

O protagonismo subestimado dos íons nas transformações químicas em solução por livros didáticos e estudantes de química

Fernando Luiz Cássio, Denise de Sales Cordeiro, Paola Corio e Carmen Fernandez

Instituto de Química, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil. E-mails: fernando@cecm.usp.br; denise@iq.usp.br; paola@iq.usp.br; carmen@iq.usp.br

Resumo: O entendimento da presença de íons em soluções aquosas e o papel protagonista de tais espécies durante as transformações químicas estão no cerne das explicações microscópicas das reações químicas. Esse protagonismo, entretanto, tem sido subestimado por livros didáticos e estudantes. Neste trabalho apresentamos uma análise de livros didáticos de química voltados para o ensino médio e ensino superior focando no papel atribuído aos íons nas transformações químicas em solução aquosa nos capítulos pertinentes. Apresentamos também resultados obtidos com estudantes do primeiro ano de um curso de química ao realizarem uma atividade de sala de aula integrando conceitos e representações das reações de ácido-base e óxido-redução. A partir da análise dos livros e da análise das principais dificuldades apresentadas pelos alunos na resolução da atividade, observamos um ponto preocupante em comum: o papel dos íons nas transformações químicas em solução não é enfatizado de maneira adequada nos livros, e revelou não ser compreendido pelo grupo de estudantes investigados.

Palavras-chave: íons, transformações químicas, soluções, livros didáticos.

Title: The underestimated protagonist role of ions in chemical transformations in solution according to textbooks and chemistry students.

Abstract: The understanding of the presence of ions in aqueous solutions and the protagonist role of these species during chemical transformations are within the core of microscopic explanation of chemical reactions. However, such protagonist role is often underestimated by textbooks and students. This work reports an analysis of high school and university chemistry textbooks focusing on the role assigned to ions in aqueous solutions during chemical reactions in relevant chapters. Results obtained with freshmen undergraduate chemistry students undertaking an activity integrating concepts and representations of acid-base and oxidation-reduction reactions are also presented. Based upon the joint analysis of chemistry textbooks and student's difficulties, we emphasize what we consider to be a fundamental problem: the role of the ions in chemical transformations in solution is not appropriately emphasized in the textbooks, and has revealed not being properly understood by the investigated group of students.

Keywords: ions, chemical transformations, solutions, chemistry textbooks.

Introdução

O estudo das soluções aquosas, bem como o das transformações químicas em soluções aquosas, constitui parte fundamental do currículo de química para o ensino médio. Entretanto, se observa muitas dificuldades de aprendizagem em relação a esses assuntos, seja em termos da compreensão dos fenômenos, seja das representações utilizadas. O presente trabalho se baseia em dois momentos de pesquisa. No primeiro foram analisados diversos livros didáticos voltados ao ensino médio e superior, buscando compreender como o papel dos íons é reportado no tratamento das transformações químicas em solução aquosa. No segundo, analisamos uma atividade desenvolvida por alunos ingressantes num curso de química na qual o papel dos íons era problematizado. Por fim, traçamos paralelos entre os resultados encontrados na análise dos livros e nas respostas dos alunos à atividade. Em ambos os casos, o papel dos íons nas transformações químicas não é o de protagonista.

Análise de livros didáticos

O livro didático, instrumento didático mais importante de nossas escolas, influencia tanto a prática do professor como o currículo (Lopes, 1992; Megid Neto, Fracalanza, 2003; Mortimer, 1988). A seleção dos conteúdos, sua sequência, os exercícios e o modo de trabalhar determinados tópicos, atividades que cabem ao professor, são frequentemente reduzidas à reprodução dos livros, que funcionam como simplificadores do trabalho docente. Os "manuais do professor", que nos livros da década de 1990 restringiam-se a algumas poucas páginas ao final dos volumes com exercícios resolvidos e breves sugestões para a abordagem de temas, hoje ocupam no mínimo 50 páginas, chegando a compor livros independentes. Além disso, todas as grandes editoras de livros didáticos mantêm "portais do professor", nos quais podemos encontrar materiais de apoio, materiais digitalizados do próprio livro e todo tipo de orientação pedagógica.

Segundo Lopes (1992), o conteúdo dos livros didáticos é, em grande medida, representativo do que é ministrado pelos professores em sala de aula. Canzian e Maximiano (2010) consideram "que os livros didáticos são importantes instrumentos de homogeneização de conceitos, conteúdos e metodologias educacionais" e, portanto, fundamentais quando se pretende analisar como os conhecimentos formais (e quais conhecimentos formais) são veiculados para e apropriados pelos professores e, evidentemente, para e pelos estudantes. Seguindo essa linha de raciocínio, Martorano e Marcondes (2009) reforçam que "o livro didático ainda possui um papel importante na dinâmica do ensino", e que, embora haja diversos recursos disponíveis para se obter informações sobre a ciência, o livro didático continua a ter um papel importante na transmissão dos conhecimentos científicos. Drechsler e Schmidt (2005) e Drechsler (2007), no âmbito de uma pesquisa sobre modelos ácido-base, apontam que o professor considera o livro didático uma importante fonte de conhecimento do conteúdo, e que muitos seguem estritamente a sua estrutura na organização de suas aulas.

Níveis de representação do conhecimento químico

Um dos principais objetivos do ensino de química é o de desenvolver nos estudantes a capacidade de interpretar fenômenos químicos em termos do arranjo e do movimento de partículas, moléculas e átomos (Santos, Greca, 2005). A compreensão do conhecimento químico pressupõe o discernimento de três diferentes níveis de representação: macroscópico, microscópico e simbólico (Johnstone, 1982; 1993). No nível macroscópico são representados os fenômenos observáveis, como a mudança de cor ou a liberação de calor durante uma reação química. No nível microscópico, o processo químico é explicado por modelos, onde se estabelece o arranjo e movimento de partículas, moléculas, átomos ou partículas subatômicas. Já no nível simbólico, o processo é expresso por meio de símbolos, números, fórmulas, equações e estruturas (Wu et al., 2001). Compreender a química é, em última instância, transitar adequadamente por entre esses níveis de representação, entendendo seus significados e interpenetrações. Os níveis microscópico e simbólico são especialmente difíceis para os estudantes porque contemplam o invisível e o abstrato (Ben-Zvi et al., 1987). Diversos estudos têm revelado que os estudantes não estabelecem relações apropriadas entre os níveis macro e micro (Pozo, 2001; Kozma e Russell, 1997; Gillespie, 1997; Wu et al., 2001).

Não obstante essas dificuldades, durante o processo de ensino-aprendizagem da química os diferentes níveis de representação acabam sendo utilizados inadvertidamente pelos professores que, nem sempre em sala de aula, explicitam aos alunos os momentos de alternância entre os níveis. Pesquisas recentes revelam que, como consequência, os estudantes consideram, por exemplo, que uma substância ácida é "a partícula" ácida (Furió-Más et al., 2005). Nesse sentido, é proveitoso mostrar aos alunos os limites das representações – levando-os à consciência de que elas se tratam de usos particulares da linguagem, e não dos objetos em si.

Analogias no ensino de ciências

Uma analogia expressa uma relação de equivalência ou similaridade entre estruturas de dois domínios diferentes, sendo um importante instrumento para a compreensão de novos domínios (Duit, 1991; Harrison e Treagust, 2006). Analogias (e também metáforas) são características do pensamento e do discurso humano, e permeiam o ensino de ciências sendo recursos didáticos comumente empregados em salas de aulas e materiais curriculares para facilitar a compreensão de conceitos (Duit, 1991; Monteiro e Justi, 2000; Aubusson et al., 2006).

Existe muito interesse sobre o papel de analogias no ensino de ciências, sendo que o seu uso tem sido abordado na literatura já há algumas décadas (Duit, 1991). Metáforas e analogias são maneiras de produzir e comunicar o conhecimento, os quais são temas centrais da pesquisa em ensino (Aubusson et al., 2006). No ensino de ciências, são também considerados instrumentos efetivos para mudanças conceituais, uma vez que facilitam a visualização e manipulação de ideias e conceitos abstratos, possibilitando conexões entre conceitos científicos e as experiências prévias dos estudantes (Duit, 1991; Harrison, 2006).

Por outro lado, existe significativa evidencia na literatura sobre a dificuldade de estudantes no uso e na interpretação de analogias. Quando estudantes interpretam analogias, eles podem facilmente construir concepções alternativas do conceito desejado. O uso de analogias tem sido, portanto debatido, uma vez que o entendimento gerado por elas é frequentemente acompanhado por concepções alternativas (Harrison e Treagust, 2006). Assim, se por um lado analogias são poderosos instrumentos para a geração de conhecimentos e para a compreensão de conceitos abstratos, por outro lado, apresentam um significativo potencial para serem mal interpretadas, gerando em alguns casos, concepções alternativas e inibindo o aprendizado (Wilbers e Duit, 2006). Ressalta-se dessa maneira, a importância do professor para que os estudantes desenvolvam uma compreensão adequada do uso de analogias como modelos de ensino (Coll, 2005). O uso de analogias como modelos didáticos não se resume apenas ao processo de transferir algumas características entre o análogo ao seu alvo, mas envolve o processo de construção da relação analógica intencionada pelo professor (Wilbers e Duit, 2006).

Apesar do debate sobre seu uso devido ao seu potencial em gerar concepções alternativas, pesquisas têm demonstrado (trazido suficiente evidencia) que, quando usadas de maneira apropriada, analogias são instrumentos pedagógicos importantes no repertório de professores. Se adequadamente mediadas pelo professor, analogias são instrumentos importantes para pensar, construir novas ideias, e testar conhecimentos.

Justi e Gilbert (2006) sugerem que analogias não são apenas importantes, mas essenciais em química, desempenhando um papel fundamental não apenas na compreensão de conceitos, mas também na compreensão de aspectos relacionados à natureza da ciência, dos modelos científicos e do processo de modelagem. Analogias desempenham um papel importante no processo de desenvolvimento de um modelo (Justi e Gilbert, 2006). Segundo Duit (1991), é a relação de analogia que define um modelo. Interessante notar como diferentes modelos fazem uso de diferentes analogias: o átomo é como um pudim de passas (Modelo de Thomson); o átomo é como o sistema solar (Modelos de Rutherford e Bohr). De fato, em química, existem diversos casos nos quais a proposição de uma analogia desempenhou um papel central no processo de modelagem, resultando na produção de conhecimento (Justi e Gilbert, 2006). Nesse sentido, mencionamos também os modelos históricos no campo da cinética química, nos quais o uso de diferentes analogias para o conceito de reação química foi determinante na evolução da explicação do conceito de velocidade de reação (Justi e Gilbert, 1999).

Analogias podem, portanto ser consideradas como um subconjunto dos modelos científicos, uma vez que envolvem a comparação de duas entidades semelhantes em alguns atributos, sendo seu uso compartilhado por professores e pesquisadores para explicar conceitos abstratos, bem como no desenvolvimento de modelos (Coll, 2005). No ensino de química, a literatura é vasta em exemplos e descrições de analogias para uma variedade de propósitos e em diferentes níveis educacionais (Coll, 2006): para ilustrar conceitos básicos como solubilidade, para visualizar estruturas moleculares e estereoquímica, para abordar conceitos relacionados à

reatividade, cinética química e equilíbrio químico, para descrever ligações químicas, dentre outros propósitos.

Analogias são, portanto, instrumentos importantes no ensino de ciências, contribuindo, e em alguns casos inibindo o aprendizado. Dessa maneira, investigar o uso de tal recurso tem relevância significativa. Este trabalho propõe a discussão de uma analogia entre os processos redox (transferência de elétrons) e ácido-base (transferência de prótons), e analisa as dificuldades exibidas pelos estudantes na interpretação dessa analogia. Reações redox são comumente representadas em termos de semirreações; o mesmo não é comum para reações ácido base. Nesse caso específico, as semirreações redox caracterizam um domínio conhecido ao estudante. Características similares entre os dois processos incluem a troca de uma entidade química entre duas espécies (próton ou elétron) - os dois processos são reações de transferência de carga (seja positiva ou negativa); e a simultaneidade (dependência mútua entre oxidação e redução, as quais necessariamente ocorrem de maneira simultânea em uma transformação química em que há transferência de elétrons - assim existe dependência mútua nas reações ácido-base). Outra similaridade entre os dois processos a ser considerada seria o "caráter anfótero" de uma substância: uma mesma substância poder ser oxidante ou redutora, dependendo da reação química; da mesma maneira, uma mesma substância pode ser um ácido ou uma base, dependendo da reação química (o caráter relacional é característico em ambos os casos). Uma diferença importante a ser ressaltada relaciona-se ao fato de que enquanto nas reações ácido-base ocorre a formação de ligações químicas (doação de pares de elétrons - segundo Lewis), em processos redox não há a formação (ou quebra) de ligações químicas. Em termos de representações, é também relevante notar que enquanto o próton pode ser representado em uma reação química, o elétron não (embora nenhuma das duas entidades exista de forma livre em solução aquosa).

As dificuldades com o ensino-aprendizagem de reações químicas

Segundo Stains e Talanquer (2008), as reações químicas podem ser classificadas sob dois pontos de vista: i) classificação baseada no rearranjo das partículas: adição, decomposição, simples troca, dupla troca; e ii) classificação baseada no comportamento químico: ácido-base, precipitação, redox, combustão, complexação.

A primeira abordagem distingue os diferentes rearranjos de partículas que acompanham uma reação química, sendo as categorias tradicionalmente usadas para a classificação de reações químicas; ao passo que a segunda, baseada na reatividade das substâncias, é mais significativa do ponto de vista conceitual.

As discrepâncias entre os modos de classificar as reações químicas contribuem para dificultar o processo de compreensão do papel dos íons durante as transformações químicas. Partindo do nosso objeto de análise – os íons e o seu papel nas reações em fase aquosa – podemos pressupor que, para a compreensão dos diferentes tipos de transformações químicas em fase aquosa, questões relacionadas à estrutura e ao comportamento de

espécies iônicas em solução, bem como às suas representações, são de suma importância.

Na literatura encontramos trabalhos dedicados ao estudo das dificuldades associadas ao ensino e à aprendizagem de temas relacionados à representação de reações químicas e ao uso de equações iônicas (Laugier e Dumon, 2004; Chandrasegaran et al., 2007), ao conceito de íons e seu comportamento em solução (Caamaño e Maestre, 2004; França et al., 2009), a reações ácido-base (Furió-Más et al., 2005; 2007; Drechsler e Schmidt, 2005) e, ainda, a reações de óxido-redução (de Jong, Treagust, 2002; Österlund et al., 2009; Niaz, 2002).

Um estudo recente envolvendo estudantes de ensino médio sugere que muitas das dificuldades observadas na compreensão das propriedades de ácidos, bases e sais, e de seu comportamento em reações de neutralização, têm origem no entendimento da descrição dessas substâncias de acordo com o modelo atômico para a matéria, ou seja, na interpretação da representação simbólica que introduz átomos, íons, prótons (relacionados com reações ácido-base) e elétrons (relacionados com reações redox) (Furió-Más et al., 2007). As dificuldades conceituais relacionadas à compreensão de reações redox são em parte atribuídas a esses mesmos aspectos (de Jong, Treagust, 2002). Descreve-se, no caso do comportamento ácido-base, que sua interpretação deve ser abordada por meio da construção da relação entre os modelos macroscópicos – que descrevem as propriedades de substâncias ácidas e básicas – e os modelos microscópicos de Arrhenius ou Brønsted-Lowry. De fato, encontra-se bem estabelecido que a apropriada transição entre os níveis de representação da matéria (macro, micro e simbólico) é fator determinante na compreensão de conceitos em química (por exemplo, em Gabel et al., 1987; Johnstone, 1993; de Jong, van Driel, 2001; Chittleborough, Treagust, 2007; van Berkel et al., 2009). Ainda nesse contexto, merecem atenção as dificuldades associadas ao entendimento da representação de reações por meio de equações químicas. Representação simbólica, a equação química relaciona as observações macroscópicas que descrevem a transformação da matéria às mudanças que ocorrem em termos de átomos e moléculas; o entendimento de tal relação requer, por parte dos estudantes, um alto grau de abstração (Laugier, Dumon, 2004). Compreender o conceito de reação química requer, a um só tempo, a compreensão das representações dos fenômenos nos níveis macro e micro, bem como dos códigos simbólicos empregados – o que pode constituir dificuldades significativas para estudantes do ensino médio (Laugier, Dumon, 2004).

Metodologia

Nosso trabalho estruturou-se em duas frentes, a saber: a) um primeiro momento de análise de livros didáticos; e b) um segundo momento, no qual uma atividade problematizadora envolvendo os tópicos analisados nos livros foi desenvolvida com alunos do primeiro ano de um curso de química, seguida da análise das respostas dos estudantes. Por fim, esses dois passos da pesquisa foram confrontados, na busca de seus possíveis entrecruzamentos.

a) *Análise dos livros didáticos*

A análise dos livros didáticos de química teve por foco o papel dos íons nas transformações químicas, tratado de diversas formas e em diferentes partes dos livros. Após uma análise prévia dos livros, concentramo-nos nos capítulos sobre ácido-base, óxido redução, equilíbrios aquosos, reações inorgânicas e funções inorgânicas, nos quais o papel dos íons precisa necessariamente ser considerado. Tendo isso em mente, foram analisados: i) livros didáticos de química para o ensino médio “tradicionais” mais adotados (Tabela 1); ii) livros didáticos para ensino médio produzidos por grupos de pesquisa da área de ensino de química (Tabela 2); e iii) livros didáticos de química para o ensino superior (Tabela 3).

| Autor(es) | Título | Ano |
|--------------------|---|------------|
| Carvalho e Sousa | Química: de olho no mundo do trabalho, v. único | 2004 |
| Ciscato e Pereira | Planeta química, v. único | 2001 |
| Feltre | Química, v. 1 e 2 | 2008 |
| Hartwig et al. | Química geral e inorgânica | 1999 |
| Hartwig et al. | Físico-química | 1999 |
| Lembo | Química: realidade e contexto, v. 1 e 2 | 1999 |
| Lisboa | Ser protagonista – Química, v. 1 e 2 (versão PNLD 2012-2014) | 2010 |
| Nóbrega et al. | Química: conceitos básicos, v. 1 e 2 | 2001 |
| Nóbrega et al. | Química, v. único | 2007 |
| Novais | Química, v. 1 e 2 | 1999 |
| Peruzzo e Canto | Química na abordagem do cotidiano, v. 1 e 2 (versão mercado) | 2003a |
| Peruzzo e Canto | Química na abordagem do cotidiano, v. 1 e 2 (versão PNLD 2009-2011) | 2003b |
| Peruzzo e Canto | Química na abordagem do cotidiano, v. 1 e 2 (versão PNLD 2012-2014) | 2010 |
| Reis | Completamente química, v. 1 e 2 | 2001 |
| Reis | Química: meio ambiente, cidadania, tecnologia, v. 1 e 2 (versão PNLD 2012-2014) | 2010 |
| Sardella | Curso de química, v. 1 e 2 | 1999 |
| Usberco e Salvador | Química 1: química geral | 2009 |
| Usberco e Salvador | Química 2: físico-química | 2009 |

Tabela 1.- Relação dos livros didáticos mais utilizados no ensino médio que foram analisados.

Entendemos por livros tradicionais aqueles que apresentam a química através da seguinte sequência de conteúdos: (1) química geral e inorgânica, (2) físico-química e (3) química orgânica em cada um dos três anos do ensino médio, respectivamente. Tais livros também apresentam as relações com o contexto na forma de caixas separadas do texto principal, deixando clara a ênfase no conteúdo conceitual. Já os livros denominados “não convencionais” aqueles que, de alguma forma, rompem com essa sequência clássica e/ou incorporam o contexto de forma mais integral ao conteúdo. Ao buscarem contemplar conteúdos de natureza procedimental e atitudinal, a proposta desses materiais é promover um maior engajamento do aluno com o conhecimento químico e com as atividades, alterando

significativamente os papéis de professor e alunos. Assim, a diferença principal entre esses dois tipos de materiais didáticos é a postura centrada no professor (livros tradicionais, com foco no conteúdo conceitual) ou no aluno (livros não convencionais, com foco nos conteúdos conceitual, procedimental e atitudinal).

Foram incluídas na pesquisa as cinco coleções de livros recentemente aprovadas pelo Programa Nacional do Livro Didático (PNLD) para circulação nas escolas públicas de todo o Brasil nos próximos três anos.

| Autor(es) | Título | Ano |
|--------------------|---|------|
| GEPEQ | Interações e transformações I – Elaborando conceitos sobre transformações químicas | 2005 |
| GEPEQ | Interações e transformações III – A química e a sobrevivência – Atmosfera: fonte de materiais | 2000 |
| GEPEQ | Interações e transformações IV – Química e a sobrevivência – Hidrosfera: fonte de materiais | 2005 |
| Mortimer e Machado | Química para o ensino médio, v. único | 2003 |
| Mortimer e Machado | Química, v. 1 e 2 (versão PNLD 2012-2014) | 2010 |
| Santos e Mól | Química & sociedade – módulos 3 e 4 | 2004 |
| Santos e Mól | Química & sociedade, v. único (versão PNLD 2009-2011) | 2008 |
| Santos e Mól | Química cidadã, v. 1, 2 e 3 (versão PNLD 2012-2014) | 2010 |

Tabela 2.- Relação dos livros didáticos “não convencionais” para o ensino médio que foram analisados (livros produzidos por grupos de pesquisa na área de ensino de química).

A análise dos livros para o ensino médio (tabelas 1 e 2) baseou-se na organização dos conteúdos ácido-base e óxido-redução. Buscamos identificar em que parte (ou volume) dos livros tais conteúdos aparecem e se são tratados mais de uma vez, com diferentes graus de sofisticação, por exemplo. Nessa primeira análise (mostrada na tabela 4, para os livros da tabela 1), a ênfase recaiu sobre a classificação das reações químicas, buscando responder onde e como ela é trabalhada nos livros. Em seguida, procuramos estabelecer relações entre os modos de classificar as reações químicas apresentados nos livros e a sua consequente dificuldade em tratar dos íons em solução e do seu papel protagonista nas transformações químicas em fase aquosa, em especial através da representação das reações na forma de equações iônicas. Também comparamos os livros das tabelas 1 e 2, investigando se as suas diferenças na apresentação dos conteúdos se refletem em um tratamento diferenciado do papel dos íons nas transformações químicas.

Foram também analisados diversos livros de química utilizados no ensino superior (Tabela 3). Nesse caso, as categorias de análise foram diferentes, visto que tais materiais não propõem os mesmos esquemas de classificação das reações químicas encontrados nos livros para o ensino médio e, portanto, não separam as reações ácido-base e redox em capítulos específicos (os casos em que isso acontece serão devidamente apontados). Diante disso, esses livros foram analisados segundo a presença e tratamento dos temas classificação das reações e protagonismo dos íons, este último analisado sob a ótica da representação das reações em fase

aquosa – se na forma iônica ou com as espécies na forma neutra, incluindo os íons espectadores na forma não dissociada (Tabela 5).

b) Análise das dificuldades dos alunos

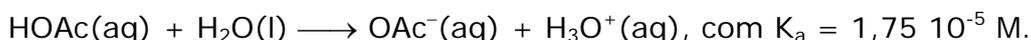
Nosso contexto de análise surgiu de um conjunto de atividades oferecidas aos alunos ingressantes nos cursos de Bacharelado, Licenciatura e Química Ambiental, diurno e noturno, do Instituto de Química da Universidade de São Paulo (IQ-USP), no primeiro semestre dos anos de 2008 e 2009. Os encontros pretendiam tratar dos conteúdos das disciplinas de química geral com um aspecto integrativo, concentrando esforços em problematizar os modelos utilizados na explicação dos fenômenos químicos – seus usos e limites, sua validade e a existência de exceções às regras.

| Autor(es) | Título | Ano |
|---------------------|---|------|
| Alexeyev | Qualitative analysis | 1967 |
| Atkins e Jones | Princípios de química – Questionando a vida moderna e o meio ambiente | 2006 |
| Brown et al. | Química – A ciência central | 2005 |
| Chang | Química geral: conceitos essenciais | 2006 |
| Joesten e Wood | World of chemistry | 1996 |
| Kotz e Treichel Jr. | Química geral e reações químicas, v. 1 | 2005 |
| Mahan e Myers | Química – Um curso universitário | 1995 |
| McMurry e Fay | Chemistry | 2001 |
| Russell | Química geral, v. 1 | 1994 |
| Snyder | The extraordinary chemistry of ordinary things | 2003 |
| Vogel | Química analítica qualitativa | 1981 |

Tabela 3.- Relação dos livros didáticos para o ensino superior que foram analisados.

A escolha dos conteúdos para as atividades baseou-se na análise da prova de Verificação de Conhecimentos, aplicada aos alunos ingressantes no IQ-USP desde 2003 como meio diagnóstico das principais dificuldades dos calouros (Fernandez et al., 2008). A partir da leitura das provas de 2007 e 2008, planejamos sete atividades contemplando: ligação química, reações químicas, equilíbrio químico, ácido-base, óxido-redução, termoquímica e cinética química; estas duas últimas foram acrescentadas no ano de 2009. Apesar dessa divisão aparentemente rígida, por tópicos de conteúdo, buscamos a proposição de situações que fomentassem a discussão coletiva de temas amplos. Nesse sentido, o formato de aulas expositivas, voltadas para revisões ou listas de exercícios, deu lugar à discussão de conceitos e modelos explicativos da química a partir de fichas de trabalho dirigido. As atividades foram oferecidas nos sábados pela manhã, com participação voluntária dos alunos interessados, variando entre 10 e 25 alunos por encontro. Delineado o contexto da pesquisa, foram analisadas as respostas (escritas) dadas por 20 alunos ao seguinte problema (Manahan, 2001, p. 106), contido em uma das atividades (óxido-redução):

A reação ácido-base para a dissociação do ácido acético é:



Decomponha essa reação em duas semirreações envolvendo o íon H^+ . Faça o mesmo com a reação redox $Fe^{2+}(aq) + H^+(aq) \longrightarrow Fe^{3+}(aq) + \frac{1}{2} H_2(g)$, decompondo-a em duas semirreações envolvendo os elétrons. Discuta as analogias entre os processos redox e ácido-base.

A analogia entre os processos redox e ácido-base é um dos fundamentos da teoria ácido-base de Usanovich, proposta em 1939 na tentativa de generalizar as já existentes teorias de Arrhenius (1884), Brønsted-Lowry (1923) e Lewis (1923). Ela encontrou forte resistência – seus detratores alegavam que nas reações de óxido-redução não há formação de ligação química (participação de par de elétrons) –, enquanto que nas reações ácido-base (segundo Lewis) há doação de pares de elétrons – formação de ligações, portanto. Ademais, os manuscritos originais de Usanovich foram publicados em russo e são considerados, de certo modo, confusos (Chagas, 2000): “um ácido é qualquer espécie química que reage com bases para formar sais, fornecendo cátions ou aceitando ânions ou elétrons e, em contrapartida, uma base é qualquer espécie que reage com ácidos, fornecendo ânions ou elétrons, ou combinando com cátions”. Ainda houve na literatura outras propostas de abordagens integradas dos conceitos de ácido-base e óxido-redução (Hazlehurst, 1940), baseadas na simultaneidade intrínseca a estes sistemas – uma oxidação, por exemplo, só ocorre à custa de uma redução, como um sistema de pares. Uma das abordagens mais radicais criou tabelas de oxidantes e redutores conjugados, à moda da conjugação de Brønsted-Lowry (Pacer, 1973).

As respostas elaboradas pelos estudantes foram objeto de análise qualitativa, na qual buscamos identificar as dificuldades dos estudantes a respeito dos íons e do seu protagonismo nas reações em fase aquosa.

Resultados e discussão

a) Análise dos livros didáticos

Começamos nos aproximando dos livros didáticos do ensino médio, buscando esclarecer em que momentos e de que forma os conteúdos de ácido-base e óxido-redução aparecem nos diferentes livros. Na tabela 4 apresentamos essa sistematização para livros considerados tradicionais. Nessa análise tentamos responder à questão: como os conteúdos ácido-base e óxido-redução se encontram organizados nos diferentes capítulos?

As teorias de Brønsted-Lowry e Lewis aparecem como textos complementares ao capítulo sobre equilíbrios iônicos (v. 2).

A teoria ácido-base de Brønsted-Lowry é apresentada como tópico avançado na forma de textos complementares ou sob o epíteto “para saber mais” somente na versão para o mercado (2003a, v. 2).

Chamamos esquema clássico, a classificação das reações químicas baseada no rearranjo das partículas (Stains, Talanquer, 2008): síntese, análise (decomposição), simples troca (deslocamento) e dupla troca.

Em todos os livros analisados, as reações de ácido-base e de óxido-redução são apresentadas separadamente. Em geral, as reações ácido-base aparecem junto da classificação das funções inorgânicas, nos livros destinados ao primeiro ano do ensino médio. Predominam as abordagens derivadas da teoria de Arrhenius – ácidos fornecedores de prótons como

única espécie catiônica. Ocasionalmente, outras teorias aparecem nos volumes dedicados ao segundo ano, junto aos equilíbrios em fase aquosa, que conduzem à teoria protônica de Brønsted-Lowry – frequentemente na forma de leituras complementares.

| Conteúdo | Organização | Livro didático |
|---------------|---|---|
| Ácido-base | Teoria de Arrhenius dentro de capítulo sobre funções inorgânicas (v. 1) e teoria de Brønsted-Lowry dentro de capítulo sobre equilíbrios aquosos (v. 2, em geral). | Ciscato e Pereira, 2001 Hartwig et al., 1999 Lembo, 1999 Lisboa, 2010 Nóbrega et al., 2001 Reis, 2001; 2010 Usberco e Salvador, 2009 |
| | Teorias de Arrhenius, Brønsted-Lowry e Lewis dentro de capítulo sobre funções inorgânicas (v. 1). | Feltre, 2008 Sardella, 1999 |
| | Teoria de Arrhenius dentro de capítulo sobre funções inorgânicas (v. 1). | Carvalho e Sousa, 2004 Nóbrega et al., 2007 Novais, 1999 Peruzzo e Canto, 2003a(b); 2010 Sardella, 1999 |
| Óxido-redução | Reações redox tratadas em capítulos específicos (v. 2, em geral). | Ciscato e Pereira, 2001 Feltre, 2008 Hartwig et al., 1999 Lembo, 1999 Nóbrega et al., 2001; 2007 Novais, 1999 Peruzzo e Canto, 2003a(b); 2010 Reis, 2010 Sardella, 1999 Usberco e Salvador, 2009 |
| | Reações redox apresentadas como categoria no esquema clássico de classificação das reações (v. 1) e tratadas posteriormente, em capítulos específicos (v. 2). | Carvalho e Sousa, 2004 Hartwig et al., 1999 Lembo, 1999 Lisboa, 2010 Reis, 2001 |

Tabela 4.- Análise dos livros didáticos ditos “tradicionais” para o ensino médio.

As reações de óxido-redução, por outro lado, sempre são associadas ao esquema de classificação de reações mais comum – síntese, análise, simples troca e dupla troca (por exemplo, em Carvalho, Sousa, 2004; Hartwig et al., 1999; Lisboa, 2010). Convém salientar que as reações de simples troca incluem frequentemente as reações de óxido-redução (deslocamentos por metais).

Os livros de Peruzzo e Canto (2003a; 2003b; 2010) apresentam algumas reações de óxido-redução, sem nomeá-las, em seção denominada outras reações de importância – que inclui, por exemplo, a oxidação de metais alcalinos com água e bases. Lembremos que as reações denominadas síntese e análise, por sua vez, também são quase sempre reações de óxido-redução que resultam na ou decompõem uma mesma espécie química –

processos de desproporcionamento. Face a isto, qualquer esforço classificatório coerente se dissolve. Saliente-se que os autores mencionam as equações na forma iônica em uma única página no final do capítulo, acompanhada por seis exercícios de fixação. Nesta nova edição, aprovada pelo PNLD, enfatiza-se que para “reações químicas que envolvam íons em solução aquosa, a equação iônica é a melhor maneira de representar o processo” (2010, p. 273). Todavia, a taxonomia das reações químicas ocupa as 20 páginas restantes do capítulo, diminuindo a importância daquela que seria a “melhor maneira” de representar as reações. Além disso, as equações iônicas não aparecem em nenhum dos 40 exercícios do final do capítulo, que deveriam contemplar todo o conteúdo do mesmo.

O livro de Usberco e Salvador (2009, v. 1, p. 406) apresenta “uma visão diferente na formação de um produto menos solúvel ou insolúvel”, afirmando que a reação de dupla troca $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2(\text{aq}) + 2 \text{NaI}(\text{aq}) \longrightarrow \text{PbI}_2(\text{s}) + 2 \text{NaNO}_3(\text{aq})$, se escrita na forma iônica $\text{Pb}^{2+}(\text{aq}) + 2 \text{I}^-(\text{aq}) \longrightarrow \text{PbI}_2(\text{s})$, “poderia ser classificada como uma reação de síntese”. Longe de relativizar o esquema de classificação, já que isso não é reforçado no texto, a abordagem dos autores enrijece ainda mais os aspectos classificatórios das reações – qualquer reação merece uma classificação. Tal qual os livros de Peruzzo e Canto, esta obra também não utiliza sua “visão diferente” das reações nos capítulos subsequentes. Ela só reaparecerá no volume 2, no qual, em vista dos conteúdos trabalhados (equilíbrios aquosos, eletroquímica), representar os íons em solução é inevitável.

O novo livro de Lisboa (2010, v. 1), recentemente aprovado pelo PNLD 2012-2014, apresenta as equações iônicas no início do capítulo sobre reações químicas para, logo em seguida, introduzir o esquema de classificação de reações, começando pelas reações de dupla troca, que denomina “metátese”. As equações iônicas, contudo, não desaparecem por completo dos capítulos subsequentes, sendo utilizadas esporadicamente como “representações alternativas” das equações químicas na forma neutra.

A nova edição do livro de Reis, aprovada pelo PNLD 2012-2014, (Reis, 2010), não faz menção aos nomes “Arrhenius” ou “Brønsted-Lowry”, mas faz uso de vários de seus elementos. Além disso, o capítulo sobre reações de óxido-redução, diferentemente dos demais livros desta categoria, aparece no volume 1. Além disso, a classificação das reações de acordo com o “esquema clássico” também não aparece nesta nova edição (comparar com Reis, 2001, v. 1).

Lopes (1995) colocou a questão da classificação das reações químicas inorgânicas dos livros didáticos como secundária frente aos conceitos associados à reatividade das espécies. Nery et al. (2006) também trata deste assunto com extensão, apresentando abordagem problematizadora para previsão e equacionamento de reações químicas assistida por tabelas de solubilidade. Cabe lembrar ainda que a impropriedade do tópico funções inorgânicas já foi levantada e debatida por Campos e Silva (1999).

Apesar de entendermos que a classificação das reações químicas traz no seu bojo uma tentativa de facilitar a apropriação dos conceitos por parte dos estudantes, não podemos deixar de apontar os problemas decorrentes dessa conduta. É contraditório conceituar íon espectador quando se trabalha

com uma classificação de reações baseada em eletroneutralidade. Para complicar o problema, os alunos costumam ter em mente uma eletroneutralidade localizada – duas esferas de cargas opostas que se neutralizam mutuamente – situação muito diferente da eletroneutralidade média de um sistema químico, sempre composto por soluto e solvente. A falta da noção de sistema químico também cria a ilusão de que é factualmente possível misturar nitrato de potássio e cloreto de sódio para obter nitrato de sódio e cloreto de potássio. A notação (aq), que representa o estado de agregação das espécies numa equação química, só cumpre a sua função quando o estudante já sabe que ela designa que as mesmas se encontram na forma de íons. Esta percepção, contudo, pressupõe noções sobre o papel do solvente na dissolução, e aqui chegamos aqui ao ponto fulcral da discussão – o protagonismo dos íons nas transformações químicas.

Em geral, os íons são introduzidos aos estudantes após a discussão sobre distribuição eletrônica, onde lhes são atribuídas suas características definidoras: possuir elétrons a mais ou a menos que os átomos (neutros) que os originam. Retoma-se a sua importância na apresentação das ligações químicas – onde a presença de íons é colocada como condição necessária para a formação de ligações ditas iônicas.

A partir de então, no primeiro ano, os íons só são vistos como produtos da ionização de ácidos fortes e da dissociação de bases fortes e sais, sempre acessórios às transformações químicas. No mais, é frequente o reforço da ideia de eletroneutralidade das espécies químicas úteis nas reações, espécies neutras transformando-se em espécies neutras. No contexto das reações de dupla troca, boa parte dos livros analisados faz menção às equações iônicas, que representam as reações iônicas e devem ser balanceadas de modo que haja o mesmo número de cargas dos dois lados da equação. E só nesse momento, já sido convencionadas a classificação e a representação das reações químicas com as espécies na forma neutra, o íon toma lugar – “afinal quem reage são os íons, e não as espécies neutras” (Peruzzo, Canto, 2003a, v. 1).

Na sequência, os íons só vêm tomar o protagonismo das discussões nos conteúdos de equilíbrios iônicos, óxido-redução e eletroquímica, em geral apresentados aos alunos do segundo ano do ensino médio (ver tabela 4). O papel do íon como agente efetivo das transformações químicas fica, então, soterrado por tópicos como funções inorgânicas, classificação de reações químicas e diversos outros tipos de informações tabeladas. Há assim um predomínio da “classificação pela classificação” na abordagem das reações químicas versus uma ênfase em conceitos. Outrossim, não causa surpresa que a teoria ácido-base de Brønsted-Lowry seja apresentada como leitura de apoio nos livros para a segunda série. O papel dos íons e do solvente nas transformações químicas, mesmo nos capítulos sobre equilíbrios em fase aquosa, encontra-se subvalorizado.

Não pretendemos aqui recuperar a discussão sobre a inadequação e extemporaneidade da classificação das reações químicas, comuns à maioria dos livros didáticos. Basta aqui lembrar, ecoando Lopes (1995) e Nery et al. (2006), que tais conceitos provêm de um tempo no qual o solvente não existia nos sistemas químicos – Berzelius desenvolveu suas teorias cerca de

70 anos antes de Arrhenius dar os primeiros passos da teoria da dissolução eletrolítica que influenciou boa parte das teorias sobre interações soluto-solvente hoje aceitas. Isso já nos dá matéria suficiente para refletir.

Também analisamos livros produzidos por autores ligados a grupos de pesquisa da área de ensino de Ciências, considerados “alternativos”. Estas obras, ao contrário daquelas mais utilizadas nas escolas brasileiras (Tabela 4), não apresentam esquemas classificatórios para as reações químicas, trazendo tais conteúdos de forma pulverizada, acompanhados por textos contextualizantes.

A primeira edição da coleção PEQUIS, de Santos e Mól (2004), ricamente ilustrada e com vasto conteúdo de textos, trata dos íons em apenas dois momentos: na definição, partindo da regra do octeto, e a pretexto da condutividade de sais dissolvidos em água. Não obstante a condutividade ser efeito da presença de íons dissolvidos, compreender o processo de dissolução é só meio caminho para o entendimento do papel dos íons na reatividade em solução. A edição de 2008 (v. único) traz os conteúdos de ácido-base e óxido-redução em capítulos separados, mas apresenta um panorama das principais teorias ácido-base no capítulo sobre equilíbrios aquosos. Novamente, as equações na forma iônica não são trabalhadas, e aparecem raramente ao longo do livro. A edição mais recente, aprovada pelo PNLD 2012-2014 (Santos e Mól, 2010), que foi dividida em três volumes, antecipa a teoria de Arrhenius no volume 1, trabalhada no capítulo sobre interações por meio de equações químicas na forma iônica, ainda que timidamente. Isso é retomado no volume 2 que, a exemplo da edição de 2008, trata das teorias ácido-base no capítulo sobre equilíbrios iônicos. Este capítulo faz um uso adequado das equações químicas na forma iônica, que, a partir de então, tornam-se recorrentes no texto e nos exercícios. Diferentemente dos outros livros analisados, o capítulo sobre reações de óxido-redução só aparece no volume 3.

Mortimer e Machado (2003, v. único; 2010, v. 1) definem as equações químicas sem utilizar espécies na forma iônica – essas, a exemplo de alguns dos livros da Tabela 4, aparecem pela primeira vez no capítulo dedicado aos equilíbrios aquosos. É importante ressaltar a preocupação desta coleção com a representação das reações químicas e com o modo como o aluno entende símbolos como “→” e “+”, que são claramente definidos pelos autores (2010, v. 1, p. 221).

Na coleção Interações e transformações, do Grupo de Pesquisa em Educação Química (GEPEQ), as equações iônicas são apresentadas pontualmente em capítulos sobre condutividade de soluções (GEPEQ, 2005a) o sobre reações de óxido-redução (GEPEQ, 2000). Além disso, as reações químicas também são representadas na forma iônica no volume IV (GEPEQ, 2005b), que trata majoritariamente de equilíbrios em fase aquosa. Sobre esta última coleção, com abordagem claramente diferente das demais, notamos uma tendência inversa à da classificação excessiva: utiliza-se minimamente a representação das transformações químicas na forma de equações. Os outros tipos de representações – pictóricas, por exemplo – não dão conta de enfatizar a efetividade dos íons na química das reações. A despeito da sua originalidade na abordagem, o papel dos íons também parece subestimado nestes materiais curriculares.

Na tabela 5 apresentamos as abordagens de alguns livros didáticos utilizados no ensino superior – livros de química geral, de química analítica qualitativa e livros de química geral que abordam problemas do cotidiano (Joesten, Wood, 1996; Snyder, 2003).

| Tema | Abordagem | Livro didático |
|---------------------------|--|--|
| Classificação das reações | Reações ácido-base e redox distribuídas em capítulos específicos, sem classificação. | Joesten e Wood, 1996 Snyder, 2003 |
| | Reações ácido-base, redox, precipitação e complexação, dispersas em vários capítulos. | Alexeyev, 1967 Mahan e Myers, 1995 Vogel, 1981 |
| | Reações de ácido-base, redox, precipitação e complexação, num mesmo capítulo sobre "reações em solução aquosa", iniciado por discussão sobre dissociação iônica. | Russell, 1994 |
| | Reações de ácido-base, redox e precipitação, num mesmo capítulo sobre "reações em solução aquosa", iniciado por discussão sobre dissociação iônica. | Atkins e Jones, 2006 Brown et al., 2005 Chang, 2006 Kotz e Treichel Jr., 2005 McMurry e Fay, 2001 |
| Protagonismo dos íons | Reações químicas representadas com as espécies na forma neutra seguida pela notação "(aq)". | Brown et al., 2005 Chang, 2006 Kotz e Treichel Jr., 2005 Snyder, 2003 |
| | Reações químicas sempre (ou na maioria das vezes) representadas na forma iônica simplificada (sem íons espectadores), mostrando as espécies que reagem de fato. | Alexeyev, 1967 Atkins e Jones, 2006 Joesten e Wood, 1996 Mahan e Myers, 1995 McMurry e Fay, 2001 Russell, 1994 Vogel, 1981 |

Tabela 5.- Análise dos livros didáticos para o ensino superior com relação à presença dos temas classificação das reações químicas em solução e protagonismo dos íons nas mesmas (na realidade, a explicitação desse protagonismo por meio das representações).

Na análise dos livros utilizados no ensino superior observamos que os mesmos enfatizam o papel preponderante dos íons no estudo das reações químicas.

Note-se que um desses livros, Química Analítica Qualitativa (Vogel, 1981), é uma obra com mais de 30 anos, adotada em praticamente todos

os cursos de química analítica como livro-texto, e também como manual de laboratório em cursos iniciais de química geral e no ensino técnico. Já em suas primeiras páginas, Vogel sistematiza as reações químicas em quatro grupos: ácido-base, óxido-redução, precipitação e complexação. A partir de então, ao longo de todo o livro, as equações químicas sempre representam as espécies na forma iônica.

Tal tendência é seguida em diversos livros de química geral que, mesmo sem apresentar uma classificação formal das reações, contêm capítulos específicos intitulados “reações em fase aquosa”, sempre introduzidos por discussões sobre soluções, eletrólitos e o papel do solvente. Da mesma forma, a grande maioria representa as reações químicas na forma de equações iônicas simplificadas – os íons que atuam nas reações estão sempre à vista do leitor. Cabe notar que diversos autores não mencionam as reações de complexação – o que é justificável, em vista de outros conceitos envolvidos em sua compreensão (teoria do campo ligante, equilíbrios de complexação, etc.), tratados mais adiante nos cursos específicos de química inorgânica ou de química de coordenação. Ressalvamos que somente uma das obras consultadas (Chang, 2006), apesar de seguir caminho similar, enuncia que a reação de precipitação de iodeto de chumbo é também chamada de reação de dupla troca.

Ressaltemos que, a exemplo dos livros com abordagens alternativas já citados, a obra de Nóbrega et al. (2001; 2007) também não se ocupa de esquemas classificatórios para as reações químicas, e apresenta as reações de ácido-base e óxido-redução ao longo de diversos capítulos, além de um capítulo introdutório sobre “reações em fase aquosa” – precedido por um capítulo sobre propriedades da água, dissociação iônica e condutividade de soluções – em franco diálogo com as tendências observadas nos livros para o ensino superior.

Das cinco coleções de livros aprovadas pelo novo PNLD (2012-2014), três delas – Mortimer e Machado (2010), Santos e Mól (2010) e Reis (2010) – não apresentam nenhum esquema classificatório para as reações químicas, o que sugere um avanço em relação às demais coleções disponíveis no mercado para a química do ensino médio, que ainda possuem extensos capítulos sobre a classificação dos compostos e reações inorgânicas; alheias à importância dos íons em solução para uma compreensão mais adequada das transformações químicas.

b) Análise das dificuldades dos alunos

Na atividade proposta aos estudantes, esperávamos uma analogia entre os processos de transferência de elétrons (redox) e de prótons (ácido-base), aparentemente distintos do ponto de vista conceitual e, por essa razão, tão afastados do ponto de vista curricular (ou seria o contrário?).

A atividade apresentou-se difícil para os alunos, que então cursavam o primeiro semestre do curso de graduação em química – um quarto deles deixou a folha em branco. Os problemas que encontramos foram principalmente de dois tipos:

Perceber que próton e elétron se equiparam como “moeda de troca” nos dois processos:

Aluno 1: "O ácido é o agente redutor nesse processo".

Aluno 2: "HOAc \longrightarrow OAc⁻ + e⁻".

A resposta do aluno 1 (semelhante às de outros) denota que ele não percebeu a analogia entre próton e elétron como unidades de transferência nos processos ácido-base e redox, respectivamente. Assim, fazer uma analogia, que deveria passar por uma atribuição de similaridade funcional entre o papel do ácido (doador de prótons) e do agente redutor (doador de elétrons), se transforma em identidade funcional, o que implica em novas equivalências, de ordem conceitual e até semântica, já que "ácido é agente redutor", ou ainda, "próton e elétron são a mesma coisa", consequência lógica da equação química escrita pelo aluno 2, que evidentemente conhecia a equação que representa corretamente a desprotonação do ácido acético: HOAc \longrightarrow OAc⁻ + H⁺.

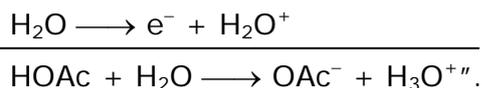
Inicialmente, na atividade proposta, o uso da analogia entre as representações das equações químicas foi pensado como estímulo à reflexão sobre as transformações químicas em fase aquosa como processos protagonizados por íons e que, afinal, podem ser todos representados na forma de equações iônicas. Segundo Gentner e Holyoak (1997), as analogias são ferramentas poderosas para uma grande variedade de propósitos, incluindo resolução de problemas, construção de explicações e de argumentos – mecanismos para organizar objetos e eventos em categorias familiares. Eles definem o mecanismo da analogia como o processo de entender uma situação nova em termos de uma que já é familiar. Assim, a situação familiar (denominada fonte análoga) fornece um tipo de modelo para fazer inferências sobre a situação não familiar (denominada alvo análogo). Durante o processo de raciocínio por analogias, o alvo passa a ser visto como um outro exemplo "do mesmo tipo de coisa" que o análogo familiar. A analogia entre as duas situações específicas pode funcionar como "semente" para a aprendizagem de uma categoria mais geral ou um esquema que engloba ambas as situações.

Contudo, observa-se nos trechos citados que os alunos entendem analogia como sendo identidade, ainda que, sejam capazes de definir cada uma dessas operações cognitivas com alguma precisão – eis a força da compartimentalização do conhecimento químico, celebrada na maioria dos livros didáticos analisados. Mesmo sabendo o que significa "fazer uma analogia", os estudantes não a estabelecem, já que não concebem uma ideia geral de "reações em fase aquosa", para além dos temas "reação ácido-base" e "reação redox", sistematizados separadamente na maioria dos materiais instrucionais disponíveis para o ensino médio.

Além dos problemas de natureza conceitual, ligados aos modelos de reações em fase aquosa, a compartimentalização de temas também causa problemas de natureza procedimental, relacionados ao uso das representações das reações químicas na forma de equações e à sua manipulação algébrica, como veremos a seguir.

Contiguidade do termo semirreação com o tópico curricular reações redox:

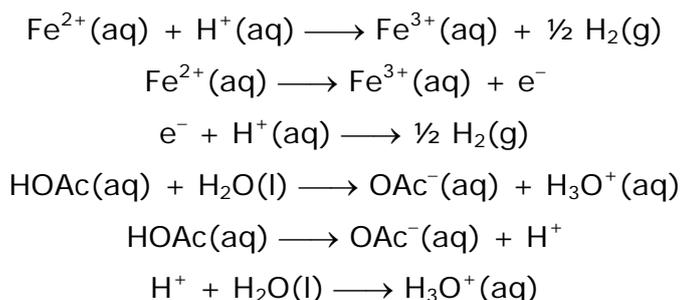
Aluno 3: "HOAc + e⁻ \longrightarrow OAc⁻ + H⁺"



O aluno 3 faz uma associação automática do termo “semirreação” com o assunto “reações de transferência de elétrons” e, ignorando o fato de que qualquer reação que componha algum mecanismo (redox ou não) é uma semirreação, representa uma semirreação “ácido-base” por uma equação que envolve o elétron – ainda que isso não lhe faça muito sentido. A equação escrita pelo aluno 2 é mais um exemplo dessa prática, que ilustra que, para os estudantes, as reações de óxido-redução são sistematicamente diferentes das reações de ácido-base.

Além disso, em se tratando da álgebra das reações químicas, quase nenhum aluno conseguiu equacionar corretamente os sistemas (a exemplo do sistema equacionado pelo aluno 3) e outros nem mesmo tentaram esboçar uma resolução – alguns o fizeram com as semirreações redox, e somente um equacionou corretamente a ionização do ácido acético a partir das duas semirreações.

O desmembramento de equações químicas em duas ou mais equações só é apresentado aos alunos durante os tópicos de eletroquímica (onde surge o conceito de semirreação) e termoquímica (lei de Hess) na segunda série do ensino médio; e é visto com desconfiança por alguns alunos – por que é possível calcular entalpia de uma reação X a partir das entalpias das reações Y, Z e W, que nada têm a ver com a reação em estudo? Isso decorre do conceito de função de estado, que pode ser aplicado a qualquer sistema químico, que possui potenciais termodinâmicos. Malgrados estes argumentos, pode-se fazer esse desmembramento porque as equações químicas possuem álgebra análoga àquela das equações lineares – o que ressalta o seu papel representacional, ou seja, mera soma de equações. Podemos assim representar um elétron como se existisse em solução, tal qual qualquer reagente. E também um próton:



A contiguidade do termo semirreação com o conteúdo reações redox nos mostra que a dificuldade dos estudantes em desmembrar equações químicas em semirreações vai além do problema da álgebra. Considerando-se a análise dos livros didáticos apresentada anteriormente e as dificuldades apresentadas pelos estudantes em operar com a analogia proposta no exercício, nos parece oportuno salientar que a dificuldade dos estudantes está em livrar-se da classificação das reações, que separa curricularmente – em capítulos, ou até volumes (anos letivos) diferentes – as reações de óxido-redução e ácido-base. O estudante enxerga essa separação sob o prisma dos conceitos/modelos e, portanto, dos procedimentos/representações – “reações ácido-base não têm nada a ver

com transformações redox” e “semirreação tem a ver com reação redox” são algumas das frases que ouvimos dos alunos durante esta atividade.

Um problema como este aponta para a necessidade de outro tipo de classificação para as reações químicas, diverso daquele que predomina nos livros didáticos para o ensino médio. A abordagem dos livros didáticos mais tradicionais do ensino médio, em geral classificatória e contraditória, só apresenta os íons em seu papel protagonista quando conveniente, relegando-lhes um papel secundário ou inexistente quando as classificações e memorizações assumem a dianteira, ao facilitarem a composição de exercícios e avaliações. Não fossem os íons tão importantes no entendimento das transformações químicas, poderíamos ignorar os problemas acarretados neste processo de transposição didática. Entretanto, a considerar a importância do protagonismo dos íons nas transformações químicas, tais mecanismos passam a ser, no mínimo, problemáticos em um programa de ensino que se proponha a desenvolver a química no ensino médio.

Considerações finais

Entre as competências e habilidades a serem desenvolvidas em química, de acordo com os Parâmetros Curriculares Nacionais para o ensino médio (Ministério da Educação de Brasil, 2000), destacam-se “traduzir a linguagem discursiva em linguagem simbólica da química (...) e reconhecer suas modificações ao longo do tempo” e “compreender os códigos e símbolos próprios da química atual”. Apesar de vago, isso nos convida a sempre recolocar a linguagem simbólica da química no tempo presente.

Observa-se que, no ensino médio, existe um predomínio do estudo de transformações químicas em fase aquosa – nas quais os íons são as espécies que efetivamente participam dos processos, sejam eles reações ácido-base, redox, de precipitação ou complexação. Paradoxalmente, porém, os livros didáticos para o ensino médio não destacam esse aspecto. Aparentemente, há uma tentativa, por parte dos autores de livros didáticos, de realizar uma transposição didática cuja finalidade seria tornar mais simples o aprendizado tanto das reações quanto das equações que as representam. De fato, porém, sua abordagem tem resultado em uma supersimplificação desses conceitos, ou na simples memorização de algoritmos para a escrita de equações químicas (“simples troca”, “dupla troca”, “metátese”). Observa-se assim, na abordagem do tema “reações químicas”, uma preocupação de grande parte dos autores com o aspecto classificatório (“classificação pela classificação”), em oposição a uma ênfase em conceitos, que reforçaria aquilo que é mais caro à química: as ideias de processo e transformação.

Devemos dizer, primeiramente, que as dificuldades exibidas pelos estudantes podem, de fato, ser relacionadas com os conteúdos de livros didáticos. Uma análise dos livros didáticos mais adotados, em relação ao desenvolvimento dos conceitos de ácido-base e óxido-redução (Tabela 4), revela nas edições mais recentes a mesma estrutura de 30 anos atrás. Salvo as adições relacionadas com as chaves química/cotidiano ou química/atualidades científicas, ainda é possível encontrar longos capítulos sobre funções inorgânicas e classificações de reações químicas.

Não surpreende que isso contribua para uma construção debilitada e incoerente dos significados pelos alunos, como ocorre frequentemente com os conceitos envolvendo transformações químicas. Nesse sentido, os livros empregados nos primeiros anos do ensino superior mostram maior coerência, e conferem aos íons em solução o protagonismo devido durante as transformações químicas em solução. Apesar de reconhecermos que, no ensino médio, é necessária certa simplificação, não acreditamos que isso deva ocorrer ocultando-se o papel protagonista dos íons nos processos químicos em fase aquosa. A ideia de transformação é o cerne do aprendizado da química, base para muitos outros tópicos dessa disciplina. Retirar do ensino médio o protagonismo dos íons é construir uma casa em terreno arenoso. O professor de química do ensino médio tem diante de si uma opção clara: buscar que seus alunos entendam os fenômenos por meio da aprendizagem significativa dos conceitos e representações da química atual, ou buscar que seus alunos memorizem algoritmos que serão reproduzidos nas provas.

Agradecimentos

Os autores agradecem aos estudantes que participaram da presente investigação, bem como ao apoio financeiro da Fapesp, CNPq, Capes, Dow Química e Pró-Reitorias de Pesquisa e Pós-Graduação da Universidade de São Paulo.

Referências bibliográficas

- Alexeyev, V.N. (1967). *Qualitative Analysis*. Moscow: Mir Publishers.
- Atkins, P.W. e L. Jones (2006). *Princípios de Química – Questionando a vida moderna e o meio ambiente*. Porto Alegre: Bookman.
- Aubusson, P.J.; Harrison, A.G. e S.M. Ritchie (2006). Metaphor and Analogy: Serious thought in science Education. Em: P.J. Aubusson, A.G. Harrison e S.M. Ritchie (Eds.) *Metaphor and Analogy in Science Education*. (pp. 1-9). Netherlands: Springer.
- Ben-Zvi, R.; Eylon, B.-S. e J. Silberstein (1987). Students' visualisation of a chemical reaction. *Education in Chemistry*, 20, 305-316.
- Brown, T.L.; LeMay Jr., H.E.; Bursten, B.E. e J.R. Burdge (2005). *Química – A Ciência Central*. São Paulo: Pearson/Prentice Hall.
- Caamaño, A. e G. Maestre (2004). La construcción del concepto de ión: en la intersección entre el modelo atómico-molecular y el modelo de carga eléctrica. *Alambique: Didáctica de las Ciencias Experimentales*, 42, 10, 29-40.
- Campos, R.C. e R.C. Silva (1999). Funções da química inorgânica... funcionam? *Química Nova na Escola*, 9, 18-22.
- Canzian, R. e F.A. Maximiano (2010). Princípio de Le Chatelier: o que tem sido apresentado nos livros didáticos? *Química Nova na Escola*, 32, 2, 107-119.
- Carvalho, G.C. e C.L. Sousa (2004). *Química: de olho no mundo do trabalho*. São Paulo: Scipione.

Chagas, A.P. (2000). O ensino de aspectos históricos e filosóficos da química e as teorias ácido-base do século XX. *Química Nova*, 23, 126-133.

Chandrasegaran, A.L.; Treagust, D.F. e M. Mocerino (2007). The development of a two-tier multiple-choice diagnostic instrument for evaluating secondary school students' ability to describe and explain chemical reactions using multiple levels of representation. *Chemistry Education: Research and Practice*, 8, 3, 293-307.

Chang, R. (2006). *Química Geral: conceitos essenciais*. São Paulo: McGraw-Hill.

Chittleborough, G. e D.F. Treagust (2007). The modelling ability of non-major chemistry students and their understanding of the sub-microscopic level. *Chemistry Education: Research and Practice*, 8, 3, 274-292.

Ciscato, C.A. e L.F. Pereira (2001). *Planeta química*. São Paulo: Ática.

Coll, R.K. (2005). The role of models/and analogies in science education: implications from research. *International Journal of Science Education*, 27, 2, 183-198.

Coll, R.K. (2006). The Role of Models, Mental Models and Analogies in Chemistry Teaching. Em: P.J. Aubusson, A.G. Harrison e S.M. Ritchie (Eds.), *Metaphor and Analogy in Science Education* (pp. 67-77). Netherlands: Springer.

de Jong, O. e J. van Driel (2001). The development of prospective teachers' concerns about teaching chemistry topics at a macro-micro-symbolic interface. Em: H. Behrendt, H. Dahncke, R. Duit, W. Gräber, M. Komorek, A. Kross e P. Reiska (Eds.), *Research in science education – Past, present, and future*. (pp. 271-276). Netherlands: Springer.

de Jong, O. e D.F. Treagust (2002). The teaching and learning of electrochemistry. Em: J.K. Gilbert, O. de Jong, R. Justi, D.F. Treagust e J.H van Driel (Eds.), *Chemical education: Towards research-based practice*. (pp. 317-338). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.

Drechsler, M. e H.-J. Schmidt (2005). Textbooks' and teachers' understanding of acid-base models used in chemistry teaching. *Chemistry Education: Research and Practice*, 6, 1, 19-35.

Drechsler, M. (2007). Models in chemistry education: a study of teaching and learning acids and bases in Swedish upper secondary schools. Dissertação de mestrado. Faculty of Technology and Science, Karlstads Universitet.

Duit, R. (1991). On the role of analogies and metaphors in learning science. *Science Education*, 75, 649-672.

Feltre, R. (2008). *Química*. São Paulo: Moderna.

Fernandez, C.; Baldinato, J.O.; Tiedemann, P.W. e M. Bertotti (2008). Conceitos de química dos ingressantes nos cursos de graduação do Instituto de Química da Universidade de São Paulo. *Química Nova*, 31, 1582-1590.

França, A.C.G.; Marcondes, M.E.R. e M.P. do Carmo (2009). Estrutura atômica e formação dos íons: uma análise das ideias dos alunos do 3º ano do ensino médio. *Química Nova na Escola*, 31, 4, 275-282.

Furió-Más, C.; Calatayud, M.L.; Guisasola, J. e C. Furió-Gómez (2005). How are the concepts and theories of acid-base reactions presented? Chemistry in textbooks and as presented by teachers. *International Journal of Science Education*, 27, 11, 1337-1358.

Furió-Más, C.; Calatayud, M.L. e S.L. Bárcenas (2007). Surveying students' conceptual and procedural knowledge of acid-base behavior of substances. *Journal of Chemical Education*, 84, 10, 1717-1724.

Gabel, D.L.; Samuel, K.V. e D. Hunn (1987). Understanding the particulate nature of matter. *Journal of Chemical Education*, 64, 8, 695-697.

Gentner, D. e K.J. Holyoak (1997). Reasoning and learning by analogy: introduction. *American Psychologist*, 52, 32-34.

Gillespie, R.G. (1997). Commentary: Reforming the general chemistry textbook. *Journal of Chemical Education*, 74, 484.

GEPEQ (Pitombo, L.R.M. e M.E.R. Marcondes, Eds.) (2005a). *Interações e transformações I – Elaborando conceitos sobre transformações químicas*. São Paulo: Edusp.

GEPEQ (Pitombo, L.R.M. e M.E.R. Marcondes, Eds.) (2000). *Interações e transformações III – A química e a sobrevivência – Atmosfera: Fonte de Materiais*. São Paulo: Edusp.

GEPEQ (Pitombo, L.R.M. e M.E.R. Marcondes, Eds.) (2005b). *Interações e transformações IV – Química e a sobrevivência – Hidrosfera: fonte de materiais*. São Paulo: Edusp.

Harrison, A.G. (2006). The affective dimension of analogy. Student interest is more than just interesting! Em: P.J. Aubusson, A.G. Harrison e S.M. Ritchie (Eds.), *Metaphor and Analogy in Science Education* (pp. 51-63). Netherlands: Springer.

Harrison, A.G. e D.F. Treagust (2006). Teaching and Learning with Analogies: Friend or foe? Em: P.J. Aubusson, A.G. Harrison e S.M. Ritchie (Eds.), *Metaphor and Analogy in Science Education* (pp. 11-24). Netherlands: Springer.

Hartwig, D.R.; Souza, E. e R.N. Mota (1999). *Físico-Química*. São Paulo: Scipione.

Hartwig, D.R.; Souza, E. e R.N. Mota (1999). *Química Geral e Inorgânica*. São Paulo: Scipione.

Hazlehurst, T.H. (1940). Acid-Base Reactions: Their analogy to oxidation-reduction reactions in solution. *Journal of Chemical Education*, 17, 10, 466-468.

Joesten, M.D. e J.L. Wood (1996). *World of Chemistry*. Orlando: Saunders College Publishers.

Johnstone, A.H. (1982). Macro and Microchemistry. *School Science Review*, 64, 227, 377-379.

Johnstone, A.H. (1993). The development of chemistry teaching: A changing response to changing demand. *Journal of Chemical Education*, 70, 9, 701-705.

Justi, R. e J. Gilbert (1999). History and philosophy of science through models: The case of chemical kinetics. *Science & Education*, 8, 287-307.

Justi, R. e J. Gilbert (2006). The role of analog models in the understanding of the nature of models in chemistry. Em: P.J. Aubusson, A.G. Harrison e S.M. Ritchie (Eds.), *Metaphor and Analogy in Science Education* (pp. 119-130). Netherlands: Springer.

Kozma, R.B. e J. Russell (1997). Multimedia and understanding: Expert and novice responses to different representations of chemical phenomena. *Journal of Research in Science Teaching*, 34, 9, 949-968.

Kotz, J.C. e P.M. Treichel Jr. (2005). *Química Geral e Reações Químicas*. São Paulo: Thomson.

Laugier, A. e A. Dumon (2004). The equation of reaction: a cluster of obstacles which are difficult to overcome. *Chemistry Education: Research and Practice*, 5, 3, 327-342.

Lembo, A. (1999). *Química: realidade e contexto*. São Paulo: Ática.

Lisboa, J.C.F. (Ed.) (2010). *Ser Protagonista – Química*. São Paulo: Edições SM.

Lopes, A.R.C. (1992). Livros didáticos: obstáculos ao aprendizado da ciência química – obstáculos animistas e realistas. *Química Nova*, 15, 3, 254-261.

Lopes, A.R.C. (1995). Reações químicas: fenômenos, transformação e representação. *Química Nova na Escola*, 2, 7-9.

Mahan, B.M. e R.J. Myers (1995). *Química – Um curso universitário*. São Paulo: Edgard Blücher.

Manahan, S.E. (2004). *Fundamentals of Environmental Chemistry*. Boca Raton: CRC Press.

Martorano, S.A.A. e M.E.R. Marcondes (2009). As concepções de ciência dos livros didáticos de química, dirigidos ao ensino médio, no tratamento da cinética química no período de 1929 a 2004. *Investigações em ensino de Ciências*, 14, 3, 341-355.

McMurry, J. e R.C. Fay (2001). *Chemistry*. Upper Saddle River: Prentice Hall.

Megid Neto, J. e H. Fracalanza (2003). O livro didático de ciências: problemas e soluções. *Ciência & Educação*, 9, 2, 147-157.

Ministério da Educação de Brasil (2000). *Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino Médio (PCNEM)*. Em: <http://portal.mec.gov.br/seb/arquivos/pdf/ciencian.pdf>.

Monteiro, I.G. e R.S. Justi (2000). Analogias em livros didáticos de química brasileiros destinados ao ensino médio. *Investigações em ensino de Ciências*, 5, 267-91.

Mortimer, E.F. (1988). A evolução dos livros didáticos de Química destinados ao ensino secundário. *Em Aberto*, 7, 40, 24-41.

Mortimer, E.F. e A.H. Machado (2003). *Química para o ensino médio (Série Parâmetros)*. São Paulo: Scipione.

Mortimer, E.F. e A.H. Machado (2010). *Química*. São Paulo: Scipione.

Nery, A.L.P.; Liegel, R.M. e C. Fernandez (2006). Reações envolvendo íons em solução aquosa: uma abordagem problematizadora para a previsão e equacionamento de alguns tipos de reações inorgânicas. *Química Nova na Escola*, 23, 14-18.

Niaz, M. (2002). Facilitating conceptual change in students' understanding of electrochemistry. *International Journal of Science Education*, 24, 4, 425-439.

Nóbrega, O.S.; Silva, E.R. e R.H. Silva (2001). *Química: conceitos básicos*. São Paulo: Ática.

Nóbrega, O.S.; Silva, E.R. e R.H. Silva (2007). *Química*. São Paulo: Ática.

Novais, V. (1999). *Química*. São Paulo: Atual.

Österlund, L.-L.; Berg, A. e M. Ekborg (2009). Redox models in chemistry textbooks for the upper secondary school: Friend or foe? *Chemistry Education: Research and Practice*, 11, 182-192.

Pacer, R.A. (1973). Conjugate acid-base and redox theory. *Journal of Chemical Education*, 50, 3, 178-180.

Peruzzo, F.M. e E.L. Canto (2003a). *Química na abordagem do cotidiano (versão para o mercado)*. São Paulo: Moderna.

Peruzzo, F.M. e E.L. Canto (2003b). *Química na abordagem do cotidiano (versão para o PNL D)*. São Paulo: Moderna.

Peruzzo, F.M. e E.L. Canto (2010). *Química na abordagem do cotidiano*. São Paulo: Moderna.

Pozo, R.M. (2001) Prospective teacher's ideas about the relationships between concepts describing the composition of matter. *International Journal of Science Education*, 23, 4, 353-371.

Reis, M. (2001). *Completamente química*. São Paulo: FTD.

Reis, M. (2010). *Química: meio ambiente, cidadania, tecnologia*. São Paulo: FTD.

Russell, J.B. (1994). *Química Geral*. São Paulo: Pearson Makron Books.

Santos, F.M.T. e I.M. Greca (2005). Promovendo a aprendizagem de conceitos científicos e de representações pictóricas em Química com uma ferramenta de simulação computacional. *Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias*, 4, 1. Em: <http://www.saum.uvigo.es/reec>.

Santos, W.L.P. e G.S. Mól (Eds.) (2004). *Química & sociedade – Elementos, interações e agricultura*. São Paulo: Nova Geração.

Santos, W.L.P. e G.S. Mól (Eds.) (2004). *Química & sociedade – Cálculos, soluções e estética*. São Paulo: Nova Geração.

Santos, W.L.P. e G.S. Mól (Eds.) (2008). *Química & sociedade*. São Paulo: Nova Geração.

Santos, W.L.P. e G.S. Mól (Eds.) (2010). *Química cidadã*. São Paulo: Nova Geração.

Sardella, A. (1999). *Curso de Química*. São Paulo: Ática.

Snyder, C.H. (2003). *The Extraordinary chemistry of ordinary things*. Hoboken: John Wiley & Sons.

Stains, M. e V. Talanquer (2008). Classification of chemical reactions: stages of expertise. *Journal of Research in Science Teaching*, 45, 7, 771-793.

Usberco, J. e E. Salvador (2009). *Química 1: Química geral*. São Paulo: Saraiva.

Usberco, J. e E. Salvador (2009). *Química 2: Físico-química*. São Paulo: Saraiva.

van Berkel, B.; Pilot, A. e A.M.W. Bulte (2009). Micro-macro thinking in chemical education: why and how to escape. Em: J.K. Gilbert e D.F. Treagust (Eds.), *Multiple representations in chemical education (Models and modelling in science education 4)* (pp. 31-54). Netherlands: Springer.

Vogel, A.I. (1981). *Química Analítica Qualitativa*. São Paulo: Editora Mestre Jou.

Wilbers, J. e R. Duit (2006). Post-festum and heuristic analogies. In *The Understanding Of The Nature Of Models In Chemistry*. Em: P.J. Aubusson, A.G. Harrison e S.M. Ritchie (Eds.), *Metaphor and Analogy in Science Education* (pp. 37-49). Netherlands: Springer.

Wu, K.-K.; Krajcik, J.S. e E. Soloway (2001). Promoting understanding of chemical representations: Students' use of a visualization tool in the classroom. *Journal of Research in Science Teaching*, 38, 7, 821-840.