D01, D02, D03, D13, D17, D20
9	Densidades eletrônicas surgirão entre as moléculas, como ocorre entre os átomos na formação das ligações químicas.		Discursivo ($n_{\text{total}} = 3$)	2	D01, D12
10	Híbridos de ressonância intermolecular serão formados.			1	D04

Fonte: O autor, 2024

Analisando na forma de perfil:

Figura 53 – Perfil epistemológico dos docentes na explicação da compressibilidade dos gases



Fonte: O autor, 2024

Nota-se que, para a explicação do fenômeno trazido na questão B3-Q1, as zonas mais empregadas são o racionalismo clássico e completo. Essa frequência de uso atesta o quão enraizada é a ideia de que as interações intermoleculares se resumem a atrações e repulsões mediadas por forças de atuação à distância. Operando dentro dessas zonas racionalistas, pôde-se notar que a maioria dos docentes ($n = 14$; $p = 70,0 \%$) considerou a relação inversamente proporcional entre o módulo das forças intermoleculares e as distâncias entre as moléculas de HCl – o que foi posto na afirmativa 6.

A maioria dos docentes ($n = 13$; $p = 65,0 \%$) também se posicionou quanto ao surgimento (ou não) das forças intermoleculares durante a compressão do gás¹⁵³. Desse grupo, no entanto, a maior parte ($n = 8$) concordou que, com a aproximação das moléculas de HCl , “novas forças” surgem entre as entidades moleculares, revelando uma compreensão limitada da relação matemática entre o módulo de uma força de interação e a distância entre as partículas. Somente 5 (cinco) docentes demonstraram uma compreensão adequada dessa relação matemática, concordando que, com a aproximação das moléculas, não ocorre a formação de “novas forças”, e sim um aumento do módulo das forças existentes.

Na afirmativa 7, que alega que “as moléculas [de HCl , durante a compressão do gás,] distorcerão as densidades eletrônicas umas das outras”, pôde-se perceber uma divisão quase equânime dos respondentes. Do total de 20 docentes, 11 (onze) concordaram com a ocorrência dessa distorção e 9 (nove) se ausentaram dessa resposta. Deduz-se, a partir disso, que pode ter havido um conflito cognitivo nos professores. Pois, geralmente, na abordagem das forças intermoleculares, as distorções das densidades eletrônicas só são consideradas nas interações entre moléculas apolares (na explicação das forças de London), e não é o caso da molécula de HCl , que é polar.

No entanto, uma vez que toda molécula é constituída por uma nuvem de elétrons que lhe é própria, é possível afirmar que toda molécula pode ter sua densidade eletrônica distorcida ao se aproximar em demasia de outra, independentemente de suas polaridades quando isoladas (ATKINS, JONES, 2012). Essa dificuldade em aceitar que moléculas polares podem distorcer as densidades eletrônicas umas das outras também justifica o resultado obtido na afirmativa 8.

É coerente admitir que, se há distorção das densidades eletrônicas, também há alteração das cargas parciais. Porém, somente 6 (seis) professores assumiram que, com a

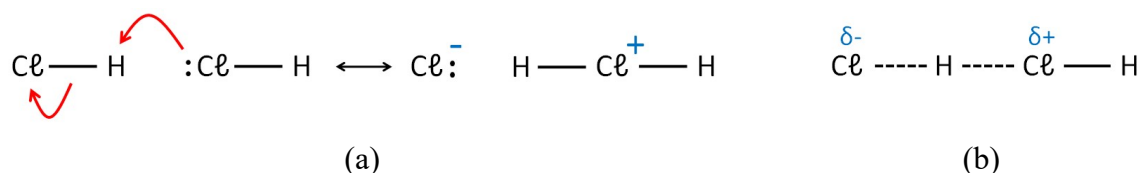
¹⁵³ É provável que os docentes que marcaram a afirmativa 4 tenham pensado que, no estado gasoso, as distâncias entre as entidades moleculares são tão grandes (quando comparadas aos tamanhos das partículas) que as forças de interação se tornam, virtualmente, nulas. Mas, uma vez que a questão B3-Q1 é objetiva, não é possível confirmar essa hipótese.

compressão do gás e a consequente aproximação de suas entidades moleculares, “as cargas elétricas parciais (δ) existentes nas moléculas terão suas intensidades alteradas”.

A próxima zona mais empregada na explicação do fenômeno trazido na questão B3-Q1 foi o realismo ingênuo. Do total de respondentes, 15 (quinze) professores ($p = 75,0 \%$) concordaram que, com a compressão do gás, aumenta-se o contato entre as suas moléculas. Essa frequência de uso pode estar associada à descrição dos estados físicos da matéria numa perspectiva submicroscópica, ao estudo dos gases e à teoria das colisões, que são temas que integram o currículo formal de química desde a Educação Básica.

Por fim, a zona do perfil epistemológico que teve a menor apropriação por parte dos professores de química foi o racionalismo discursivo, que traz uma concepção mais atual e desafiadora do conceito de interação intermolecular, pensando-o como uma interferência de ondas de matéria. A Figura 54 apresenta o híbrido de ressonância intermolecular formado, teoricamente, entre moléculas de cloreto de hidrogênio:

Figura 54 – (a) As estruturas de ressonância e (b) o híbrido de uma ligação hidrogênio entre moléculas de HCl



Fonte: O autor, 2024

Talvez, a baixa frequência de uso do racionalismo discursivo se deva (i) à regularidade com a qual os professores de química ensinam o conceito e (ii) à maneira como ensinam.

Pois, embora 13 (treze) professores ($p = 65,0 \%$) (D02, D04, D05, D07, D08, D09, D12, D13, D14, D15, D17, D19, D20) tenham declarado que buscam se atualizar sobre o conceito de interação intermolecular (questão B2-Q4), 11 (onze) professores ($p = 55,0 \%$) (D01, D02, D03, D06, D07, D10, D14, D16, D17, D18, D19) atestaram que ensinam o conceito anualmente e 4 (quatro) professores ($p = 20,0 \%$) (D05, D08, D11, D20) atestaram que o ensinam semestralmente (questão B2-Q2). E é muito provável que esse ensino, que possui uma periodicidade razoável, deva ocorrer sob uma óptica racionalista clássica e completa, tratando as interações, exclusivamente, como forças atrativas – como é comum de se observar nos livros didáticos da Educação Básica.

Essa hipótese é reforçada com a análise da experiência profissional dos docentes (questões B1-Q6 e B1-Q7), na qual se observou que a experiência do grupo de respondentes

na Educação Básica é cerca de três vezes maior do que a experiência na Educação Superior. Logo, é possível intuir que, embora os professores de química se atualizem sobre o conceito, eles não conseguem transpor os novos conhecimentos para as suas aulas cotidianas, continuando a repetir as tradicionais formas de ensinar sobre as interações.

Acerca dos 3 (três) docentes que marcaram as afirmativas correspondentes ao racionalismo discursivo (D01, D04, D12), sabe-se que 2 (dois) são licenciados em química (D01, D04) e 1 (um) é graduado em tecnologia de processos químicos (D12). Os dois licenciados cursaram mestrado em ensino de química; já o bacharel cursou mestrado em ciência e tecnologia de polímeros. Nenhum deles cursou o doutorado. Os docentes D01 e D04, que possuem, respectivamente, 7 e 3 anos de experiência no ensino de química na Educação Básica – e, exclusivamente, na rede privada –, declararam que já ensinaram sobre o conceito. Um (D01) ensina anualmente; o outro (D04), esporadicamente. O docente D12 declarou nunca ter ensinado sobre as interações intermoleculares; embora tenha escrito em sua resposta à questão B2-Q4, que esse conceito integra o tema de sua dissertação de mestrado.

B3-Q2. Sabe-se que, nas condições ambientes (25 °C e 1 atm), a solubilidade do gás oxigênio (O₂) na água (H₂O) é de 6,0 mL/L. Esse oxigênio dissolvido na água é de grande importância para a vida marinha e, por consequência, para toda a biosfera.

O que ocorre entre as moléculas do gás oxigênio e da água para que a solubilidade entre essas substâncias seja possível?

O fenômeno investigado nessa questão é a *solubilidade mútua entre as substâncias químicas*. No caso, considerou-se apenas duas substâncias nas mesmas condições de temperatura e pressão (25 °C e 1 atm): a água líquida (H₂O), cuja molécula é fortemente polar, e o gás oxigênio (O₂), cuja molécula é apolar. Os dados apresentados no enunciado foram extraídos do artigo de Silva et al. (2017). E a escolha dessa combinação de moléculas (polar-apolar) foi feita, simplesmente, com o intuito de contemplar todas as possibilidades de polaridade molecular.

De acordo com a *regra dos semelhantes*, que afirma, de modo generalizador, que só há solubilidade mútua entre substâncias com a mesma polaridade, não deveria haver solubilização do gás oxigênio (apolar) na água (polar). No entanto, devido ao *efeito indutivo*,

descrito por Peter Debye (1884-1966) e corroborado por Fritz London (1900-1954), há solubilidade. As cargas elétricas parciais que são próprias das moléculas de água induzem a formação de cargas parciais nas moléculas de gás oxigênio, que, *a priori*, eram apolares. E a atração entre essas moléculas, acentuada pela deformação de suas nuvens eletrônicas, explica a observação de moléculas de gás oxigênio dispersas em meio a moléculas de água.

No formulário, de todas as respostas obtidas, 17 (dezessete) ($p = 85,0\%$) foram validadas, por trazerem explicações ao problema apresentado, e 3 (três) ($p = 15,0\%$) foram invalidadas. Dentre as respostas válidas, pôde-se perceber que diferentes zonas do perfil epistemológico foram empregadas, como o realismo ingênuo, o racionalismo clássico e o racionalismo completo. Nenhum respondente fez qualquer alusão clara ao uso de algum instrumento na explicação da solubilidade, o que omitiu a zona empirista dessa questão. E nenhum respondente fez alusão à interferência de ondas de matéria ou à formação de híbridos de ressonância intermolecular entre as moléculas de água e as moléculas de gás oxigênio, o que omitiu a zona racionalista discursiva.

Além disso, ocorreu de alguns respondentes (D13, D17, D20) conciliarem ideias de mais de uma zona do perfil epistemológico na explicação do fenômeno trazido pela questão. Desses, no entanto, destacam-se o D13 e o D17, que conciliaram ideias realistas com racionalistas. O D17, por exemplo, usou a escala de energia usada, comumente, para as interações intermoleculares – na qual a força de London possui uma energia potencial média menor do que a força do tipo dipolo-dipolo, e essa, por sua vez, possui uma energia potencial média menor do que as ligações hidrogênio – para determinar “quem aprisiona” e “quem é aprisionado” no processo de solubilização. Observe a explicação desse docente:

D17 – *“O oxigênio se posiciona na matriz da água. Acredito as forças das ligações de hidrogênio da água sendo maiores que as de WANDER WALLS do oxigênio faz com que esse seja aprisionado pela matriz da água”.*

Essa ideia de que a solubilização mútua entre as substâncias químicas se deve à correspondência física de suas entidades moleculares é tipicamente realista. O realismo ingênuo pensa que, se há dissolução de uma substância em outra, é porque as entidades moleculares de uma se encaixaram ou se infiltraram nas cavidades da outra.

Esse pensamento evoca a “imagem generalizadora” da *esponja*, que, de acordo com Bachelard (1996), já foi muito empregada na explicação das propriedades e das transformações da matéria e, apesar disso, se constitui de um obstáculo epistemológico, “no

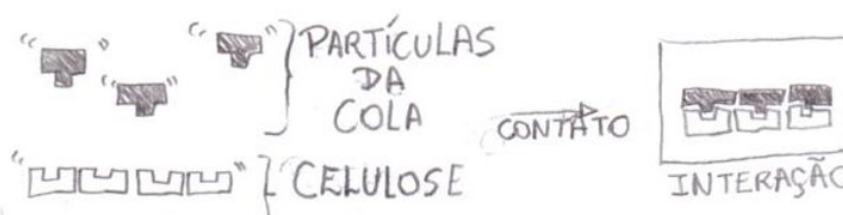
qual o lado concreto, apresentado sem prudência, impede a visão abstrata e nítida dos problemas reais” (p. 93). De acordo com o epistemólogo,

nos fenômenos designados pela palavra *esponja*, [...] a função da *esponja* é de uma evidência clara e distinta, a tal ponto que não se sente a necessidade de explicá-la (BACHELARD, 1996, p. 91, grifo do autor).

Em outros termos: a esponja nos mostra a esponjosidade. Mostra como uma matéria particular “se enche” de outra matéria. [E] essa lição da *plenitude heterogênea* basta para explicar tudo. [...] Em correlação com a intuição da *esponja*, poderíamos estudar a noção de *poro*. [...] Há poros específicos para matérias específicas. A imagem está pronta para funcionar nos dois sentidos, como a imagem da esponja, para absorver ou para filtrar. Não é de admirar que se tenha atribuído essa imagem a uma propriedade fundamental da matéria. “Todos os corpos da natureza [...] são cheios de poros; a porosidade é, portanto, uma propriedade geral dos corpos” (BACHELARD, 1996, p. 98-99, grifo do autor).

Maia e Justi (2010), em uma pesquisa com estudantes do Ensino Médio que envolveu a construção, a expressão, o teste e a reformulação de modelos em torno da pergunta “por que a cola cola?”, também identificaram a concepção das interações intermoleculares como encaixes entre as substâncias. As autoras relatam que um dos grupos de estudantes “apresentou um modelo semelhante ao mecanismo chave-fechadura, expondo verbalmente a ideia de que a cola entra nos poros dos materiais colados”. Observe a seguir, a ilustração feita por esse grupo:

Figura 55 – Modelo criado por estudantes do Ensino Médio para explicar como as colas são capazes de colar papéis



Fonte: MAIA, JUSTI, 2010

E, de modo semelhante, Junqueira e Maximiano (2020), em uma pesquisa com graduandos em química sobre como eles concebem o fenômeno da solubilização, também identificaram essa noção realista. Nas explicações dos estudantes universitários para a solubilidade do gás oxigênio em água – o mesmo par de substâncias empregado nesta dissertação –, eles também verificaram a resposta de que o “O₂ ocupa espaços entre as moléculas de água, permitindo a solubilidade” (p. 108).

Abaixo, tem-se uma tabela com todas as categorias encontradas nas respostas dadas à questão B3-Q2:

Tabela 19 – Resultados da questão B3-Q2 da pesquisa com docentes, sobre a solubilidade mútua entre o H₂O e o O₂

VALIDADE DAS RESPOSTAS	EXPLICAÇÃO DA SOLUBILIDADE MÚTUA ENTRE O H ₂ O E O O ₂	ZONA	FREQ. (n)	PORC. (p')*	RESPOND.
VÁLIDAS (n = 17; p = 85,0 %)	Encaixe das moléculas do gás oxigênio nas cavidades da água/Formação de clatrato ¹⁵⁴	<i>Realismo ingênuo</i> (n _{total} = 3)	3	15,0 %	D13, D17, D20
	Encaixe das moléculas do gás oxigênio nas cavidades da água justificado com base na ideia de forças intermoleculares	<i>Realismo ingênuo e racionalismo clássico</i> (n _{total} = 1)	1	5,0 %	D17
	Uma espécie de “afinidade” entre os átomos e as moléculas	<i>Racionalismo clássico</i> (n _{total} = 8)	1	5,0 %	D08
	A simples atração entre as moléculas (sem justificativa)		1	5,0 %	D02
	Resposta puramente classificatória, que não explica o processamento da interação intermolecular e só segue o roteiro: determinação da polaridade da molécula → determinação do tipo de força intermolecular.		3	15,0 %	D01, D03, D10
	Uso de parâmetros termodinâmicos (como a variação de entalpia, a variação de entropia, a energia livre de Gibbs, a fugacidade etc.)		3	15,0 %	D04, D05, D13
	O efeito indutivo da molécula de água sobre a molécula de gás oxigênio/Distorção da nuvem eletrônica da molécula do gás oxigênio provocada pela molécula de água	<i>Racionalismo completo</i> (n _{total} = 8)	8	40,0 %	D06, D09, D11, D14, D15, D18, D19, D20

¹⁵⁴ Os clatratos são “compostos de inclusão nos quais a molécula convidada está em uma gaiola formada pela molécula hospedeira ou por uma rede de moléculas hospedeiras” (IUPAC, 2014, p. 278).

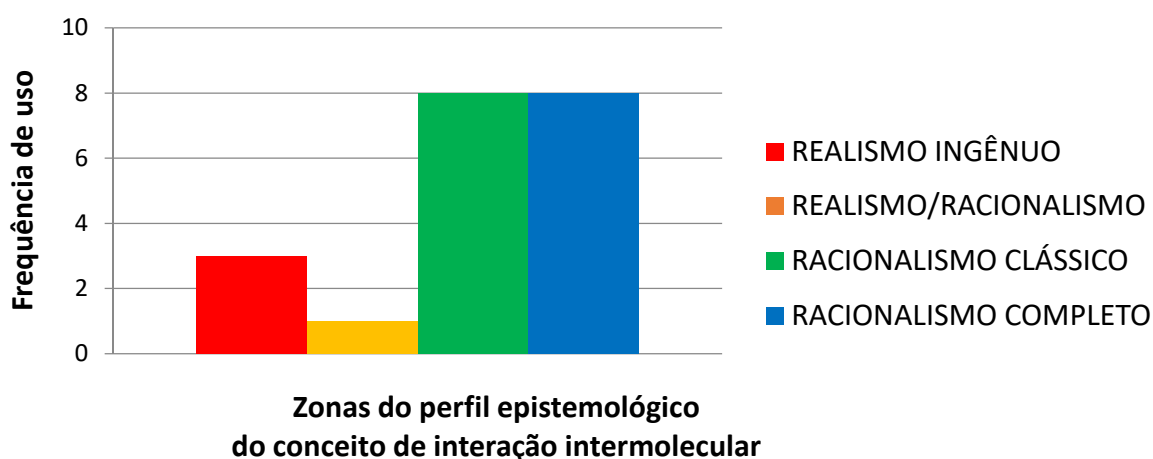
INVÁLIDAS (n = 3; p = 15,0 %)	Resposta que simplesmente repetiu o enunciado, reforçando a baixa solubilidade mútua entre as substâncias		1	5,0 %	D16
	“Não sei!”		2	10,0 %	D07, D12

* Em relação ao total de respondentes (n = 20);

Fonte: O autor, 2024

E, a seguir, o perfil construído a partir dessas respostas:

Figura 56 – Perfil epistemológico dos docentes na explicação da solubilidade mútua entre as substâncias químicas



Fonte: O autor, 2024

Assim, percebe-se, mais uma vez, o predomínio do uso das zonas racionalistas. E, logo após, o uso do realismo ingênuo.

B3-Q3. É possível determinar o tipo de interação intermolecular sem conhecer as fórmulas e as estruturas moleculares das substâncias? Se sim, como você faria?

Nessa questão, a maior parte dos respondentes (n = 14; p = 70,0 %) (D01, D02, D03, D04, D08, D11, D12, D13, D14, D15, D16, D17, D18, D19) relatou que *não é possível* determinar o tipo de interação que ocorre entre as entidades de uma substância química sem o conhecimento de sua fórmula e de sua estrutura moleculares. E, de fato, historicamente, a diferenciação das forças intermoleculares foi muito posterior ao conhecimento das

composições químicas dos materiais, requisitando a aplicação de conceitos como o de dipolo elétrico e de momento dipolar no estudo das entidades moleculares.

Essa sequência histórica se reflete na metodologia comumente adotada na determinação da força intermolecular predominante em uma substância. Primeiro, a fórmula molecular da substância é conhecida; depois, a geometria molecular é determinada, permitindo a inferência da polaridade da molécula; e é somente a partir da polaridade que se aponta a força intermolecular. Esse parece ser o meio mais “preciso” para determinar o tipo de interação/força.

No entanto, 6 (seis) professores ($p = 30,0 \%$) (D05, D06, D07, D09, D10, D20) indicaram que *é possível* determinar o tipo de interação/força intermolecular sem o conhecimento prévio da fórmula e da estrutura das moléculas (Tabela 20). Na justificativa de suas respostas, 5 (cinco) deles (D05, D06, D09, D10, D20) recorreram ao empirismo – principalmente, à verificação do estado físico, à medição das temperaturas de fusão e de ebulição e a testes de solubilidade mútua. A seguir, observe a tabela com as principais categorias de respostas obtidas na segunda pergunta dessa questão:

Tabela 20 – Resultados da questão B3-Q3 da pesquisa com docentes, sobre a relação do tipo de interação intermolecular com a fórmula e a estrutura moleculares

COMO DETERMINAR O TIPO DE INTERAÇÃO INTERMOLECULAR SEM SABER DAS FÓRMULAS E DAS ESTRUTURAS MOLECULARES?	FREQUÊNCIA (n)	RESPONDENTES
Através da massa molecular	1	D06
Através da natureza dos átomos	1	D07
Através da verificação do estado físico e das temperaturas de fusão e de ebulição	2	D06, D10
Através de técnicas de análise instrumental (como as diferentes espectroscopias)	1	D20
Através de testes de solubilização	2	D05, D09

Fonte: O autor, 2024

Combinando os dados experimentais obtidos através de todos esses métodos, é realmente possível inferir qual a interação/força predominante em uma substância. Todavia, sem o conhecimento da fórmula e da estrutura molecular da substância estudada, essa inferência não será muito precisa.

B3-Q4. O que ocorre com as interações intermoleculares de uma substância que está passando pelo processo de vaporização?

O fenômeno investigado nessa questão é uma *transformação de estado físico*, a *vaporização*, na qual a diferença de intensidade das interações intermoleculares, antes e após a sua ocorrência, é notória.

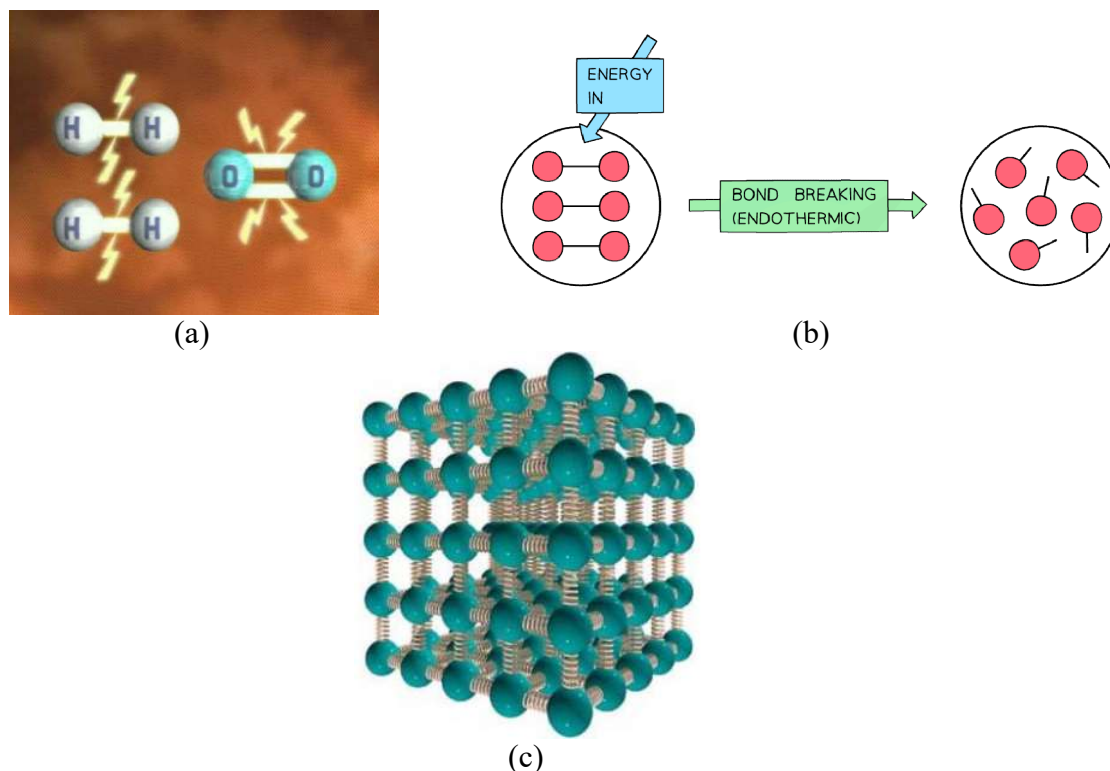
Nessa transformação, as entidades moleculares da substância no estado líquido absorvem energia progressivamente e, concomitante a essa absorção, aumentam os seus graus de agitação. Assim, com a intensificação desse processo, aumenta-se também, a distância entre as entidades. E, à medida que elas se distanciam umas das outras, diminui-se a intensidade das forças intermoleculares que as mantinham coesas. Até o ponto em que tais forças atrativas adquirem módulos tão pequenos que, efetivamente, se tornam desprezíveis; permitindo admitir que a substância passou para outro estado de agregação, o estado gasoso (de gás ou vapor).

No formulário, do total de respostas, a maioria ($n = 19$; $p = 95,0\%$) foi validada, uma vez que, realmente, trouxeram soluções para o problema apresentado. Apenas 1 (uma) resposta ($p = 5,0\%$) (D18) foi descartada.

Na análise das 19 (dezenove) respostas válidas, o primeiro critério utilizado foi quanto à *ontologia do conceito de interação intermolecular*. Ontologicamente, as interações intermoleculares são “processos”, ações que se dão em função do tempo, e não “materiais”, entes dotados de propriedades físicas (como massa, volume, dureza etc.) e que são capazes de quebrar ou de se romper (CHI, 1993). Todavia, a concepção material das interações intermoleculares está muito presente nos livros didáticos e em meio aos docentes e estudantes de química. E o mesmo ocorre com as ligações químicas, frequentemente representadas por entes concretos – como bastões, cordas, molas etc. Vide a Figura 57.

O ponto é que, tanto na Educação Básica como na Superior, é comum (i) que os sujeitos não percebam diferenças significativas entre as interações/forças intermoleculares e as ligações químicas (interatômicas); e (ii) concebam que “transformações físicas, tais como a fusão e ebulição, ocorrem pela *quebra* das ligações” (MIRANDA, BRAIBANTE, PAZINATO, 2017, p. 1811, grifo nosso).

Figura 57 – Representações materiais das ligações químicas

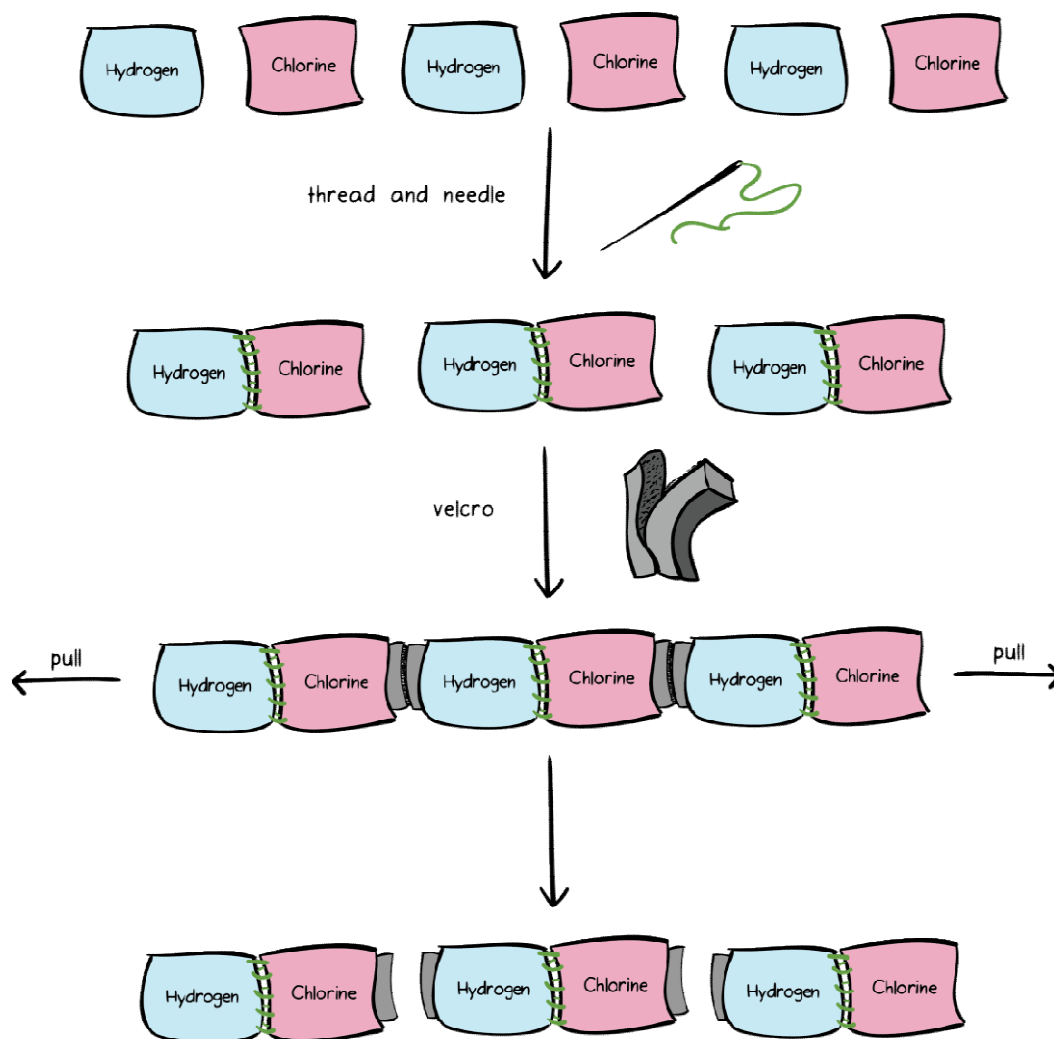


Legenda: Representações das ligações químicas através de (a) bastões, (b) de linhas e (c) de molas.

Fonte: YOUTUBE, 2012; SAVE MY EXAMS, 2024; UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, 20--, p. 5

Logo, não causa surpresa constatar que muitos indivíduos pensam que, durante a vaporização de uma substância, as interações/forças que ocorrem entre as suas entidades moleculares se “quebram” ou se “rompem” como se fossem entes concretos, análogos a uma “corda” que, sendo esticada em demasia, pode “arrebentar”. Observe, por exemplo, a Figura 58.

Nela, as ligações interatômicas que formam as moléculas de cloreto de hidrogênio (HCl) – a mesma espécie trabalhada na questão B3-Q1 – são representadas por linhas de costura. E as interações intermoleculares, que promovem a coesão entre as moléculas, são concebidas, ontologicamente, como materiais e como processos. Enquanto materiais, elas são representadas por velcros, que surgem nas moléculas de HCl na ocasião em que elas vão interagir umas com as outras. E, enquanto processos, as interações correspondem ao contato dos velcros, exprimindo um realismo ingênuo.

Figura 58 – Representações materiais das ligações químicas e das interações intermoleculares

Fonte: KHAN ACADEMY, 2024

Em vista disso, analisando as respostas dadas à questão B3-Q4 segundo o critério ontológico, obteve-se a próxima tabela:

Tabela 21 – Resultados da questão B3-Q4 da pesquisa com docentes, sobre a classificação ontológica das interações intermoleculares

CLASSIFICAÇÃO ONTOLÓGICA DAS INTERAÇÕES INTERMOLECULARES	MARCADORES	FREQ. (n)	RESPONDENTES
Processo	Uso de palavras que remetem à noção física de <i>força</i> , como “enfraqueceu”, “diminuiu” etc.	12	D01, D02, D03, D06, D09, D12, D13, D14, D15, D17, D19, D20

Material	Citação das interações como entes capazes de “quebrar”, de “romper” etc.	9	D04, D05, D07, D08, <i>D09</i> , D10, D11, D16, <i>D19</i>
----------	--	---	--

Fonte: O autor, 2024

Nessa tabela, percebe-se que a divisão dos respondentes entre as duas classificações ontológicas foi bastante equânime. A maioria deles ($n = 12$), contudo, demonstrou conceber as interações intermoleculares como processos, como foi o caso do docente D02. Observe sua resposta:

D02 – “*O aumento da temperatura fornece energia o suficiente para que haja um **enfraquecimento** nas interações entre as moléculas da substância (por conta das vibrações), causando um **afastamento** das mesmas, passando para o estado gasoso.*”

Entretanto, ainda houve aqueles (D09, D19) que conciliaram as duas concepções nas suas explicações. Veja a seguir, a resposta dada pelo docente D09:

D09 – “*Teoricamente, considerando um processo envolvendo a formação de um gás ideal, a substância em questão estará recebendo um fluxo de energia térmica, fazendo com que ela migre de estado físico. Essa energia, em parte, é utilizada para quebrar as ligações solvente-soluto e as possíveis interações soluto-soluto e solvente-solvente, fazendo com que a estrutura não possuía nenhum tipo de interação intermolecular. No entanto, **na realidade essas interações não são totalmente suprimidas, existindo as chamadas forças de atração.***”

O trecho sublinhado revela uma concepção das interações intermoleculares como materiais passíveis de serem quebrados; e o trecho em negrito demonstra que o docente também explica o fenômeno da vaporização através de forças de interação.

Por fim, o segundo critério empregado na análise das respostas válidas foi quanto à *utilização das zonas do perfil epistemológico do conceito de interação intermolecular*. Aqui, o interessante foi perceber que todos os respondentes que demonstraram conceber as interações como “processos” utilizaram-se da zona racionalista, entendendo as interações como atrações mediadas por forças. E, nessas respostas, a relação inversamente proporcional entre a intensidade das forças atrativas e a distância das partículas interagentes foi amplamente usada, como se percebe, claramente, na resposta do docente D02.

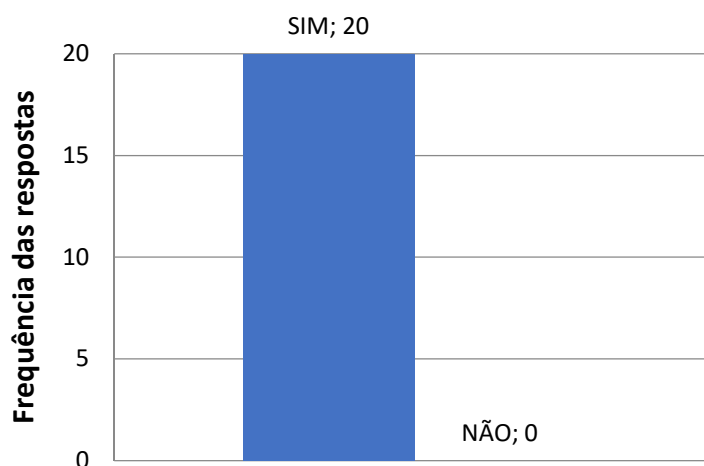
B3-Q5. Sobre a natureza das ligações hidrogênio

O objetivo dessa questão foi investigar qual a concepção dos professores de química quanto à natureza das *ligações hidrogênio*.

A estrutura da questão prevê, primeiramente, a construção de um silogismo simples, através das questões B3-Q5a, B3-Q5b e B3-Q5c, e, posteriormente, um conflito cognitivo, que se dá entre a conclusão racional do silogismo e um dado científico experimental apresentado no meio da questão – a citação do trabalho de Zhang e colaboradores (2013). O conflito pôde ser avaliado através da questão B3-Q5d.

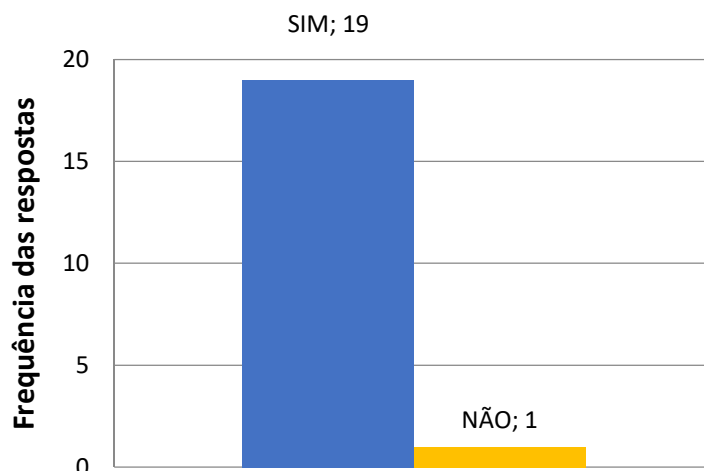
B3-Q5a. As ligações hidrogênio são um tipo de interação intermolecular?

Figura 59 – Resultados da pesquisa com docentes: questão B3-Q5a



Fonte: O autor, 2024

Logicamente, sim. As ligações hidrogênio (i) se enquadram na definição das interações intermoleculares; (ii) historicamente, foram consideradas como interações e (iii) são abordadas em conjunto com outros tipos de interações nos livros didáticos atuais (tanto da Educação Básica como da Superior). Não é por outra razão que os docentes de química participantes da pesquisa foram *unânicos* na afirmação de que as ligações hidrogênio são um tipo de interação intermolecular.

B3-Q5b. As interações intermoleculares podem ser entendidas como forças?**Figura 60** – Resultados da pesquisa com docentes: questão B3-Q5b

Fonte: O autor, 2024

Nessa questão, a palavra “podem” foi usada, justamente, para trazer uma possibilidade. E, de fato, as interações intermoleculares podem ser entendidas como atrações ou repulsões mediadas por forças, ainda que não se limitem a isso (como é o caso, por exemplo, das ligações hidrogênio).

Com o florescimento da física quântica na primeira metade do século XX, as naturezas de diversas forças intermoleculares puderam ser elucidadas – como das forças de Keesom, Debye e London –, e o ensino das interações intermoleculares como forças é profundamente arraigado nos livros didáticos da Educação Básica e Superior, como já foi discutido.

Portanto, não é por outra razão que a maioria dos respondentes ($n = 19$; $p = 95,0\%$) assinalou que as interações intermoleculares podem, sim, ser entendidas como forças. O único docente que negou essa afirmativa foi o D20.

B3-Q5c. Forças são entidades físicas observáveis?

Nessa questão, o termo “observável” possui interpretação ampla. Ainda hoje, nos campos da filosofia e da epistemologia, muito se discute acerca do que é ou do que pode ser observável.

Para Grover Maxwell (1918-1981), considerado o *locus classicus* da problematização entre observável e inobservável, “a fronteira entre o observável e o inobservável é difusa, ela muda de um problema científico para outro e é constantemente empurrada em direção à extremidade “inobservável” do espectro, à medida que desenvolvemos melhores meios de observação”¹⁵⁵ (MAXWELL, 1962, p. 13, tradução nossa). Ele argumenta:

[...] há, a princípio, uma série contínua começando com ver através de nada e contendo os seguintes membros: olhar através do vidro de uma janela, olhar através de óculos, olhar através de binóculos, olhar através de um microscópio de baixa potência, olhar através de um microscópio de alta potência etc., na respectiva ordem. A consequência importante é que, até aqui, ficamos sem critérios que nos permitiriam traçar um limite não arbitrário entre “observação” e “teoria”¹⁵⁶ (MAXWELL, 1962, p. 7, tradução nossa).

E, dessa forma, ele conclui que, se a fronteira entre o observável e o inobservável é difusa, não há uma distinção forte¹⁵⁷ entre eles. Portanto, qualquer entidade não matemática é observável a princípio.

Continuando as reflexões sobre os dois adjetivos, Bastiaan van Fraassen concorda que a fronteira entre o observável e o inobservável é difusa – uma vez que há casos em que a aplicação desses termos é imprecisa –, mas rejeita a conclusão de que, se a fronteira é difusa, não há uma distinção forte entre as duas qualificações (LAZZERI, 2015).

Em outras palavras, van Fraassen defende que, em um espectro contínuo que vai da cor branca até a preta (passando por diversas tonalidades de cinza), não é a ausência de uma fronteira bem definida que impede a definição dos extremos, ou seja, do que é branco e do que é preto. Então, a partir dessa premissa, ele definiu que

para uma entidade X contar como observável, não é importante se X existe ou não, mas apenas que, se houvesse circunstâncias S em que X estivesse presente, então observaríamos X . Se se reputar que X está presente em S , mas não observamos X , então X é inobservável. Van Fraassen considera como exemplos típicos de entidades observáveis, entidades que observamos sem auxílio de instrumentos; mas também entidades que, apesar de observarmos por meio de instrumentos, poderíamos

¹⁵⁵ O texto em língua estrangeira é: “Although I have contended that the line between the observable and the unobservable is diffuse, that it shifts from one scientific problem to another, and that it is constantly being pushed toward the “unobservable” end of the spectrum as we develop better means of observation – better instruments [...]”.

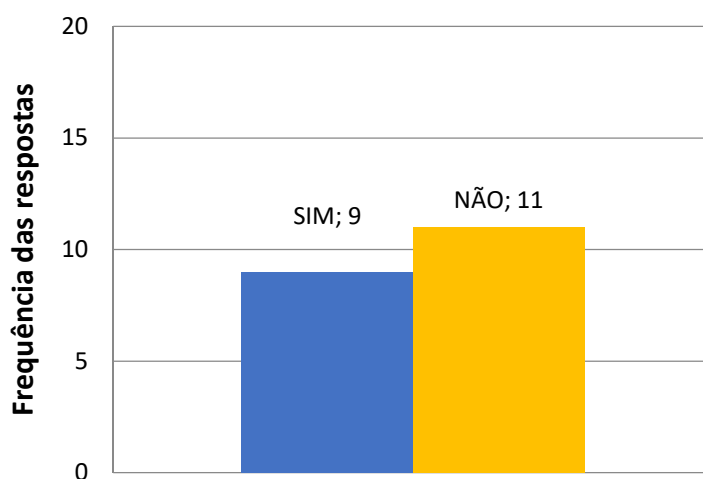
¹⁵⁶ O texto em língua estrangeira é: “[...] there is, in principle, a continuous series beginning with looking through a vacuum and containing these as members: looking through a window-pane, looking through glasses, looking through binoculars, looking through a low-power microscope, looking through a high-power microscope, etc., in the order given. The important consequence is that, so far, we are left without criteria which would enable us to draw a non-arbitrary line between “observation” and “theory””.

¹⁵⁷ Por distinção forte, entende-se, segundo Lazzeri (2015), que “se algo X conta como observável, então fica excluído que X conte como inobservável” (p. 82).

observar sem esses instrumentos se elas estivessem em nossa frente, como, por exemplo, as luas de Júpiter. Além disso, van Fraassen menciona cavalos alados como caso típico de entidade observável. Trata-se de uma entidade fictícia, mas se ela estivesse em nossa frente, então observá-la-íamos. Exemplos típicos de entidades inobserváveis dados pelo autor incluem números (LAZZERI, 2015, p. 85-86).

E, sucedendo van Fraassen, muitos outros pensadores já se debruçaram sobre esses adjetivos dicotômicos. De acordo com Lazzeri (2015), pode-se citar Michael Friedman e André Kukla; Jeff Foss e Richard Creath; Paul Churchland; Ian Hacking; Alan Musgrave e Sara Vollmer. Acredita-se, portanto, que essa complexidade atrelada ao termo “observável” justifica o resultado obtido na questão B3-Q5c (sobre as forças serem entidades observáveis) e que pode ser visto no gráfico abaixo.

Figura 61 – Resultados da pesquisa com docentes: questão B3-Q5c



Fonte: O autor, 2024

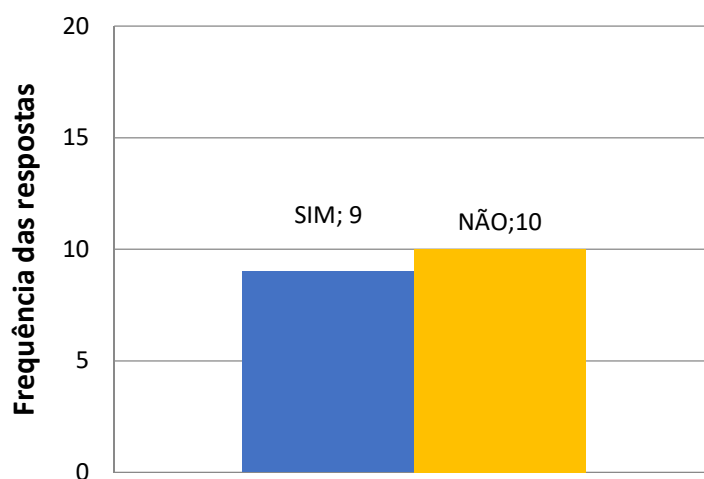
O número de professores que afirmaram que as forças são entidades observáveis ($n = 9$; $p = 45,0\%$) é muito próximo do número de professores que afirmaram que as forças não são observáveis ($n = 11$; $p = 55,0\%$). Assim, o ponto a ser analisado nessa questão é a conclusão que ela gera ao ser combinada com as questões anteriores através de um silogismo simples.

Se as ligações hidrogênio são interações intermoleculares (como propõe a questão B3-Q5a) e as interações intermoleculares podem ser entendidas como forças (como propõe a questão B3-Q5b), é correto afirmar que as ligações hidrogênio podem ser entendidas como

forças. Logo, se as forças são entidades observáveis (como propõe a questão B3-Q5c), as ligações hidrogênio também são entidades observáveis. E se as forças não são entidades observáveis (como também propõe a questão B3-Q5c), as ligações hidrogênio também não são entidades observáveis.

Desse modo, é possível inferir quantos docentes, até então, concordariam, de acordo com o silogismo, que as ligações hidrogênio são ou não observáveis. Desconsiderando o docente D20, que respondeu negativamente à questão B3-Q5b e, dessa forma, “desprezou” uma das premissas do silogismo, tem-se a seguinte previsão:

Figura 62 – Previsão de resultados para a questão B3-Q5d



Fonte: O autor, 2024

Que 9 (nove) professores ($n = 45,0\%$ do total de respondentes) concordam que as ligações hidrogênio são entidades observáveis e que 10 (dez) professores ($n = 50,0\%$ do total de respondentes) concordam que as ligações hidrogênio não são entidades observáveis. Números muito próximos! E a pergunta se as ligações hidrogênio são realmente observáveis foi feita logo em seguida, na questão B3-Q5d.

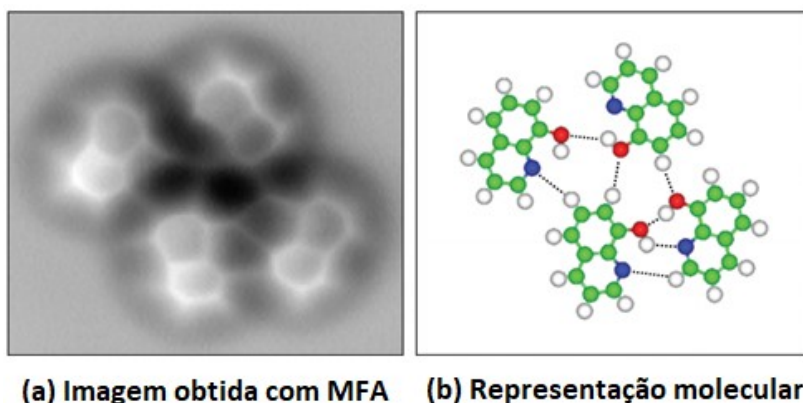
Porém, antes dessa pergunta crucial, um texto contendo imagens das ligações hidrogênio, elaboradas a partir da técnica de microscopia de força atômica (MFA), foi apresentado. Dessa forma, a questão B3-Q5d deixa de avaliar somente o que os professores pensam sobre a observância das ligações hidrogênio e também passa a avaliar o próprio texto apresentado, informando se ele foi capaz (ou não) de gerar um conflito cognitivo nos

respondentes, fazendo-os repensar suas conclusões racionais. Esse conflito poderá ser constatado a partir da distribuição das respostas.

B3-Q5d. Com base nas suas respostas anteriores, analise o experimento a seguir:

Em 2013, pesquisadores chineses divulgaram imagens das ligações hidrogênio obtidas através da microscopia de força atômica (MFA). A MFA é uma técnica na qual a superfície de uma amostra interage com um ponteiro (uma espécie de “agulha”). E conforme a superfície da amostra é varrida pelo ponteiro, é possível construir imagens com resolução atômica.

Na Figura (a), pode-se observar a imagem obtida através da técnica de MFA; na Figura (b), pode-se observar a representação molecular correspondente à imagem, onde as linhas pontilhadas significam as ligações hidrogênio.

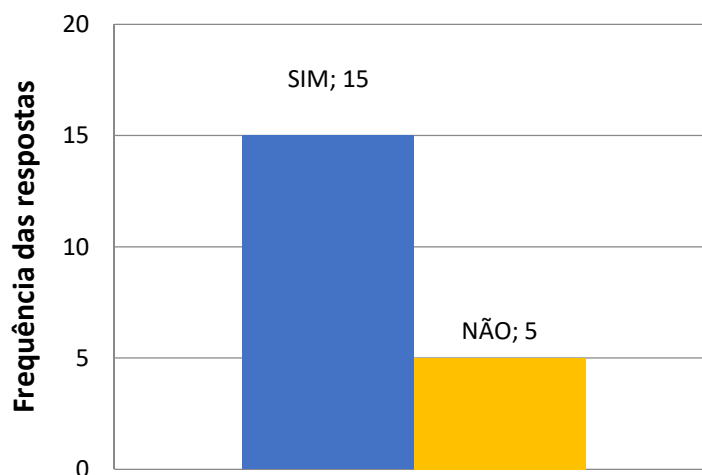


As ligações hidrogênio são realmente observáveis (ainda que numa escala atômica)? Se você acha que não, responda: como a imagem obtida experimentalmente foi possível?

Nota-se, a partir do gráfico situado na Figura 63, que a maioria dos respondentes ($n = 15$; $p = 75,0 \%$) concordou que as ligações hidrogênio *são observáveis*, um número consideravelmente maior do que o esperado através do silogismo das questões B3-Q5a, B3-Q5b e B3-Q5c, que era de 9 (nove) professores ($n = 45,0 \%$).

Essa discrepância entre a previsão extraída do silogismo e as respostas da questão B3-Q5d confirma que o texto apresentado, contendo dados experimentais sobre as ligações hidrogênio, realmente promoveu um conflito cognitivo nos respondentes. Ao todo, 5 (cinco) docentes (desconsiderando o D20) abandonaram a conclusão lógica de que as ligações hidrogênio não são observáveis para assumirem o novo dado empírico.

Figura 63 – Resultados da pesquisa com docentes: questão B3-Q5d



Fonte: O autor, 2024

Com o formulário aplicado, não foi possível verificar se esses 5 (cinco) professores (1) concebem as ligações hidrogênio como outro processo, diferente de forças (o que seria pertinente, de acordo com o capítulo 2 desta dissertação); ou se, após a leitura dos novos dados experimentais, (2) voltaram atrás nas suas premissas e passaram a pensar (i) que as ligações hidrogênio são forças e (ii) que as forças são entidades físicas observáveis (o que é uma possibilidade em discussão na filosofia da ciência e na epistemologia), concluindo, então, que as ligações hidrogênio são forças observáveis. Essa investigação, sem sombra de dúvidas, enriqueceria a pesquisa. Contudo, o anonimato prezado pelo formulário inviabilizou esse aprofundamento, uma vez que não guardou nenhum contato dos respondentes para uma entrevista posterior.

Entretanto, 5 (cinco) professores ($p = 25,0\%$) se mantiveram fieis à conclusão de que as ligações hidrogênio *não são observáveis*. Então, a esses, foi pedido para justificarem suas respostas.

Nesse ponto, retomando o silogismo elaborado pelas questões B3-Q5a, B3-Q5b e B3-Q5c, acredita-se que somente duas premissas poderiam ser questionadas: a segunda, se as interações intermoleculares podem ser entendidas como forças (como propõe a questão B3-Q5b), e a terceira, se as forças são entidades físicas observáveis (como propõe a questão B3-Q5c). Os respondentes podem alegar, por exemplo, que as ligações hidrogênio não se limitam a forças de atração e, por isso, foram observadas na MFA.

Todavia, dos 5 (cinco) professores que responderam “não” à questão B3-Q5d, foram obtidas somente 3 (três) justificativas – ou seja, 2 (dois) professores não justificaram suas respostas. As justificativas apresentadas podem ser lidas na tabela abaixo:

Tabela 22 – Resultados da questão B3-Q5d da pesquisa com docentes, sobre a observação das ligações hidrogênio

RESPONDENTE	RESPOSTA
D04	<i>Acredito que o microscópio em questão atua de forma diferente do microscópio óptico. De forma simplificada, este último amplia a imagem observada, enquanto a MFA constrói imagens com suporte computacional. Assim, a MFA faz projeções de uma imagem baseada em um modelo sofisticado. Portanto, é uma representação.</i>
D13	<i>A imagem é obtida de maneira indireta. A varredura encontra pontos onde a densidade eletrônica sofre variações. A interação intermolecular altera a densidade eletrônica entre pares de moléculas vizinhas e essa alteração pode ser medida pelo ponteiro. De maneira análoga, seria como montássemos um experimento para visualizar as linhas de um campo elétrico entre duas cargas opostas. As linhas, geralmente evidenciadas com o auxílio de areia, ou outro material, mostram apenas o caminho das linhas de campo, mas não são efetivamente as linhas de campo.</i>
D14	<i>Neste caso, há certa quantidade significativa de densidade eletrônica a qual o MFA é capaz de detectar. Ou seja, estamos, na verdade, "vendo" os elétrons e não a força.</i>

Fonte: O autor, 2024

O docente D04 interpreta o “ser observável” segundo uma perspectiva realista e uma fenomenologia imediata. Para ele, é observável o que existe na realidade e que pode ser acessado, diretamente, através dos sentidos, com uma interferência mínima dos instrumentos. Para os docentes D13 e D14, a ligação hidrogênio é somente um exemplar de força intermolecular e, portanto, é a causa de outros eventos e processos, como a interferência de ondas de matéria – no caso, de elétrons. Assim, em suas opiniões, o dado experimental foi capaz apenas de detectar o efeito, e não a causa – que seria um ente matemático, abstrato e teórico. Ambos os modelos de resposta guardam uma forte coerência interna.

O fato é que as ligações hidrogênio são interações intermoleculares; e são mais bem descritas como interferências de onda de matéria – no caso, dos elétrons das moléculas interagentes. E o aumento da densidade eletrônica gerada entre as moléculas interagentes pode, sim, ser detectado pela MFA.

Desse modo, a questão B3-Q5, como um todo, demonstra como ideias mal interpretadas em uma época – que é o caso da concepção das ligações hidrogênio como forças de ação à distância – traduzem-se em obstáculos epistemológicos à evolução do conhecimento científico, ora dificultando ou, até mesmo, impedindo a assimilação de novas maneiras de pensar (BACHELARD, 1996).

Conclusão

A razão não deve sobrevalorizar uma experiência imediata; deve pelo contrário pôr-se em equilíbrio com a experiência mais ricamente estruturada. Em todas as circunstâncias, o *imediato* deve ceder ao *construído* (BACHELARD, 1978a, p. 87, grifo do autor).

Esta é, portanto, a ocasião na qual o constructo desta dissertação é passado em revista, tendo como parâmetro, os objetivos inicialmente estabelecidos.

Gaston Bachelard (1884-1962), definitivamente, não é uma personalidade alheia às circunstâncias de seu tempo. Seu pensamento reflete os extremismos e as tímidas tentativas de conciliação da Europa do século XX. E isso pôde ser observado, já de início, na sua proposta de uma “terceira via epistemológica”. A epistemologia bachelardiana foge dos vícios laborais dos cientistas e dos filósofos, e, dessa maneira, se coloca num espaço intermediário e supostamente mais virtuoso, entre a experiência e a razão.

E foi nesse “entre” que Bachelard, em sua obra intitulada *A Filosofia do Não* (1940), cunhou a noção de *perfil epistemológico*, a fim de defender uma epistemologia centrada na análise dos conceitos científicos. Para ele, os conceitos científicos amadurecem, ao longo da história, de acordo com uma ordem genética, na qual cada estágio de desenvolvimento, demarcado por rupturas epistemológicas, compreende um compromisso filosófico distinto. Bachelard elencou cinco compromissos filosóficos, a partir da análise de vários conceitos: o realismo ingênuo, o empirismo claro e positivista e os racionalismos clássico, completo e discursivo. E um perfil epistemológico faz uma síntese dessas ideias, sendo um gráfico de barras que relaciona, no eixo das abscissas, tais compromissos (na forma de cinco zonas), com suas frequências de uso, no eixo das ordenadas.

Dessa maneira, em Bachelard, demonstra-se que a diversidade de perspectivas sobre um mesmo “ente” não é um aspecto exclusivo do senso-comum, reconhecido pela sua pluralidade. À ciência, também está reservado certo grau de heterogeneidade! O conhecimento científico também pode abrigar diferentes concepções (historicamente datadas) sobre um mesmo conceito ou, nas palavras do epistemólogo, “um conceito científico particular [...] pode ser interpretado sob [...] vários pontos de vista” (BACHELARD, 1978a, p. 11).

E foi nesse sentido que esta dissertação se propôs a construir e “aplicar” um perfil epistemológico para o conceito de interação intermolecular, de acordo com a metodologia bachelardiana.

Nessa construção, todavia, o primeiro passo foi definir, numa acepção ampla, o que são as interações intermoleculares. E, de fato, uma definição satisfatória foi obtida, com paralelos na literatura. As interações intermoleculares foram definidas como todo processo que ocorre entre entidades moleculares (isto é, átomos, íons, moléculas etc.) com a preservação de suas composições – excluindo-se, dessa forma, o caso das reações químicas. O próximo passo foi, então, elaborar uma narrativa histórica sobre a evolução do conceito de interação intermolecular no Ocidente.

Nessa pesquisa, que transcorreu numa abordagem mista entre a horizontal (internalista) e a vertical (externalista) – com ênfase para a primeira abordagem –, pôde-se verificar que o conceito de interação intermolecular começou a ser formulado, de modo muito incipiente, no século V a.C., com os atomistas gregos antigos; e, ainda hoje, recebe contribuições. Nesse extenso período, diversos expoentes da ciência atravessaram a história do conceito, como Giovanni Borelli (1608-1679), Isaac Newton (1642-1727), James Jurin (1684-1750), Thomas Young (1773-1829), Pierre-Simon Laplace (1749-1827), Rudolf Clausius (1822-1888), Johannes Diderik van der Waals (1837-1923), Willem Keesom (1876-1956), Josephus Debye (1884-1966), Fritz London (1900-1954) e muitos outros, que amalgamaram as fronteiras da física e da química.

Assim, a partir da análise dessa história e à luz das categorias filosóficas adotadas por Bachelard, pôde-se verificar que o conceito de interação intermolecular possui as cinco zonas epistemológicas supracitadas, todas elas em uso no discurso científico vigente.

A zona realista concebe as interações como modalidades de contato (colisão, encaixe e entrelaçamento). A zona empirista aborda as interações segundo dados obtidos da análise das propriedades e das transformações dos materiais. As zonas racionalistas clássica e completa concebem as interações como processos de atração e de repulsão mediados por forças de atuação à distância, destoando apenas na definição do momento dipolar das entidades interagentes. E a zona racionalista discursiva, por fim, engloba o processo de interferência de ondas de matéria, ao reconhecer as ligações hidrogênio, que são ligações químicas não-convencionais de três centros e quatro elétrons (3c-4e), como interações intermoleculares.

A utilização do perfil epistemológico ocorreu junto de docentes de química da Educação Básica e Superior. Foi aplicado um formulário com o intuito de saber como esses docentes concebem as interações intermoleculares e explicam alguns dos fenômenos associados a elas.

E, nessa pesquisa, constatou-se que os docentes usam com muito mais frequência, as concepções racionalistas clássica e completa do conceito. A ideia das interações intermoleculares como forças, tão reforçada nos livros didáticos, está profundamente arraigada na “leitura de mundo” dos docentes de química. Em seguida, observou-se o realismo ingênuo, que ainda está muito presente no estudo de muitos fenômenos. E, por último, o empirismo – que só tende a aparecer quando os docentes não possuem as fórmulas químicas das substâncias cujas interações estão sendo analisadas – e o racionalismo discursivo, apesar da maioria dos docentes ter relatado que busca se atualizar sobre o conceito de interação intermolecular.

Assim, com o perfil epistemológico em mãos, o produto educacional da dissertação também pôde ser confeccionado. Fez-se um *e-book* com cinco histórias sucintas sobre as interações intermoleculares, habilitado para ser usado tanto por docentes, como por estudantes de química, sejam eles da Educação Básica ou Superior. E, dessa maneira, espera-se contribuir para uma aprendizagem e um ensino mais significativos de química, utilizando como estratégia, como defendeu Junqueira (2017), uma abordagem menos classificatória das interações intermoleculares.

Quanto às perspectivas futuras deste trabalho...

- A pesquisa historiográfica pode ser continuada; acarretando, inclusive, em modificações na descrição do perfil epistemológico elaborado – que, como todo perfil, é sempre dado com força de proposta.
- Empregando o perfil construído como uma ferramenta de análise, pesquisas mais aprofundadas podem ser conduzidas com docentes de química a fim de saber como eles concebem as interações intermoleculares e os fenômenos associados a elas, alavancando novas propostas para a formação desses profissionais.
- O produto educacional desta dissertação (o *e-book*) também pode ser aplicado, demandando uma nova edição do seu conteúdo.
- E, a partir da metodologia desenvolvida, novos perfis epistemológicos, para outros conceitos da química, também podem ser construídos e “aplicados”.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMABIS, J. M. et al. **Moderna Plus: Ciências da Natureza e Suas Tecnologias**, v. Água e vida. 1. ed. São Paulo: Moderna, 2020.

AMBROSETTI, A. et al. Wavelike charge density fluctuations and van der Waals interactions at the nanoscale. **Science**, v. 351, p. 1171-1176, 2016.

ANDRADE, J. A. R. **Bacon (Coleção Os Pensadores)**. 3. ed. São Paulo: Abril Cultural, 1984. Bacon – Vida e Obra, p. V-XX.

ANDRADE, V. A. et al. Perfil epistemológico do conceito sistema imune humano: Delineamento e contribuições para o ensino de Imunologia. **Latin American Journal of Science Education**, v. 4, p. 1-10, 2017.

ARISTÓTELES. **The Works of Aristotle**. Oxford: Clarendon Press, 1930 apud PORTO, C. M. A física de Aristóteles: Uma construção ingênua? **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v.31, n. 4, p. 1-8, 2009.

ATKINS, P.; JONES, L. **Princípios de Química: Questionando a vida moderna e o meio ambiente**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2012.

ARAÚJO, D. V. **A noção de ruptura epistemológica no pensamento de Gaston Bachelard**. 2017. 141 f. Dissertação (Mestrado em Filosofia) – Faculdade de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2017.

ARMSTRONG, H. E. The Origin of Osmotic Effects. IV. Hydronodynamic Change in Aqueous Solutions. **Proceedings Of The Royal Society**, v. 103, p. 610-618, 1923.

BACHELARD, G. **A epistemologia**. Lisboa: Edições 70, 2006.

BACHELARD, G. **A Filosofia do Não**. São Paulo: Abril Cultural, 1978a. p. 1-88. (Coleção Os Pensadores)

BACHELARD, G. **A formação do espírito científico**: Contribuição para uma psicanálise do conhecimento. Rio de Janeiro: Contraponto, 1996.

BACHELARD, G. **A poética do devaneio**. São Paulo: Martins Fontes, 1988.

BACHELARD, G. **O novo espírito científico**. São Paulo: Abril Cultural, 1978b. p. 89-180. (Coleção Os Pensadores)

BARBOSA, E. Gaston Bachelard e o racionalismo aplicado. **Cronos**, v. 4, n. 1/2, p. 33-37, jan./dez. 2003.

BARDIN, L. **Análise de Conteúdo**. Lisboa: Edições 70, 1977.

BARROS, M. A. S. O perfil epistemológico dos alunos do curso de licenciatura em Química e Física da UFRPE sobre o fenômeno de capilaridade. **XV Encontro Nacional de Ensino de Química (XV ENEQ)**. 2010.

BENEDICTO, E. C. P.; SILVA, P. R. L. Discussões acerca das formas de atualização de professores de química do Ensino Médio. **Multi-Science Journal**, v. 1, n. 13, p. 282-287, 2018.

BERNAL, J. D.; FOWLER, R. H. A Theory of Water and Ionic Solution, with Particular Reference to Hydrogen and Hydroxyl Ions. **The Journal of Chemical Physics**, v. 1, n. 8, p. 515-548, 1933.

BORELLI, G. A. **De Motionibus Naturalibus, A Gravitate Pendentibus**. 1670.

BOYLE, R. **A defense of the doctrine touching the spring and weight of the air**. 16-- apud ZATERKA, L. As teorias da matéria de Francis Bacon e Robert Boyle: Forma, textura e atividade. **SCIENTIAE studia**, v. 10, n. 4, p. 681-709, 2012.

BRAGG, W. H. The Crystal Structure of Ice. **Proceedings of the Physical Society of London**, v. 34, p. 98-103, 1922.

BRASIL. Ministério de Educação e Cultura. Lei nº 9.394, de 20 de dezembro de 1996. Estabelece as diretrizes e bases da educação nacional. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 23 dez. 1996.

BRASIL. Ministério de Educação e Cultura. **Mestrado Profissional: o que é?** 2019. Disponível em: <<https://www.gov.br/capes/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/avaliacao/sobre-a-avaliacao/avaliacao-o-que-e/sobre-a-avaliacao-conceitos-processos-e-normas/mestrado-profissional-o-que-e>>. Acesso em: 26 jun. 2024.

BULCÃO, M. **O racionalismo da ciência contemporânea**: Introdução ao pensamento de Gaston Bachelard. São Paulo: Ideias & Letras, 2009.

BUSCATTI JUNIOR, D. A. **O perfil epistemológico do conceito de espaço em alunos do curso de licenciatura em física**. 2014. 96 f. Dissertação (Mestrado em Educação para Ciências) – Faculdade de Ciências, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2014.

CÂMARA BRASILEIRA DO LIVRO. **Panorama do Consumo de Livros**: Um estudo sobre o perfil e hábitos de compradores de livros no Brasil. p. 1-77, 2023. Disponível em: <https://cbl.org.br/wp-content/uploads/2024/02/1701890856753Pesquisa20Panorama20do20Consumo20de20Livros_para20publicaC3A7C3A3o_V1.pdf>. Acesso em: 26 jun. 2024.

CAMEL, T. O.; FILGUEIRAS, C. A. L. A importância da lei de Gay-Lussac para a classificação dos compostos orgânicos. **Química Nova**, v. 36, n. 5, p. 738-747, 2013.

CANTOR, G. N. Thomas Young's Lectures at the Royal Institution. **Notes & Records of The Royal Society**, v. 25, n. 1, p. 87-112, 1970.

CARDOSO, M. Capilaridade. **InfoEscola**. Disponível em: <<https://www.infoescola.com/fisica/capilaridade/>>. Acesso em: 07 jul. 2023.

CARUSO, F. O milho e a pérola: A descoberta do anti-elétron, a confirmação da teoria quântica do elétron e a moral da fábula. **Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas**, v. 16, p. 1-12, 1997.

CARVALHO FILHO, J. E. C. Educação científica na perspectiva bachelardiana: Ensino enquanto formação. **Ensaio – Pesquisa em Educação em Ciências**, v. 8, n. 1, jul. 2006.

CASA DAS CIÊNCIAS. **Recursos Educativos de Física**: Lei de Jurin. Disponível em: <[https://www.casadasciencias.org/recurso/6194#:~:text=Para%20os%20l%C3%ADquidos%20que%20molham,n%C3%A3o%20molha%20mesmo%20\(merc%C3%BArio\).](https://www.casadasciencias.org/recurso/6194#:~:text=Para%20os%20l%C3%ADquidos%20que%20molham,n%C3%A3o%20molha%20mesmo%20(merc%C3%BArio).>)>. Acesso em: 18 jul. 2023.

CASPARI, W. A. Crystallography of the Aliphatic Dicarboxylic Acids. **Journal of Chemical Sciences**, p. 3235-3241, 1928.

CASTELLAN, G. **Fundamentos de Físico-Química**. Rio de Janeiro: LTC, 1986.

CATHARINO, T. R. **Psicologia na educação**: Contribuições da Análise Institucional para o Processo Pedagógico. 20--.

CEDRAN, J. C. **O conceito de estrutura dos compostos orgânicos**: Uma análise à luz da epistemologia de Gaston Bachelard. 2015. 170 f. Tese (Doutorado em Educação para a Ciência e a Matemática) – Centro de Ciências Exatas, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2015.

ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. **Fluid Mechanics**: Fundamentals and Applications. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 2014.

CENTRO BRASILEIRO DE PESQUISAS FÍSICAS. Partículas elementares: A (des)construção da matéria pelo homem. Disponível em: <http://www.cbpf.br/~desafios/media/livro/Particulas_elementares.pdf>. Acesso em: 04 mar. 2022. In: _____. **Um olhar para o futuro**: Desafios da física para o século 21. Rio de Janeiro: Vieira & Lent: FAPERJ, 2008.

CHALMERS, A. F. **O que é ciência afinal?** 1. ed. São Paulo: Brasiliense, 1993.

CHI, M. T. H. Barriers to Conceptual Change in Learning Science Concepts: A Theoretical Conjecture. **The Proceedings of the Third International Seminar on Misconceptions and Educational Strategies in Science and Mathematics**, p. 3-15, 1993.

CLAPEYRON, E. Mémoire Sur La Puissance Motrice De La Chaleur. **Journal de l'Ecole Polytechnique**, p. 153-190, 1834.

CLAUSIUS, R. On a mechanical theorem applicable to heat. **Philosophical Magazine and Journal of Science**, v. 40, n. 265, p. 122-127, 1870.

CLAUSIUS, R. Ueber die Art der Bewegung, welche wir Wärme nennen. **Annalen Der Physik Und Chemie**, v. 176, n. 3, p. 353-380, 1857.

COLL, C. et al. **O construtivismo na sala de aula**. 6. ed. São Paulo: Ática, 2009.

COLOMBO JUNIOR, P. D. **A percepção da gravidade em um espaço fisicamente modificado**: Uma análise à luz de Gaston Bachelard. 2010. 169 f. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências) – Faculdade de Educação, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

CONSTABLE, E. C.; HOUSECROFT, C. E. Chemical bonding: The journey from miniature hooks to Density Functional Theory. **Molecules**, v. 25, n. 2623, p. 1-44, 2020.

CORREIO BRAZILIENSE. **Venda de e-book dispara no Brasil durante a pandemia**. 2021. Disponível em: <<https://www.correiobraziliense.com.br/diversao-e-arte/2021/07/4934936-venda-de-e-book-dispara-no-brasil-durante-a-pandemia.html>>. Acesso em: 26 jun. 2024.

COTRIM, G.; FERNANDES, M. **Fundamentos de Filosofia**. 2. ed. São Paulo: Saraiva, 2013.

DICIONÁRIO ETIMOLÓGICO. **Molécula**. Disponível em: <<https://www.dicionarioetimologico.com.br/molecula/>>. Acesso em: 03 jul. 2023.

DICKINSON, R. G.; RAYMOND, A. L. The Crystal Structure of Hexamethylene-Tetramine. **Journal of the American Chemical Society**, v. 45, n. 1, p. 22-29, 1923.

DIMOV, L. F.; PECHLIYE, M. M.; JESUS, R. C. Caracterização Ontológica do Conceito de Fotossíntese e Obstáculos Epistemológicos e Ontológicos Relacionados com o Ensino Deste Conceito. **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 19, p. 7-28, 2014.

DOCA, R. H.; BISCUOLA, G. J.; BÔAS, N. V. **Física**, v. 1. 1. ed. São Paulo: Saraiva, 2010.

DONOSO, J. P. **Datas e personagens na história da termodinâmica**. São Paulo: Universidade de São Paulo, Instituto de Física de São Carlos, [20--]. 40 p. Notas de aula.

DORIGON, L. et al. Perfil epistemológico para o conceito de transformações apresentado nos livros didáticos de química da 1ª série do ensino médio. **Revista Brasileira de Ensino de Ciência e Tecnologia**, v. 12, n. 1, p. 584-597, jan./abr. 2019.

DUTRA, J. C. S. **Uma proposta para o ensino de física centrada na história da ciência e epistemologia de Bachelard**. 2015. 218 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências) – Universidade Federal do Pampa, Bagé, 2015.

EULER, L. **Recherches sur la courbure des surfaces**. 1767.

FABBRIZZI, L. Beyond The Molecule: Intermolecular Forces from Gas Liquefaction to X–H $\cdots \pi$ Hydrogen Bonds. **ChemPlusChem**, v. 87, p. 1-23, 2022.

FARADAY, M. **On the condensation of several gases into liquids**. 1823.

FELTRE, R. **Química**, v. 1. 6. ed. São Paulo: Moderna, 2004.

FEMTO. **Cours de Mécanique des Fluides: Tension Superficielle**. 2011. Disponível em: <https://femto-physique.fr/mecanique_des_fluides/tension-de-surface.php>. Acesso em: 23 jul. 2023.

FIGUEIRA, D. G. **História**. 1. ed. São Paulo: Ática, 2005.

FILGUEIRAS, C. A. L. **Lavoisier: O estabelecimento da Química Moderna**. 2. ed. São Paulo: Odysseus, 2007.

FLORES, D. Propriedades da água. **ESCOLA educação**. 2020. Disponível em: <<https://escolaeducacao.com.br/propriedades-da-agua/>>. Acesso em: 18 jul. 2023.

FOLHA DE SÃO PAULO. **Venda de livros digitais cresce 115% em três anos, mostra pesquisa**. 2020. Disponível em: <<https://www1.folha.uol.com.br/ilustrada/2020/08/venda-de-livros-digitais-cresce-115-em-tres-anos-mostra-pesquisa.shtml>>. Acesso em: 26 jun. 2024.

FUKUI, A. et al. **Ser Protagonista: Ciências da Natureza e Suas Tecnologias**, v. Composição e estrutura dos corpos. 1. ed. São Paulo: SM, 2020.

GASPARETTO JÚNIOR, A. As cruzadas. **InfoEscola**. Disponível em: <<https://www.infoescola.com/historia/as-cruzadas/>>. Acesso em: 03 jul. 2023.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2022.

GODOY, L.; DELL'AGNOLO, R. M.; MELO, W. C. **Multiversos: Ciências da Natureza**, v. Matéria, energia e a vida. 1. ed. São Paulo: FTD, 2020. (versão do professor)

GOODSTEIN, D.; GOODSTEIN, J. Richard Feynman and the History of Superconductivity. **Physics in Perspective**, v. 2, p. 30-47, 2000.

GOMES, G. L. **A química atomista de Leucipo e Demócrito no Tratado Sobre a Geração e a Corrupção de Aristóteles**. 2018. 266 f. Dissertação (Mestrado em Filosofia) – Faculdade de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

GOMES, L. C. A ascensão e queda da teoria do calórico. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 29, n. 3, p. 1030-1073, 2012.

GORRI, A. P.; SANTIN FILHO, O. Representação de temas científicos em pintura do século XVIII: Um estudo interdisciplinar entre química, história e arte. **Química Nova na Escola**, v. 31, n. 3, 2009.

HÄMÄLÄINEN, S. K. et al. Intermolecular Contrast in Atomic Force Microscopy Images without Intermolecular Bonds. **Physical Review Letters**, v. 113, n. 18, p. 1-5, 2014.

HARTSOEKER, N. **Principes de Physique**. 1696.

HAUKSBEE, F. **Physico-mechanical experiments on various subjects**. Londres: 1709.

HELERBROCK, R. Pressão. **Mundo Educação**. Disponível em: <<https://mundoeducacao.uol.com.br/fisica/pressao.htm>>. Acesso em: 02 jul. 2023.

HERBST, M. H.; MONTEIRO FILHO, A. R. M. Um outro olhar sobre as ligações hidrogênio. **Química Nova na Escola**, v. 41, n. 1, p. 10-16, 2019.

HOBSBAWM, E. **A era dos impérios: 1875-1914**. Rio de Janeiro: Paz e Terra, 1988.

HOBSBAWM, E. **Era dos extremos: O breve século XX (1914-1991)**. São Paulo: Companhia das Letras, 1995.

HOUAISS, A.; VILLAR, M. S.; FRANCO, F. M. M. **Dicionário Houaiss da Língua Portuguesa**. 1. ed. Rio de Janeiro: Objetiva, 2001.

INSTITUTE AND MUSEUM OF HISTORY OF SCIENCE. **Horror Vacui? The historical experiments:** Bells in the void. 2023a. Disponível em: <<https://www.imss.fi.it/vuoto/eesper5.html>>. Acesso em: 03 jul. 2023.

INSTITUTE AND MUSEUM OF HISTORY OF SCIENCE. **Horror Vacui? The historical experiments:** Robert Boyle (1627-1691). 2023b. Disponível em: <<https://www.imss.fi.it/vuoto/eboyle.html>>. Acesso em: 03 jul. 2023.

INSTITUTE AND MUSEUM OF HISTORY OF SCIENCE. **Horror Vacui? The historical experiments:** Torricelli's barometric experiment. 2023c. Disponível em: <<https://www.imss.fi.it/vuoto/eesper2.html#>>. Acesso em: 03 jul. 2023.

INTERNATIONAL UNION OF PURE AND APPLIED CHEMISTRY (IUPAC). **Compendium of Chemical Terminology (Gold Book)**. 2014. 1622 p. Disponível em: <<https://goldbook.iupac.org/>>. Acesso em: 28 jul. 2022.

ISRAELACHVILI, J. N. **Intermolecular and Surface Forces**. 3. ed. AP, 2011.

JAPIASSÚ, H.; MARCONDES, D. **Dicionário Básico de Filosofia**. 3. ed. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 2001.

JONES, J. E. On the Determination of Molecular Fields. II. From the Equation of State of a Gas. **Proceedings of the Royal Society of London**, v. 106, n. 738, p. 463-477, 1924.

JUNQUEIRA, M. M. **Um estudo sobre o tema interações intermoleculares no contexto da disciplina de química geral**: A necessidade da superação de uma abordagem classificatória para uma abordagem molecular. 2017. 275 f. Tese (Doutorado em Ensino de Ciências) – Faculdade de Educação, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

JUNQUEIRA, M. M.; MAXIMIANO, F. A. Interações intermoleculares e o fenômeno da solubilidade: Explicações de Graduandos em Química. **Química Nova**, v. 43, n. 1, p. 106-117, 2020.

JURIN, J. An account of some experiments shown before the Royal Society; with an enquiry into the cause of the ascent and suspension of water in capillary tubes. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**, v. 30, n. 355, p. 739-747, 1718.

JUSTINA, L. A. D.; CALDEIRA, A. M. A. Uma investigação com graduandos da licenciatura em Ciências Biológicas sobre a relação genótipo-fenótipo na perspectiva da epistemologia de Gaston Bachelard. **Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias**, v. 13, n. 2, p. 179-200, 2014.

KEESOM, W. H. Solidification of Helium. **Nature**, 1926.

KEESOM, W. H. The second virial coefficient for rigid spherical molecules, whose mutual attraction is equivalent to that of a quadruplet placed at their centre. **Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences**, v. 18, p. 636-646, 1915.

KHAN ACADEMY. **Intramolecular and intermolecular forces**. Disponível em: <<https://www.khanacademy.org/science/physical-chemistry-essentials/x98cdf762ed888601:gaseous-state/x98cdf762ed888601:intermolecular-forces/a/intramolecular-and-intermolecular-forces>>. Acesso em: 16 jun. 2024.

KLEIN, M. J. The Historical Origins of the Van Der Waals Equation. **Physica**, v. 73, p. 28-47, 1974.

KOSSEL, W. Über Molekülbildung als Frage des Atombaus. **Annalen Der Physik**, n. 3, p. 229-362, 1916.

KOTZ, J. C.; TREICHEL, P. M.; WEAVER, G. C. **Química Geral e Reações Químicas**, v. 1 e 2. 6. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2010.

KRAGH, H. **An introduction to the historiography of science**. New York: University of Cambridge Press, 1987.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. A. **Metodologia científica: ciência e conhecimento científico, métodos científicos, teoria, hipóteses e variáveis**. 2. ed. São Paulo: Atlas, 1991.

LAPLACE, P.-S. **Supplément au Dixième Livre du Traité de Mécanique Céleste: Sur L'action Capillaire**. p. 1-65, 1805.

LAPLACE, P.-S. **Supplément a la Théorie de L'action Capillaire**. p. 1-78, 1807.

LAPLACE, P.-S. **Traité de Mécanique Céleste**: Livre XII. p. 97-160, 1823.

LATIMER, W. M.; RODEBUSH, W. H. Polarity and Ionization from the Standpoint of the Lewis Theory of Valence. **Journal of the American Chemical Society**, v. 42, p. 1419-1433, 1920.

LAZZERI, F. Empirismo Construtivo e a Distinção Entre Entidades Observáveis e Inobserváveis. **Caderno de História e Filosofia da Ciência**, v. 1, n. 1, p. 75-109, 2015.

LEFÈVRE, J. **La liquéfaction des gaz et ses applications**. Paris: 1897.

LEWIS, G. N. The Atom and The Molecule. **Journal of the American Chemical Society**, v. 38, p. 762-785, 1916.

LIMA, C. M. C. F.; SILVA, J. L. P. B. Contribuições do desenvolvimento histórico-cultural dos conceitos de ácido e de base para o ensino de química. **Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências**, p. 157-191, 2020.

LIMA, G. M.; BARBOSA, L. C. A.; FILGUEIRAS, C. A. L. Origens e consequências da Tabela Periódica, a mais concisa enciclopédia criada pelo ser humano. **Química Nova**, v. 42, n. 10, p. 1125-1145, 2019.

LIMA, M. A. M.; MARINELLI, M. A epistemologia de Gaston Bachelard: Uma ruptura com as filosofias do imobilismo. **Revista de Ciências Humanas**, Florianópolis, v. 45, n. 2, p. 393-406, out. 2011.

LIMA, N. D. C. **A Belle Époque: Transformações urbanas, moda e influências no Rio de Janeiro**. In: XXIV ENCONTRO ESTADUAL DE HISTÓRIA DA ANPUH SÃO PAULO, 2018, São Paulo. *Anais*. Disponível em: <<https://www.encontro2018.sp.anpuh.org/site/anaiscomplementares#N>>. Acesso em: 19 jan. 2022.

LONDON, F. The General Theory of Molecular Forces. **Institut Henri Poincaré**, p. 8-26, 1936.

LOPES, S.; ROSSO, S. **Ciências da Natureza Lopes e Rosso**, v. Evolução e universo. 1. ed. São Paulo: Moderna, 2020a.

LOPES, S.; ROSSO, S. **Ciências da Natureza Lopes e Rosso**, v. Corpo humano e vida saudável. 1. ed. São Paulo: Moderna, 2020b.

LUCA, T. R. **Práticas de Pesquisa em História**. 1. ed. São Paulo: Contexto, 2023.

MACEDO, R. M. S. **Piaget**: vida e obra. In: PIAGET, J. 2. ed. São Paulo: Abril cultural, 1983. p. V - XVI. (Os Pensadores)

MAGALHÃES, W. F.; FERNANDES, N. G.; CESAR, A. **Físico-Química I**: Termodinâmica do Equilíbrio. Minas Gerais: Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Química, 2009. 35 p. Notas de aula.

MAIA, P. F.; JUSTI, R. “Por que a cola cola?”: conhecimentos prévios empregados por estudantes na elaboração de modelos para interações intermoleculares. **33ª Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Química**, 2010.

MAIA, V. L. S. **O perfil epistemológico da tecnologia em obras de ficção científica**. 2017. 67 f. Dissertação (Mestrado em Educação) – Centro de Ciências Humanas e Sociais, Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

MARTINS, A. F. P. **Concepções de estudantes acerca do conceito de tempo**: Uma análise à luz da epistemologia de Gaston Bachelard. 2004. Tese (Doutorado em Educação) – Faculdade de Educação, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

MAXWELL, G. **The ontological status of theoretical entities**. 1962. In: FEIGL, H.; MAXWELL, G. (orgs.). Scientific explanation, space and time. Minnesota Studies in the Philosophy of Science, vol. 3. Minneapolis: University of Minnesota Press, p. 3-27.

MAXWELL, J. C. **Theory of Heat**. 3. ed. Londres: 1872.

MAZOWER, M. **Continente sombrio**: A Europa no século XX. São Paulo: Companhia das Letras, 2001.

MELO, V. F. **Investigando o entendimento sobre densidade à luz da noção de Perfil Epistemológico e do Autoconceito em Química**. 2020. 291 f. Tese (Doutorado em Ensino, Filosofia e História das Ciências) – Universidade Federal da Bahia, Universidade Estadual de Feira de Santana, Salvador, 2020.

MICHAELIS. **Interação**. Disponível em: <<https://michaelis.uol.com.br/busca?id=BVqoW>>. Acesso em: 27 jul. 2022.

MIE, G. Zur kinetischen Theorie der einatomigen Körper. **Annalen Der Physik**, n. 8, 1903.

MILLINGTON, E. C. Theories of cohesion in the seventeenth century. **Annals of Science**, v. 5, n. 3, p. 253-269, 1945.

MILLINGTON, E. C. Studies in capillarity and cohesion in the eighteenth century. **Annals of Science**, v. 5, n. 4, p. 352-369, 1947.

MIRANDA, A. C. G.; BRAIBANTE, M. E. F.; PAZINATO, M. S. Concepções alternativas sobre forças intermoleculares: Um estudo a partir das publicações da área de ensino. **X Congresso Internacional Sobre Investigación En Didáctica De Las Ciencias**, p. 1807-1812, 2017.

MOCELLIN, R. C. A Química Newtoniana. **Química Nova**, v. 29, n. 2, p. 388-396, 2006.

MOORE, T. S.; WINMILL, T. F. The State of Amines in Aqueous Solution. **Journal of the Chemical Society Transactions**, v. 101, p. 1635-1676, 1912.

MOREIRA, M. A.; MASSONI, N. T. **Epistemologias do século XX**. 2. ed. Porto Alegre, 2016.

MORTIMER, E. F. Construtivismo, mudança conceitual e ensino de ciências: Para onde vamos? **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 1, p. 20 - 39, 1996.

MORTIMER, E. F. **Matéria, Energia e Vida, uma abordagem interdisciplinar**, v. Materiais e energia: Transformações e conservação. 1. ed. São Paulo: Scipione, 2020.

MÜLLER, A. The X-Ray Investigation of Fatty Acids. **Journal of the Chemical Society Transactions**, v. 123, p. 2043-2047, 1923.

MÜLLER, A. A Further X-Ray Investigation of Long Chain Compounds (n-Hydrocarbon). **Proceedings Mathematical Physical & Engineering Sciences**, v. 120, p. 437-459, 1928.

NETO, O. F. **Explorando a equação de Dirac**: Um passeio por isolantes topológicos e férmions de Majorana. 2019. 75 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Física de Materiais) – Instituto de Física, Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais, 2019.

NEWTON, I. **Óptica**. São Paulo: edUSP, 2017.

NEWTON, I. **Principia**: Princípios Matemáticos de Filosofia Natural – Livro I. São Paulo: edUSP, 2018.

NEWTON, I. **Principia**: Princípios Matemáticos de Filosofia Natural – Livros II e III. São Paulo: edUSP, 2020.

NORMAS ABNT. **Ação capilar (capilaridade)**: O que significa, como funciona, exemplos. 2022. Disponível em: <<https://www.normasabnt.org/acao-capilar/>>. Acesso em: 07 jul. 2023.

OKA, M. M. **História da eletricidade**. 2020. Disponível em: <<https://www.lsi.usp.br/~dmi/manuais/HistoriaDaEletricidade.pdf>>. Acesso em: 13 jul. 2023.

OKI, M. C. M. A eletricidade e a química. **Química Nova na Escola**, n. 12, p. 34-37, 2000.

OLEQUES, L. C. Renascimento. **InfoEscola**. Disponível em: <<https://www.infoescola.com/movimentos-culturais/renascimento/>>. Acesso em: 03 jul. 2023.

OLIVEIRA, B. G. O estado da arte da ligação de hidrogênio. **Química Nova**, v. 38, n. 10, p. 1313-1322, 2015.

ONNES, H. K. Expression of the equation of state of gases and liquids by means of series. **Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences**, v. 4, p. 125-147, 1902.

ONNES, H. K. The Condensation of Helium. **Nature**, v. 77, n. 2008, 1908.

PAULING, L. The Principles Determining the Structure of Complex Ionic Crystals. **Journal of the American Chemical Society**, v. 51, n. 4, p. 1010-1026, 1929.

PAULING, L. 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**, v. 53, n. 4, p. 1367-1400, 1931a.

PAULING, L. The Nature of the Chemical Bond. II. The One-Electron Bond and the Three-Electron Bond. **Journal of the American Chemical Society**, v. 53, n. 9, p. 3225-3237, 1931b.

PAULING, L. The Nature of the Chemical Bond. III. The Transition from One Extreme Bond Type to Another. **Journal of the American Chemical Society**, v. 54, n. 3, p. 988-1003, 1932a.

PAULING, L. The Nature of the Chemical Bond. IV. The Energy of Single Bonds and the Relative Electronegativity of Atoms. **Journal of the American Chemical Society**, v. 54, n. 9, p. 3570-3582, 1932b.

PAULING, L.; WHELAND, G. W. The Nature of the Chemical Bond. V. The Quantum-Mechanical Calculation of the Resonance Energy of Benzene and Naphthalene and the Hydrocarbon Free Radicals. **Journal of Chemical Physics**, v. 1, n. 6, p. 362-374, 1933.

PAULING, L. **The Nature of the Chemical Bond and the Structure of Molecules and Crystals: An Introduction to Modern Structural Chemistry**. 3. ed. Nova York: Cornell University Press, 1960.

PAZINATO, M. S. **Ligações químicas: Investigação da construção do conhecimento no ensino médio**. 2016. 370 f. Tese (Doutorado em Educação em Ciências) – Centro de Ciências Naturais e Exatas, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.

PEDUZZI, L. O. Q. **Do átomo grego ao átomo de Bohr**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Física, 2008.

PEREIRA, C. A. R.; PEREIRA, S. D. O Significado de Zeus na Teogonia de Hesíodo. **Revista Eletrônica Existência e Arte**, n. 4, p. 1-7, 2008.

PERUZZO, F. M.; CANTO, E. L. **Química na abordagem do cotidiano**, v. único. 2. ed. São Paulo: Moderna, 2002.

PESSANHA, J. A. M. **Bachelard (Coleção Os Pensadores)**. São Paulo: Abril Cultural, 1978. Bachelard (1884-1962) – Vida e Obra, p. I-XIV.

PESSANHA, J. A. M. **Galileu (Coleção Os Pensadores)**. São Paulo: Nova Cultural, 1996. Galileu – Vida e Obra, p. 5-9.

PESSOA JÚNIOR, O. O conceito de “força” em Newton. In: **Filosofia da física clássica**. Universidade de São Paulo: 2019. Cap. XI, p. 73-77.

PIAGET, J. **A epistemologia genética**. In: _____. 2. ed. São Paulo: Abril cultural, 1983a. p. 1-64. (Os Pensadores)

PIAGET, J. **Problemas de Psicologia Genética**. In: _____. 2. ed. São Paulo: Abril cultural, 1983b. p. 209-294. (Os Pensadores)

PIETROCOLA, M. O espaço pleno e a concepção do éter. **Física na Escola**, v. 3, n. 2, 2002.

PINHEIRO, L. A.; COSTA, S. S. C.; MOREIRA, M. A. **Do átomo grego ao modelo padrão: Os indivisíveis de hoje**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Física, 2011.

PIPER, S. H. Some examples of information obtainable from the long spacings of fatty acids. **Transactions of the Faraday Society**, v. 25, p. 348-351, 1929.

POMBO, O. **Apontamentos sobre o conceito de epistemologia e o enquadramento categorial da diversidade de concepções de ciência**. Disponível em: <https://webpages.ciencias.ulisboa.pt/~ommartins/investigacao/cat_epist.htm>. Acesso em: 17 mar. 2022.

PORTO, C. M. A física de Aristóteles: Uma construção ingênua? **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v.31, n. 4, p. 1-8, 2009.

PORTO, C. M. O atomismo grego e a formação do pensamento físico moderno. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v.35, n. 4, p. 1-11, 2013.

PORTO, L. S. **Filosofia da Educação**. Rio de Janeiro: Zahar, 2006.

PORTO, C. M.; PORTO, M. B. D. S. M. A evolução do pensamento cosmológico e o nascimento da ciência moderna. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 30, n. 4, p. 1-9, 2008.

PRIBERAM DICIONÁRIO. **Interação**. Disponível em: <<https://dicionario.priberam.org/intera%C3%A7%C3%A3o>>. Acesso em: 27 jul. 2022.

QUANE, D. The reception of hydrogen bonding by the chemical community: 1920-1937. **Bulletin for the History of Chemistry**, n. 7, p. 3-13, 1990 apud HERBST, M. H.; MONTEIRO FILHO, A. R. M. Um outro olhar sobre as ligações hidrogênio. **Química Nova na Escola**, v. 41, n. 1, p. 10-16, 2019.

QUEIROZ, E. M. **Teorias da aprendizagem**. Universidade Nove de Julho (UNINOVE). 1998.

REIF-ACHERMAN, S. Liquefaction of gases and discovery of superconductivity: two very closely scientific achievements in low temperature physics. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 33, n. 2, p. 1-17, 2011.

REIS, M. **Química**, v. 1. 2. ed. São Paulo: Ática, 2016a.

REIS, M. **Química**, v. 2. 2. ed. São Paulo: Ática, 2016b.

REPCHECK, J. **O segredo de Copérnico**: Como a revolução científica começou. 1. ed. Rio de Janeiro: Record, 2011.

REZENDE, N. R. **História das Máquinas Térmicas e o Desenvolvimento das Leis da Termodinâmica**. 1. ed. Rio de Janeiro: Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2021.

RIZZATTI, I. M. et al. Os produtos e processos educacionais dos programas de pós-graduação profissionais: proposições de um grupo de colaboradores. **ACTIO: Docência em Ciências**, v. 5, n. 2, p. 1-17, 2020.

ROBERTSON, J. M. An X-Ray Study of the Phthalocyanines. Part II. Quantitative Structure Determination of the Metal-free Compound. **Journal of Chemical Sciences**, p. 1195-1209, 1936.

ROCHA, G. R. **A história do atomismo**: A construção e a desconstrução de uma imagem sintático-semântica do conhecimento científico. 2006. 115 f. Dissertação (Mestrado em História) – Faculdade de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, nov. 2006.

ROCHA, W. R. Interações intermoleculares. **Química Nova na Escola**, n. 4, mai. 2001.

ROQUE, A. **A física na Grécia Antiga**: Aristóteles. São Paulo: Universidade de São Paulo, [201-]. 31 p. Notas de aula.

ROVARIS, T. R. **O projeto epicurista antiaristotélico de Pierre Gassendi**. 2007. 132 f. Dissertação (Mestrado em Filosofia) – Faculdade de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2007.

ROWLINSON, J. S. **Cohesion**: A scientific history of intermolecular forces. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.

SAMPAIO, M. M. et al. Uma atividade experimental para o entendimento do conceito de viscosidade. **Química Nova na Escola**, v. 37, n. 3, p. 232-235, 2015.

SANTOS, S. R. L. et al. História da eletricidade e suas aplicações atendendo ao ensino de física. In: CONGRESSO NACIONAL DE PESQUISA E ENSINO EM CIÊNCIAS, 2016. **Anais**. p. 1-6.

SANTOS, V. O que é quimo e quilo? **Brasil Escola**. Disponível em: <<https://goo.by/kewvJ>>. Acesso em: 07 jul. 2023.

SANTOS, K. C. et al. **Diálogo: Ciências da Natureza e Suas Tecnologias**, v. Vida na Terra: Como é possível? 1. ed. São Paulo: Moderna, 2020.

SANTOS, W. L. P. et al. **Química cidadã – Materiais, substâncias, constituintes, química ambiental e suas implicações sociais**, v. 1. 1. ed. São Paulo: AJS, 2012.

SANTOS, Z. T. S. **Ensino de Entropia**: Um enfoque histórico e epistemológico. 169 f. Tese (Doutorado em Educação) – Centro de Ciências Sociais Aplicadas, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2009.

SAPIENSMAN. **Fuerzas moleculares de los líquidos**: Capilaridad. Disponível em: <<http://www.sapiensman.com/neumatica/liquidos.htm>>. Acesso em: 07 jul. 2023.

SAVE MY EXAMS. **Bond Energy**. Disponível em: <<https://www.savemyexams.com/a-level/chemistry/aqa/17/revision-notes/1-physical-chemistry/1-6-energetics/1-6-1-bond-energy/>>. Acesso em: 15 jun. 2024.

SAVILLE, W. B.; SHEARER, G. An X-Ray Investigation of Saturated Aliphatic Ketones. **Journal of the Chemical Society Transactions**, v. 127, p. 591-598, 1925.

SCHNEIDER, H.-J. Noncovalent interactions: A brief account of a long history. **Journal of Physical Organic Chemistry**, v. 35, n. 7, p. 1-11, 2022.

SCUOLA POPOLARE DI FILOSOFIA - MACERATA. **Epicuro**. 2016. Disponível em: <<http://scuolapopolaredifilosofiamacerata.blogspot.com/2016/02/18-febbraio-2016-lezione-20b-epicuro.html>>. Acesso em: 02 jul. 2023.

SEQUEIRA, M.; LEITE, L. A história da ciência no ensino-aprendizagem das ciências. **Revista Portuguesa de Educação**, v. 1, n. 2, p. 29-40, 1988.

SILVA, G. R.; ERROBIDART, N. C. G. A Construção Histórica Contextual da Termodinâmica para o Ensino Médio. **Revista Insignare Scientia**, v. 3, n. 5, p. 540-559, 2020.

SILVA, I. R. C. **As filosofias ocultas na concepção de ciência em professores de física em formação**: Uma análise sob a perspectiva de Gaston Bachelard. 2021. 113 f. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências e Matemática) – Instituto de Ciências Exatas, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2021.

SILVA, L. A. et al. Solubilidade e Reatividade de Gases. **Química Nova**, v. 40, n. 7, p. 824-832, 2017.

SILVA, V. A. Rupturas epistemológicas e construtivismo pedagógico em Gaston Bachelard. **Revista Tempos e Espaços em Educação**, v. 2, p. 69-80, jan./jun. 2009.

SILVA JÚNIOR, J. S. Vasos comunicantes. **Brasil Escola**. Disponível em: <<https://brasilecola.uol.com.br/fisica/vasos-comunicantes.htm>>. Acesso em: 02 jul. 2023.

SILVA JUNIOR, W. G. **Construção epistemológica da concepção de luz por docentes do ensino médio**. 2011. 108 f. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências) – Departamento de Educação, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2011.

SOARES, C. S. **Proposta pedagógica para aplicação do software Geogebra no ensino de físico-química dos gases**. 2021. 40 f. Monografia (Licenciatura em Química) – Universidade Federal do Tocantins, Araguaína, 2021.

SOLOMONS, T. W. G.; FRYHLE, C. B. **Química Orgânica**, v. 1. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

SOUZA, J. C. (Org.). **Os pré-socráticos**: Fragmentos, doxografia e comentários. São Paulo: Abril Cultural, 1978. (Coleção Os Pensadores)

SOUZA FILHO, M. P. **O erro em sala de aula**: Subsídios para o ensino do eletromagnetismo. 230 f. Tese (Doutorado em Educação para Ciências) – Faculdade de Ciências, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2009.

SWEETMAN, A. M. et al. Mapping the force field of a hydrogen-bonded assembly. **Nature Communications**, v. 5, n. 1, p. 1-7, 2014.

THE NOBEL PRIZE. **Johannes Diderik van der Waals**: Biographical. Disponível em: <<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1910/waals/biographical/>>. Acesso em: 27 jul. 2023.

TONIDANDEL, D. A. V.; ARAÚJO, A. E. A.; BOAVENTURA, W. C. História da Eletricidade e do Magnetismo: Da Antiguidade à Idade Média. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 40, n. 4, p. 1-8, 2018.

TREVISAN, R.; ANDRADE NETO, A. S. Uma construção do Perfil Epistemológico de licenciandos em Física acerca da dualidade onda-partícula em Mecânica Quântica, após o uso de bancadas virtuais: Um estudo a partir do discurso gestual e verbal. **Centro Interdisciplinar de Novas Tecnologias na Educação (CINTED-UFRGS)**, v. 14, n. 1, p. 1-10, jul. 2016.

TRINTIN, R. S. **Análise do conceito de força nos livros didáticos de física do ensino médio sob à luz de Bachelard**. 2018. 143 f. Dissertação (Mestrado em Educação para a Ciência e a Matemática) – Centro de Ciências Exatas, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2018.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. **Interações de contato**. São Paulo. 20--. 24 p. Notas de aula. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/303163/mod_resource/content/1/for%C3%A7as_de_tensao_nivel_atomico.pdf>. Acesso em: 15 jun. 2024.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO. Programa de Pós-Graduação em Ensino de Química (PEQui-UFRJ). **Regulamento**. Disponível em: <<https://pequiufjr.wordpress.com/programa/regulamento/>>. Acesso em: 26 jun. 2024.

VAN DER WAALS, J. D. **Over De Continuïteit Van Den Gas – En Vloeïstoftoestand**. Leiden, 1873.

VAN DER WAALS, J. D. **The equation of state for gases and liquids**: Nobel Lecture. p. 254-265, 1910. Disponível em: <<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1910/waals/lecture/>>. Acesso em: 27 jul. 2023.

VEJA. **Venda de e-books cresce consolidando hábito da pandemia**. 2022. Disponível em: <<https://veja.abril.com.br/cultura/venda-de-e-books-cresce-consolidando-habito-da-pandemia>>. Acesso em: 26 jun. 2024.

WAN, E.; GALEMBECK, E.; GALEMBECK F. Polímeros Sintéticos. **Química Nova na Escola**, p. 5-8, 2001.

WEINHOLD, F.; KLEIN, R. A. What is a hydrogen bond? Resonance covalency in the supramolecular domain. **Chemistry Education Research and Practice**, v. 15, p. 276-285, 2014.

WEST, J. B. Torricelli and the Ocean of Air: The First Measurement of Barometric Pressure. **Physiology**, n. 28, p. 66-73, 2013.

WIKIPÉDIA. **Capilaridade**. Disponível em: <<https://pt.wikipedia.org/wiki/Capilaridade>>. Acesso em: 18 jul. 2023.

YOUNG, T. An Essay on the Cohesion of Fluids. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**, v. 1, p. 65-87, 1804.

YOUTUBE. **GCSE Science Revision – Breaking Bonds**. Canal JamJarMMX. 2012. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=dvJaBUxaYuk>>. Acesso em: 15 jun. 2024.

ZATERKA, L. As teorias da matéria de Francis Bacon e Robert Boyle: Forma, textura e atividade. **SCIENTIAE studia**, v. 10, n. 4, p. 681-709, 2012.

ZHANG et al. Real-Space Identification of Intermolecular Bonding with Atomic Force Microscopy. **Science**, v. 342, p. 611-614, 2013.

APÊNDICE A – Formulário aplicado a docentes de química da educação básica e/ou superior sobre as interações intermoleculares

BLOCO 1

B1-Q1. Qual foi o seu curso de graduação? _____

B1-Q2. Fez ou faz especialização ou aperfeiçoamento? ☐ Sim ☐ Não

Se sim, qual a sua área de especialização ou aperfeiçoamento? _____

B1-Q3. Fez ou faz mestrado? ☐ Sim ☐ Não

Se sim, qual a sua área de mestrado? _____

B1-Q4. Fez ou faz doutorado? ☐ Sim ☐ Não

Se sim, qual a sua área de doutorado? _____

B1-Q5. Fez ou faz pós-doutorado? ☐ Sim ☐ Não

Se sim, qual a área de pós-doutorado? _____

B1-Q6. Quantos anos de experiência você possui no ensino de química na Educação Básica? _____

B1-Q7. Quantos anos de experiência você possui no ensino de química na Educação Superior? _____

B1-Q8. Em qual(is) rede(s) de ensino você já atuou ou atua como docente?

☐ Rede privada

☐ Rede pública municipal

☐ Rede pública estadual

☐ Rede pública federal

BLOCO 2

B2-Q1. Você já ensinou sobre as interações intermoleculares na Educação Básica ou Superior? ☐ Sim ☐ Não

B2-Q2. Com qual frequência você ensina sobre as interações intermoleculares?

☐ Mensalmente

☐ Semestralmente

☐ Anualmente

☐ Esporadicamente

Caso você não tenha se identificado com nenhuma dessas alternativas, explicita seu caso:

B2-Q3. Você considera que o estudo das interações intermoleculares é relevante?

☐ Sim ☐ Não

Se sim, por quê?

B2-Q4. As interações intermoleculares são um tema sobre o qual você busca se atualizar e/ou se aprofundar? ☐ Sim ☐ Não

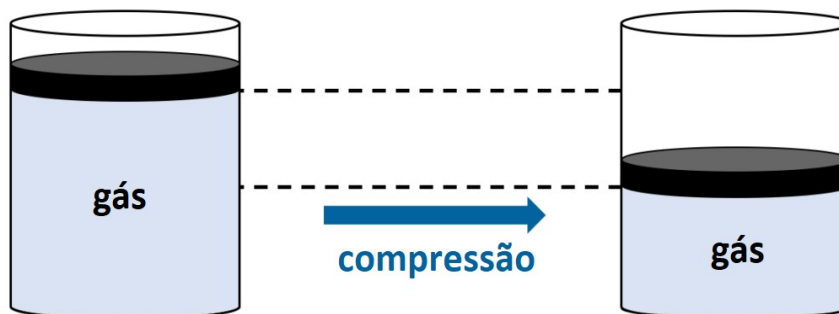
Se você busca se atualizar e/ou se aprofundar, como você faz isso?

BLOCO 3

Agora, você resolverá alguns problemas relacionados às interações intermoleculares. Responda de forma espontânea, como você responderia a qualquer destes problemas no dia a dia como docente. Se não tiver uma resposta, escreva “não sei”. Não há nenhum problema nisso!

Só pedimos que, por favor, durante a resolução destes problemas, você não pesquise! Aqui, estamos interessados na sua visão de mundo, nas suas concepções pessoais, e não numa resposta absolutamente correta. Vamos lá?

B3-Q1. O cloreto de hidrogênio (HCl) é um gás nas condições ambientes ($25\text{ }^{\circ}\text{C}$ e 1 atm). Sendo assim, imagine um recipiente com pistão móvel contendo esse gás. Se o pistão for pressionado continuamente, diminuindo o espaçamento entre as moléculas de HCl , o que ocorrerá com as interações intermoleculares? MARQUE todas as opções que forem verdadeiras na sua concepção.



- ☐ Aumentará o contato entre as moléculas.
- ☐ As moléculas se encaixarão ou se entrelaçarão umas nas outras.
- ☐ As moléculas formarão agregados, que passarão a se encaixar e se entrelaçar uns nos outros.
- ☐ Forças atrativas surgirão entre moléculas que, anteriormente, não se atraíam.
- ☐ Nenhuma força atrativa surgirá, pois já existiam forças atrativas entre todas as moléculas.
- ☐ A intensidade das forças atrativas aumentará.
- ☐ As moléculas distorcerão as densidades eletrônicas umas das outras.
- ☐ As cargas elétricas parciais (δ) existentes nas moléculas terão suas intensidades alteradas.
- ☐ Densidades eletrônicas surgirão entre as moléculas, como ocorre entre os átomos na formação das ligações químicas.
- ☐ Híbridos de ressonância intermolecular serão formados.

B3-Q2. Sabe-se que, nas condições ambientes ($25\text{ }^{\circ}\text{C}$ e 1 atm), a solubilidade do gás oxigênio (O_2) na água (H_2O) é de $6,0\text{ mL/L}$. Esse oxigênio dissolvido na água é de grande importância para a vida marinha e, por consequência, para toda a biosfera.

O que ocorre entre as moléculas do gás oxigênio e da água para que a solubilidade entre essas substâncias seja possível? Responda da forma mais detalhada que puder.

B3-Q3. É possível determinar o tipo de interação intermolecular sem conhecer as fórmulas e as estruturas moleculares das substâncias? ☐ Sim ☐ Não

Se sim, como você faria?

B3-Q4. O que ocorre com as interações intermoleculares de uma substância que está passando pelo processo de vaporização? Responda da forma mais detalhada que puder.

B3-Q5.

B3-Q5a. As ligações hidrogênio são um tipo de interação intermolecular? ☐ Sim ☐ Não

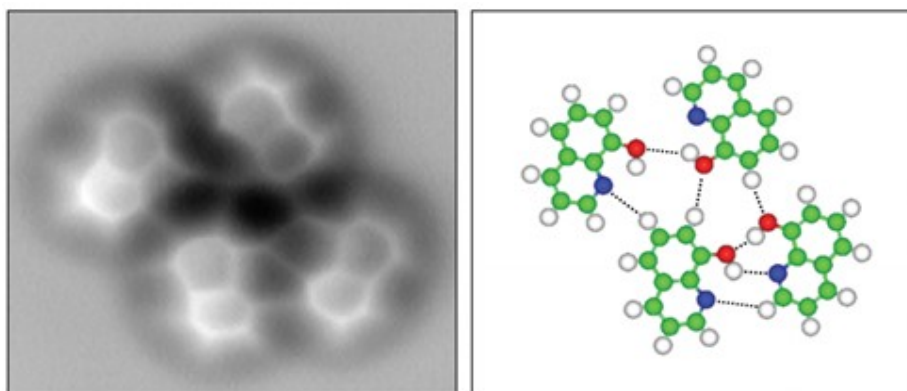
B3-Q5b. As interações intermoleculares podem ser entendidas como forças? ☐ Sim ☐ Não

B3-Q5c. Forças são entidades físicas observáveis? ☐ Sim ☐ Não

Com base nas suas respostas anteriores, analise o experimento a seguir:

Em 2013, pesquisadores chineses divulgaram imagens das ligações hidrogênio obtidas através da microscopia de força atômica (MFA). A MFA é uma técnica na qual a superfície de uma amostra interage com um ponteiro (uma espécie de “agulha”). E conforme a superfície da amostra é varrida pelo ponteiro, é possível construir imagens com resolução atômica.

Na Figura (a), pode-se observar a imagem obtida através da técnica de MFA; na Figura (b), pode-se observar a representação molecular correspondente à imagem, onde as linhas pontilhadas significam as ligações hidrogênio.



(a) Imagem obtida com MFA **(b) Representação molecular**

B3-Q5d. As ligações hidrogênio são realmente observáveis (ainda que numa escala atômica)? ☐ Sim ☐ Não

Se você acha que não, responda: como a imagem obtida experimentalmente foi possível?

APÊNDICE B – Dados brutos obtidos com o formulário aplicado a docentes de química sobre as interações intermoleculares

BLOCO 1

B1-Q1. Qual foi o seu curso de graduação?

RESPONDENTE	RESPOSTA
D01	Licenciatura em Química
D02	Licenciatura em química
D03	Licenciatura em Química
D04	Licenciatura em Química
D05	Engenharia Química
D06	Licenciatura em química na UERJ
D07	Licenciatura em Química
D08	Química
D09	Licenciatura em química
D10	Química
D11	Licenciatura em Química
D12	Tecnologia em Processos Químicos
D13	Licenciatura em química
D14	Licenciatura em Química
D15	Química com atribuições tecnológicas
D16	Licenciatura em Química
D17	Engenharia Metalúrgica
D18	Licenciatura em Química
D19	Química - licenciatura
D20	Química

B1-Q2. Fez ou faz aperfeiçoamento ou especialização? Se sim, qual a sua área de aperfeiçoamento ou especialização?

RESPONDENTE	RESPOSTA 1	RESPOSTA 2
D01	Não	
D02	Não	
D03	Não	
D04	Não	
D05	Não	
D06	Não	
D07	Sim	Ensino de Ciências
D08	Não	
D09	Sim	Especialização em ensino de química
D10	Sim	Psicopedagogia
D11	Sim	Não.
D12	Não	
D13	Não	
D14	Não	
D15	Não	
D16	Não	

D17	Sim	Metalurgia
D18	Sim	Ensino de Química
D19	Não	
D20	Não	

B1-Q3. Fez ou faz mestrado? Se sim, qual a sua área de mestrado?

RESPONDENTE	RESPOSTA 1	RESPOSTA 2
D01	Sim	Ensino de Química
D02	Sim	Ensino de química
D03	Sim	Ensino de Química
D04	Sim	Ensino de Química
D05	Sim	Ciência e tecnologia de polímeros
D06	Sim	Catalise
D07	Sim	Educação
D08	Sim	Química
D09	Sim	Mestrado em química Analítica
D10	Sim	Mestrado Profissional em Química
D11	Sim	Mestrado em Química
D12	Sim	Ciência e Tecnologia de Polímeros
D13	Sim	Físico-química (química computacional)
D14	Sim	Fotoquímica
D15	Sim	físico-química
D16	Sim	Mestrado Profissional em Química
D17	Sim	QUIMICA
D18	Sim	Mestre profissional em Química
D19	Sim	Química inorgânica
D20	Sim	Q Analítica

B1-Q4. Fez ou faz doutorado? Se sim, qual a sua área de doutorado?

RESPONDENTE	RESPOSTA 1	RESPOSTA 2
D01	Não	
D02	Não	
D03	Não	
D04	Não	
D05	Não	
D06	Sim	Catálise
D07	Sim	Educação
D08	Sim	Química
D09	Não	
D10	Não	
D11	Não	
D12	Não	
D13	Sim	Físico-química (química computacional)
D14	Não	
D15	Sim	físico-química
D16	Não	
D17	Não	
D18	Não	
D19	Não	
D20	Sim	Q Analítica

B1-Q5. Fez ou faz pós-doutorado? Se sim, qual a área de pós-doutorado?

RESPONDENTE	RESPOSTA 1	RESPOSTA 2
D01	Não	
D02	Não	
D03	Não	
D04	Não	
D05	Não	
D06	Não	
D07	Não	
D08	Não	
D09	Não	
D10	Não	
D11	Não	
D12	Não	
D13	Não	
D14	Não	
D15	Sim	físico-química
D16	Não	
D17	Não	
D18	Não	
D19	Não	
D20	Não	

B1-Q6. Quantos anos de experiência você possui no ensino de química na Educação Básica?

RESPONDENTE	RESPOSTA
D01	7
D02	3 anos
D03	1 ano
D04	3
D05	4 anos
D06	17
D07	20
D08	2
D09	2 anos
D10	12 anos
D11	13 anos
D12	6 meses
D13	10 anos
D14	8 anos
D15	0
D16	23 anos
D17	28 anos
D18	20 anos
D19	9 anos
D20	0

B1-Q7. Quantos anos de experiência você possui no ensino de química na Educação Superior?

RESPONDENTE	RESPOSTA
D01	0
D02	Nenhum
D03	Não tenho experiência
D04	Não tenho
D05	3 meses
D06	15
D07	5
D08	0
D09	Não possuo essa experiência
D10	Não dei aula em Ensino Superior
D11	5 anos
D12	Não tenho experiência nessa área
D13	1 ano
D14	0
D15	2
D16	0
D17	1 ano
D18	Nenhuma
D19	Não possuo.
D20	25 anos

B1-Q8. Em qual(is) rede(s) de ensino você já atuou ou atua como docente?

RESPONDENTE	RESPOSTA
D01	Rede privada
D02	Rede pública municipal
D03	Rede privada
D04	Rede privada
D05	Rede privada, Rede pública federal
D06	Rede privada, Rede pública estadual, Rede pública federal
D07	Rede privada, Rede pública estadual
D08	Rede privada
D09	Rede pública municipal
D10	Rede privada, Rede pública estadual, Rede pública federal
D11	Rede privada, Rede pública estadual, Rede pública federal
D12	Rede privada
D13	Rede privada, Rede pública federal
D14	Rede privada, Rede pública federal
D15	Rede pública federal
D16	Rede privada, Rede pública estadual
D17	Rede privada, Rede pública estadual, Rede pública federal
D18	Rede pública estadual
D19	Rede privada, Rede pública federal
D20	Rede privada, Rede pública federal

BLOCO 2

B2-Q1. Você já ensinou sobre as interações intermoleculares na Educação Básica ou Superior?

RESPONDENTE	RESPOSTA
D01	Sim
D02	Sim
D03	Sim
D04	Sim
D05	Sim
D06	Sim
D07	Sim
D08	Sim
D09	Não
D10	Sim
D11	Sim
D12	Não
D13	Sim
D14	Sim
D15	Não
D16	Sim
D17	Sim
D18	Sim
D19	Sim
D20	Sim

B2-Q2. Com qual frequência você ensina sobre as interações intermoleculares?

RESPONDENTE	RESPOSTA
D01	Anualmente
D02	Anualmente
D03	Anualmente
D04	Esporadicamente
D05	Semestralmente
D06	Anualmente
D07	Anualmente
D08	Semestralmente
D09	
D10	Anualmente
D11	Semestralmente
D12	
D13	Sempre que for pertinente [esporadicamente]
D14	Anualmente
D15	
D16	Anualmente
D17	Anualmente
D18	Anualmente
D19	Anualmente
D20	Semestralmente

B2-Q3. Você considera que o estudo das interações intermoleculares é relevante? Se sim, por quê?

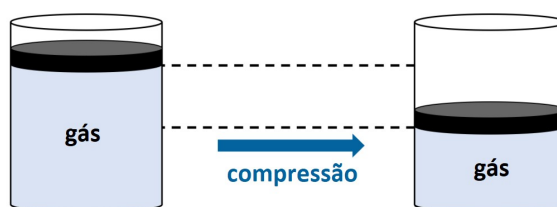
RESPONDENTE	RESPOSTA 1	RESPOSTA 2
D01	Sim	As interações intermoleculares explicam, pelo menos a nível do ensino médio, muito das propriedades das substâncias, como por exemplo, temperatura de fusão e ebulição.
D02	Sim	Ajudam a entender como funcionam as coisas macroscópicas
D03	Sim	Acredito ser importante pois com o desenvolvimento dos conceitos, os alunos conseguem ter um maior discernimento sobre as substâncias química, sua composição e como elas interagem em seu interior e entre si.
D04	Sim	Porque é um conceito base para entender outros assuntos das áreas de química em níveis aprofundados, assim como compreender processos, propriedades físicas.
D05	Sim	As interações intermoleculares são a resposta para muitos eventos observados na natureza, é um dos assuntos mais importantes a ser estudado
D06	Sim	Tais interações explicam o estado físico das substâncias e suas solubilidades.
D07	Sim	Grande aplicação
D08	Sim	Estudar este item passa para o aluno como "interagem" as moléculas com seu entorno
D09	Sim	Importante para compreendermos conceitos do cotidiano, como por exemplo a solubilização ou não de determinadas substâncias
D10	Sim	Ajuda na compreensão de alguns fenômenos importantes, por exemplo como as substâncias se dissolvem ou não uma nas outras
D11	Sim	Pois é um conceito que explica muitos fenômenos em ciências, além de ser muito contextualizado.
D12	Sim	
D13	Sim	Por considerar que é um dos pilares da química. Um bom entendimento da dinâmica dos processos químicos vem a partir de um bom entendimento do modo de interação das partículas que compõem o sistema.
D14	Sim	Auxilia na compreensão de diversos fenômenos naturais e permite o desenvolvimento de modelos para melhor compreender e manipular as interações entre moléculas.
D15	Sim	São fundamentais para o entendimento das propriedades das substâncias.
D16	Sim	Este estudo me permite explicar o porquê a água tendo uma molécula tão pequena possui um ponto de ebulição tão elevado
D17	Sim	Elucida propriedades físicas e químicas das substâncias
D18	Sim	Para explicar o comportamento das substâncias e algumas de suas peculiaridades
D19	Sim	Porque permite que o aluno compreenda diversas propriedades físicas importantes da matéria que forma os diferentes tipos de substâncias.
D20	Sim	fundamental para entender vários fenômenos, principalmente os vinculados à Química de Soluções

B2-Q4. As interações intermoleculares são um tema sobre o qual você busca se atualizar e/ou se aprofundar? Se você busca se atualizar e/ou se aprofundar, como você faz isso?

RESPONDENTE	RESPOSTA 1	RESPOSTA 2
D01	Não	
D02	Sim	Através de livro didático ou alguma matéria de site científico
D03	Não	
D04	Sim	Utilizando artigos de periódicos ou livros acadêmicos.
D05	Sim	Livros
D06	Não	
D07	Sim	Literatura
D08	Sim	Lendo artigos
D09	Sim	Sempre lendo livros didáticos voltados para o ensino superior e sempre buscando novas formas de ensinar esse assunto
D10	Não	
D11	Não	
D12	Sim	Porque faz parte da minha dissertação
D13	Sim	Através da pesquisa em livros e em artigos científicos.
D14	Sim	Leitura de livros didáticos e discussão entre pares
D15	Sim	Leitura de artigos científicos da área
D16	Não	
D17	Sim	Estudando
D18	Não	
D19	Sim	Através de leitura de artigos de revistas com pesquisas recentes sobre o tema e com a resolução de questões atuais que abordem o assunto.
D20	Sim	artigos científicos (via Scopus, Reseachgate, CAPES-Cafe, etc

BLOCO 3

B3-Q1. O cloreto de hidrogênio (HCl) é um gás nas condições ambientes (25 °C e 1 atm). Sendo assim, imagine um recipiente com pistão móvel contendo esse gás. Se o pistão for pressionado continuamente, diminuindo o espaçamento entre as moléculas de HCl, o que ocorrerá com as interações intermoleculares?



RESPONDENTE	RESPOSTA
D01	Aumentará o contato entre as moléculas., Forças atrativas surgirão entre moléculas que, anteriormente, não se atraíam., A intensidade das forças atrativas aumentará., As moléculas distorcerão as densidades eletrônicas umas das outras., As cargas elétricas parciais (δ) existentes nas moléculas terão suas intensidades alteradas., Densidades eletrônicas surgirão entre as moléculas, como ocorre entre os átomos na formação das ligações químicas.

D02	Aumentará o contato entre as moléculas., As moléculas se encaixarão ou se entrelaçarão umas nas outras., Nenhuma força atrativa surgirá, pois já existiam forças atrativas entre todas as moléculas., As moléculas distorcerão as densidades eletrônicas umas das outras., As cargas elétricas parciais (δ) existentes nas moléculas terão suas intensidades alteradas.
D03	Aumentará o contato entre as moléculas., Forças atrativas surgirão entre moléculas que, anteriormente, não se atraíam., A intensidade das forças atrativas aumentará., As cargas elétricas parciais (δ) existentes nas moléculas terão suas intensidades alteradas.
D04	Aumentará o contato entre as moléculas., As moléculas formarão agregados, que passarão a se encaixar e se entrelaçar uns nos outros., Nenhuma força atrativa surgirá, pois já existiam forças atrativas entre todas as moléculas., As moléculas distorcerão as densidades eletrônicas umas das outras., Híbridos de ressonância intermolecular serão formados.
D05	Aumentará o contato entre as moléculas., As moléculas se encaixarão ou se entrelaçarão umas nas outras., A intensidade das forças atrativas aumentará.
D06	Aumentará o contato entre as moléculas., Nenhuma força atrativa surgirá, pois já existiam forças atrativas entre todas as moléculas., A intensidade das forças atrativas aumentará., As moléculas distorcerão as densidades eletrônicas umas das outras.
D07	Aumentará o contato entre as moléculas.
D08	Aumentará o contato entre as moléculas.
D09	Forças atrativas surgirão entre moléculas que, anteriormente, não se atraíam., A intensidade das forças atrativas aumentará.
D10	Aumentará o contato entre as moléculas., A intensidade das forças atrativas aumentará.
D11	Aumentará o contato entre as moléculas., A intensidade das forças atrativas aumentará.
D12	Aumentará o contato entre as moléculas., Forças atrativas surgirão entre moléculas que, anteriormente, não se atraíam., A intensidade das forças atrativas aumentará., As moléculas distorcerão as densidades eletrônicas umas das outras., Densidades eletrônicas surgirão entre as moléculas, como ocorre entre os átomos na formação das ligações químicas.
D13	Aumentará o contato entre as moléculas., A intensidade das forças atrativas aumentará., As moléculas distorcerão as densidades eletrônicas umas das outras., As cargas elétricas parciais (δ) existentes nas moléculas terão suas intensidades alteradas.
D14	Nenhuma força atrativa surgirá, pois já existiam forças atrativas entre todas as moléculas., A intensidade das forças atrativas aumentará.
D15	A intensidade das forças atrativas aumentará.
D16	Nenhuma força atrativa surgirá, pois já existiam forças atrativas entre todas as moléculas., As moléculas distorcerão as densidades eletrônicas umas das outras.
D17	Aumentará o contato entre as moléculas., Forças atrativas surgirão entre moléculas que, anteriormente, não se atraíam., A intensidade das forças atrativas aumentará., As moléculas distorcerão as densidades eletrônicas umas das outras., As cargas elétricas parciais (δ) existentes nas moléculas terão suas intensidades alteradas.
D18	Aumentará o contato entre as moléculas., As moléculas se encaixarão ou se entrelaçarão umas nas outras., Forças atrativas surgirão entre moléculas que, anteriormente, não se atraíam., As moléculas distorcerão as densidades eletrônicas umas das outras.
D19	Aumentará o contato entre as moléculas., Forças atrativas surgirão entre moléculas que, anteriormente, não se atraíam., A intensidade das forças atrativas aumentará., As moléculas distorcerão as densidades eletrônicas umas das outras.

D20	Forças atrativas surgirão entre moléculas que, anteriormente, não se atraíam., A intensidade das forças atrativas aumentará., As moléculas distorcerão as densidades eletrônicas umas das outras., As cargas elétricas parciais (δ) existentes nas moléculas terão suas intensidades alteradas.
------------	--

B3-Q2. Sabe-se que, nas condições ambientes (25 °C e 1 atm), a solubilidade do gás oxigênio (O₂) na água (H₂O) é de 6,0 mL/L. Esse oxigênio dissolvido na água é de grande importância para a vida marinha e, por consequência, para toda a biosfera.

O que ocorre entre as moléculas do gás oxigênio e da água para que a solubilidade entre essas substâncias seja possível?

RESPONDENTE	RESPOSTA
D01	A solubilidade se dá pela interação intermolecular do tipo dipolo induzido-dipolo permanente.
D02	As interações de atração entre os átomos de hidrogênio da água e os átomos de oxigênio do O ₂ fazem com que a molécula de O ₂ se solubilize na água
D03	Ocorre a formação da interação intermolecular de tipo dipolo induzido. Isso acontece pois a água é apolar (não apresenta diferença de momento dipolar) e a molécula de oxigênio é polar (possui momento dipolar diferente de zero).
D04	À medida que ocorre o aumento da variação de entropia do sistema e a energia é liberada para formar a interação, a variação da energia livre de Gibbs diminui possibilitando a solubilidade das moléculas.
D05	As moléculas de água se arranjam em volta das moléculas de oxigênio, permitindo assim sua solubilidade até que ocorra a igualdade de fugacidade descrita pela lei de Henry.
D06	Os dipolos permanentes presentes em moléculas de água induzem dipolos temporários nas moléculas de dióxigênio que são apolares.
D07	Não sei
D08	Ou Oxigênio tem certa afinidade eletrônica com os átomos de hidrogênio presente nas moléculas da água o que faz possível que certa quantidade de oxigênio molecular (O ₂) possa estar presente o solubilizado na água
D09	A molécula de água é uma molécula polar, devido a diferença de eletronegatividade existente entre os átomos de H e O e a geometria molecular da molécula (geometria angular). A molécula de O ₂ é uma molécula Apolar, e a princípio não deveria existir interação entre a água e o oxigênio. No entanto, a molécula de água consegue induzir um dipolo na molécula de O ₂ , o que possibilita a solubilização da mesma na água. No entanto, termodinamicamente essa solubilização não é favorável, justificando o porquê de existir pouco oxigênio dissolvido na água
D10	Uma interação do tipo dipolo - dipolo induzido mantém permite com que a água dissolva o gás oxigênio.
D11	Existe uma dispersão na molécula de oxigênio, que inicialmente é apolar, sendo assim, haverá uma interação entre o gás e molécula de água.
D12	Não sei essa resposta
D13	Podemos enxergar a formação de uma solução como um processo de três etapas. (1) Formação de cavidades no solvente (processo endotérmico onde interações intermoleculares solvente-solvente são rompidas) (2) rompimentos de interações intermoleculares entre as partículas do soluto (processo endotérmico quando tais interações existem) (3) Formação de interação soluto-solvente (processo exotérmico).

	No caso de uma solução de água e oxigênio esse processo terá uma grande barreira, a alta energia de interação entre as moléculas de água e a fraca energia de interação entre as moléculas de oxigênio e de água. Soma-se a isso o fator entrópico, pois a formação dessa solução ocorre com um aumento global na entropia do sistema, sendo esse um componente que favorece a formação da solução. Tais fatores fazem com que a solubilidade do oxigênio em água seja bem baixa, porém não nula. Pois, tal processo envolveria um equilíbrio que seria descrito por uma constante que se relacionaria com a variação da energia livre de Gibbs de uma transformação que certamente seria endoergica (gerando assim uma constante que não favorece a solubilização do oxigênio). É relevante mencionar que essa conversa acima seria adequada para um professor de química, naõ sendo apropriada para alunos do ensino médio, tendo que ser adaptada.
D14	As cargas parciais das moléculas de água distorcem a nuvem eletrônica da molécula de oxigênio, criando dipolos induzidos nela. Com isso, há atração entre polos de sinal opostos entre as moléculas permitindo a interação e, portanto, a solubilização.
D15	A água possui dipolos permanentes e o oxigênio só pode produzir dipolos induzidos com os quais ele pode interagir com as moléculas de água. Esses dipolos induzidos são instáveis e duram pouquíssimo tempo (se formam e se desfazem em termos de femtossegundos) e por isso a interação entre as moléculas não é tão eficiente.
D16	Embora o O ₂ seja solúvel em H ₂ O, sua solubilidade é muito pequena
D17	O oxigênio se posiciona na matriz da água. Acredito as forças das ligações de hidrogênio da água sendo maiores que as de WANDER WALLS do oxigênio faz com que esse seja aprisionado pela matriz da água.
D18	Creio que ocorre uma distorção na nuvem eletrônica do oxigênio e esse se liga a molécula de água, essas ligações tem um ponto de saturação nas condições da cntp
D19	Esta pequena solubilização do gás oxigênio em água ocorre pois, apesar de ser apolar, a molécula de oxigênio pode sofrer, em determinados momentos, uma distorção de sua nuvem eletrônica que é impulsionada pela alta polaridade presente nas moléculas de água.
D20	é um pouco mais alta, na verdade (cerca de 8 mg O ₂ /L). A indução de dipolo no O ₂ pelo dipolo da água pode explicar a solubilidade (baixa) do O ₂ . A formação de clatratos, como ocorre com o metano também pode contribuir.

B3-Q3. É possível determinar o tipo de interação intermolecular sem conhecer as fórmulas e as estruturas moleculares das substâncias? Se sim, como você faria?

RESPONDENTE	RESPOSTA 1	RESPOSTA 2
D01	Não	
D02	Não	
D03	Não	
D04	Não	
D05	Sim	Realizaria testes de solubilidade em água e em óleo
D06	Sim	Massas moleculares e pontos de fusão e ebulição, são úteis para tais estimativas. Moléculas polares formam gases apenas quando possuem massas moleculares pequenas. Moléculas com forças intermoleculares fortes formam sólidos mais cristalinos.
D07	Sim	Pela natureza dos átomos

D08	Não	
D09	Sim	Analisando a termodinâmica do processo desolubilização, verificando se a energia envolvida na quebra das interações soluto-soluto e solvente-solvente são inferiores ou superiores as energia liberadas no processo de interação soluto-solvente
D10	Sim	Verificar o estado físico das substâncias em temperatura ambiente. E verificar seu ponto de fusão e ponto de ebulição.
D11	Não	
D12	Não	
D13	Não	A marcação foi não, pois desconheço um método dessa medição.
D14	Não	
D15	Não	
D16	Não	
D17	Não	
D18	Não	
D19	Não	Ao meu ver, como professora, acredito que o aluno precise avaliar cada situação e compreender a teoria por trás das regras, por esse motivo marquei a opção “não” na questão anterior. Porém, em casos de moléculas diatômicas simples, ou até mesmo em moléculas onde o hidrogênio se liga com átomos de flúor, oxigênio ou nitrogênio, é possível prever o tipo de interação intermolecular apenas analisando a fórmula molecular. Mas eu prefiro ensinar sempre ao meu aluno a construção da molécula de forma correta, respeitando sua geometria e de que forma ela pode alterar a polaridade, compreendendo também as diferenças entre as eletronegatividades dos átomos que compõem a molécula e a partir dessas análises determinar a polaridade da estrutura e a sua interação. Acredito que quando o aluno entende dessa forma, é capaz de perceber todos os tipos de interações que acontecem em qualquer molécula, até mesmo nos casos em que temos partes polares e apolares numa mesma estrutura.
D20	Sim	uma pergunta muito ampla. técnicas espectroscopia, desde FTIR até Auger.. Talvez seja melhor perguntar : é mais fácil estimar....

B3-Q4. O que ocorre com as interações intermoleculares de uma substância que está passando pelo processo de vaporização?

RESPONDENTE	RESPOSTA
D01	As interações ficam bem mais fracas ou inexistentes, por conta do distanciamento entre as moléculas.
D02	O aumento da temperatura fornece energia o suficiente para que haja um enfraquecimento nas interações entre as moléculas da substância (por conta das vibrações), causando um afastamento das mesmas, passando para o estado gasoso.
D03	O processo de vaporização consiste na mudança do estado líquido para o estado de vapor (gasoso) de uma substância. Considerando que quanto maior for a organização das moléculas, mais forte será a interação intermolecular, e que na

	mudança do estado líquido para o estado gasoso acontece diminuição do grau de ordenamento das moléculas em uma substância, no processo de vaporização, onde as moléculas estão menos organizadas, as interações intermoleculares se tornarão mais fracas.
D04	Com o aumento da temperatura, as moléculas ficam mais agitadas com tendência a aumentar os graus de liberdade. Com isso, a energia é superior à intensidade das interações, fazendo com que estas sejam rompidas.
D05	Ao ser fornecido calor para o sistema, energia entra no sistema, aumentando a energia cinética das moléculas. Na vaporização, a energia é suficientemente grande para romper as interações intermoleculares e com isso a molécula passa da fase líquida para a fase vapor. As moléculas da superfície migrarão primeiro para a fase vapor, uma vez que essas possuem menos moléculas interagindo com as mesmas
D06	Um líquido valoriza quando recebe calor suficiente para que a energia cinética de suas moléculas, um valor positivo, supere a energia potencial resultante das forças atrativas. Neste modelo considera-se que moléculas a grandes distâncias tem energia potencial zero e que se torna mais negativa quando moléculas se aproximam.
D07	São quebradas
D08	Em uma substância que está se evaporando, as interações intermoleculares estão se rompendo devido aumento da energia cinética gerada pelo aquecimento, portanto as moléculas sofrem afastamentos gerando que moléculas deixem a fase aquosa.
D09	Teoricamente, considerando um processo envolvendo a formação de um gás ideal, a substância em questão estará recebendo um fluxo de energia térmica, fazendo com que ela migre de estado físico. Essa energia, em parte, é utilizada para quebrar as ligações solvente-soluto e as possíveis interações soluto-soluto e solvente-solvente, fazendo com que a estrutura não possuía nenhum tipo de interação intermolecular. No entanto, na realidade essas interações não são totalmente suprimidas, existindo as chamadas forças de atração
D10	São rompidas.
D11	No processo de vaporização há a quebra das interações entre as moléculas que estavam no estado líquido, sendo assim, no estado vapor as interações são mínimas entre as moléculas.
D12	As interações moleculares diminuem, pois haverá um distanciamento entre as moléculas
D13	Tomemos como exemplo a substância água em um sistema aberto. Na vaporização as moléculas da superfície escapam do sistema sendo diluídas na atmosfera. Na evaporação as moléculas, compondo o estado líquido, tem velocidades que estão associadas diretamente às suas temperaturas (energia cinética). Ocorre que essa distribuição de velocidades, faz com que existam moléculas que estejam aceleradas o suficiente para escapar da superfície do líquido, indo em direção à atmosfera, onde irá formar uma fase de vapor. Nessa fase as interações entre as moléculas são praticamente nulas, pois elas possuem forte dependência com a distância entre as partículas. Na ebulição o processo ocorre de maneira similar, exceto pela energia cinética média das partículas que é grande o suficiente para formar bolhas de vapor de água no interior do líquido. Tais bolhas escapam para a superfície em um processo que conhecemos como ebulição. A ebulição somente ocorre se a pressão gerada pelo vapor de água se igualar a pressão atmosférica.
D14	As interações intermoleculares são enfraquecidas a ponto das moléculas conseguirem se distanciarem até o distanciamento necessário na fase gasosa.

D15	Elas continuam existindo da mesma forma que no líquido, mas a energia cinética das moléculas supera as forças atrativas das interações intermoleculares.
D16	Há o rompimento destas interações
D17	Diminuem, pois as moléculas vão se afastando.
D18	Não sei, para o nível que leciono, nunca precisei me aprofundar nessa questão mas, acho importante seu conhecimento principalmente para quem leciona em diferentes níveis do ensino
D19	No processo físico de vaporização, ocorre o aumento da agitação das moléculas e consequente afastamentodas mesmas, ocasionando no rompimento das interações intermoleculares.
D20	as interações intermoleculares (químicas - nem sempre são moléculas) têm sempre a agitação térmica como contraponto!!! devido a essa agitação, a energia das moléculas (com distribuição de Boltzmann) conseguem ser superiores à energias das interações químicas e assim, saírem da líquido, e com velocidade constante, se afastarem dele até que uma sucessão de impactos a redirecione ao líquido.

B3-Q5.

B3-Q5a. As ligações hidrogênio são um tipo de interação intermolecular?

B3-Q5b. As interações intermoleculares podem ser entendidas como forças?

B3-Q5c. Forças são entidades físicas observáveis?

B3-Q5d. As ligações hidrogênio são realmente observáveis (ainda que numa escala atômica)? Se você acha que não, responda: como a imagem obtida experimentalmente foi possível?

RESPOND.	RESP. B3-Q5a	RESP. B3-Q5b	RESP. B3-Q5c	RESP. 1 B3-Q5d	RESP. 2 B3-Q5d
D01	Sim	Sim	Não	Sim	
D02	Sim	Sim	Sim	Sim	
D03	Sim	Sim	Não	Não	Não sei.
D04	Sim	Sim	Não	Não	Acredito que o microscópio em questão atua de forma diferente do microscópio óptico. De forma simplificada, este último amplia a imagem observada, enquanto a MFA constrói imagens com suporte computacional. Assim, a MFA faz projeções de uma imagem baseada em um modelo sofisticado. Portanto, é uma representação.
D05	Sim	Sim	Sim	Sim	
D06	Sim	Sim	Sim	Sim	
D07	Sim	Sim	Sim	Sim	
D08	Sim	Sim	Não	Sim	
D09	Sim	Sim	Não	Não	
D10	Sim	Sim	Sim	Sim	
D11	Sim	Sim	Sim	Sim	

D12	Sim	Sim	Sim	Sim	
D13	Sim	Sim	Não	Não	A imagem é obtida de maneira indireta. A varredura encontra pontos onde a densidade eletrônica sofre variações. A interação intermolecular altera a densidade eletrônica entre pares de moléculas vizinhas e essa alteração pode ser medida pelo ponteiro. De maneira análoga, seria como montássemos um experimento para visualizar as linhas de um campo elétrico entre duas cargas opostas. As linhas, geralmente evidenciadas com o auxílio de areia, ou outro material, mostram apenas o caminho das linhas de campo, mas não são efetivamente as linhas de campo.
D14	Sim	Sim	Não	Não	Neste caso, há certa quantidade significativa de densidade eletrônica a qual o MFA é capaz de detectar. Ou seja, estamos, na verdade, "vendo" os elétrons e não a força.
D15	Sim	Sim	Não	Sim	A questão se as ligações hidrogênio são meramente interações ou algo mais ainda é uma questão em aberto, há muitos trabalhos sendo desenvolvidos no tema.
D16	Sim	Sim	Sim	Sim	
D17	Sim	Sim	Sim	Sim	
D18	Sim	Sim	Não	Sim	
D19	Sim	Sim	Não	Sim	Mesmo tendo respondido que “sim - são observáveis” gostaria de destacar que a representação molecular do MFA é feita a partir intensidade e da distorção das nuvem eletrônicas identificadas pelo aparelho no composto. Desta forma é possível perceber que as interações de hidrogênio possuem menor intensidade quando comparadas as distorções das nuvens eletrônicas geradas na interação interatômica. Logo, o que se vê na imagem de MFA são as distorções das nuvens eletrônicas e não a representação física das forças em si. As forças, de forma geral, são grandezas capazes de gerar um fenômeno, movimento ou movimentação de

					um corpo, o qual é visto por nós. Isso justifica porque enxergamos, mesmo que microscopicamente e com menos intensidade, as interações intermoleculares.
D20	Sim	Não	Não	Sim	