REGRA DO OCTETO E TEORIA DA LIGAÇÃO QUÍMICA NO ENSINO MÉDIO: DOGMA OU CIÊNCIA?

Eduardo Fleury Mortimer
Faculdade de Educação da UFMG - Av. Antônio Carlos, 6627 - 31.270-901 - Belo Horizonte - MG
Gerson Mol e Lucienir Pains Duarte
Departamento de Química - ICEx - UFMG - Av. Antônio Carlos, 6627 - 31.270-901 - Belo Horizonte - MG

Recebido em 18/10/93; cópia revisada em 2/2/94

In this paper we analize the answers that students gave to a question about chemical bond. The students, who had graduated from high schools (age 17-18) in Belo Horizonte and other cities of Minas Gerais, were asked to calculate the enthalpy changes of different steps in the formation of solid sodium chloride from chlorine and sodium in the gaseous state. Some of the results from these calculations were in contradiction with an explanation for the stability of sodium chloride based on the octet rule, which the students were asked to evaluate. In analyzing the results we used ideas about conflicts, disturbances and compensation available in the literature on conceptual change in science teaching and in the piagetian theory of equilibration. The students showed a difficulty in recognising the results as conflictive with the explanation for the stability of chemical compounds in terms of the octet rule.

Keywords: chemical bond; octet rule; conflict; disturbances and compensations; conceptual change.

INTRODUÇÃO

Uma das formas mais usadas para se explicar porque os átomos se ligam, em cursos introdutórios de Química do Ensino Fundamental e Ensino Médio (antigos I e II Graus), é através da regra dos octetos. Segundo essa abordagem, os átomos tendem a ganhar ou perder elétrons para adquirirem uma configuração eletrônica estável. Isso quase sempre leva à conclusão de que "os átomos, ao se combinarem, adquirem o mesmo número de elétrons que o gás nobre de número atômico mais próximo, ficando, portanto, com oito elétrons na sua camada mais externa (...). Isto é conhecido como regra do octeto (...)"[1].

Os livros didáticos normalmente apresentam a configuração eletrônica de oito ou dois elétrons como sinônimo de estabilidade atômica[2], ignorando, por exemplo, que a formação de um cátion gasoso, como o $Na^+(g)$, a partir do átomo gasoso, implica num dispêndio de energia. Dessa forma, o cátion, por possuir mais energia, é menos estável que o átomo gasoso, apesar de possuir o octeto completo.

A crítica ao uso da regra do octeto como explicação para a origem da estabilidade nas ligacões químicas não é nova. Em 1962, Ferreira[3] já comentava que "o conceito de octeto de elétrons tem realmente muita importância histórica, mas afinal possui 45 anos de idade e já é tempo de destroná-lo da sua infalibilidade papal! (...) A energia eletrostática entre o cátion Na^+ e o ânion Cl^- é que dá estabilidade ao cloreto de sódio. Neste caso, como em outros, não é a tendência de adquirir um octeto de elétrons a causa do fenômeno de transferência eletrônica".

Apesar disso, a maioria dos livros didáticos de Química destinados ao Ensino Médio abordam a ligação química numa visão determinística e antropofórmica, se referindo a "átomos com tendência a perderem ou a ganharem elétrons para completar o octeto". Na maioria dos livros didáticos mais adotados não é usada, por exemplo, uma abordagem relacionando a formação da ligação química ao abaixamento da energia potencial do sistema, o que, aí sim, poderia ser considerada uma explicação para a estabilidade.

A este tipo de abordagem somam-se inúmeras outras presentes no ensino de química, em que regras práticas, como a do octeto, a de distribuição eletrônica, ou ainda as regras para se determinar os números quânticos de um determinado elétron, passam a ocupar o lugar dos princípios químicos que lhes deram origem. Edwards e Mercer[4] chamam a atenção para a distinção entre conhecimento *ritual*, ou de procedimentos, e o conhecimento de *princípios*. Segundo estes autores, "conhecimento *ritual* é um tipo particular de conhecimento relacionado aos procedimentos, ao saber fazer alguma coisa. (...) O conhecimento de *princípios* é essencialmente explanatório, orientado para o entendimento de como os procedimentos e os processos funcionam, porque certas conclusões são válidas e necessárias (...) Em muitos contextos, obviamente os procedimentos são inteiramente adequados e necessários. (...) Os procedimentos se tornam rituais quando passam a ser um substituto para o entendimento dos princípios subjacentes". Nos parece que isto é exatamente o que está ocorrendo com vários tópicos no ensino de química. No caso particular da regra do octeto, este *procedimento* útil para a previsão da valência e das fórmulas de compostos de elementos típicos da tabela periódica se transforma num *ritual*, um verdadeiro dogma a explicar a estabilidade dos compostos químicos, substituindo *princípios* mais gerais como as variações de energia envolvidas na formação de ligacões entre os átomos. Esse e outros fatos contribuem para aprofundar a má fama da Química, entre os estudantes do Ensino Médio: algo desinteressante e sem sentido, que apenas exige esforço de memória.

Neste artigo pretendemos discutir o levantamento que fizemos das respostas dos candidatos a uma questão da prova de Química da segunda etapa (prova escrita) do Concurso Vestibular do ano de 1992 da Universidade Federal de Minas Gerais. A questão (quadro 1) apresentava dados sobre a formação do cloreto de sódio sólido a partir dos átomos gasosos de cloro e sódio, e solicitava aos alunos, nos dois primeiros itens, que realizassem alguns cálculos sobre a energia das etapas e do processo global, o que apenas envolvia a aplicação direta da Lei de Hess. No terceiro item,

o aluno era solicitado a avaliar uma afirmação como verdadeira ou falsa, e justificar sua resposta levando em conta os resultados que obtivera nos itens anteriores. A afirmação constava de uma explicação para a estabilidade do cloreto de sódio sólido baseada na regra dos octetos.

Os resultados que serão apresentados permitem não só discutir a relação entre rituais e princípios no ensino de ligação química, como também avaliar se a relação entre teoria e experimento vem sendo enfatizada no ensino de química. Neste sentido, a questão que iremos investigar é: em que extensão um dado experimental, ou uma evidência contrária, é capaz de perturbar o dogmatismo das fórmulas fáceis e automáticas?

Quadro 1

Questão Analisada

As variações de entalpia envolvidas nas etapas de formação de NaCl(s) a partir dos átomos gasosos são:

$Na(g) \longrightarrow Na^+(g) + e^-$ $\Delta H = +\ 502{,}0$ kJ/mol

$Cl(g) + e^- \longrightarrow Cl^-(g)$ $\Delta H = -\ 342{,}0$ kJ/mol

$Na^+(g) + Cl^-(g) \longrightarrow NaCl(s)$ $\Delta H = -\ 788{,}0$ kJ/mol

1. CALCULE a variação de entalpia da reação

$$Na(g) + Cl(g) \longrightarrow Na(g) + Cl(g)$$

2. CALCULE a variação de entalpia do processo global de formação de NaCl(s) a partir dos átomos gasosos.

3. Considere a afirmativa:

"O que estabiliza o cloreto de sódio é a formação de octetos de elétrons de valência nos íons cloreto e sódio."

A partir dos resultados obtidos nos itens 1 e 2, INDIQUE se a afirmativa é verdadeira ou falsa e JUSTIFIQUE a resposta.

ANOMALIAS E EVENTOS DISCREPANTES: PERTURBAÇÕES E COMPENSAÇÕES

A discussão sobre o papel das anomalias e eventos discrepantes em estratégias de ensino de disciplinas científicas tem ocupado um grande espaço na literatura, principalmente nas propostas que consideraram a aprendizagem de conteúdos científicos como sinônimo de mudança conceitual[5]. As estratégias que usam a mudança conceitual como modelo para descrever o que ocorre nas salas de aula de ciências têm como base teórica uma visão construtivista de ensino. Apesar da grande variedade de diferentes abordagens sob o mesmo signo 'construtivista', é possível identificar pelo menos duas idéias centrais que parecem comuns à maioria delas: 1) a aprendizagem se dá através do envolvimento ativo dos aprendizes no processo de construção do conhecimento; 2) as concepções alternativas dos estudantes têm um papel importante no processo de aprendizagem, uma vez que esta tem por base o que o aluno já conhece[6].

Uma parcela significativa das estratégias de ensino para mudança conceitual se baseia na idéia de 'conflito cognitivo', que tem sua origem na teoria piagetiana da equilibração. O conceito de adaptação como resultado do equilíbrio entre assimilação e acomodação é central nesta teoria. Piaget define a assimilação como a "incorporação de um elemento exterior (objeto, acontecimento, etc.) num esquema sensório-motor ou conceitual do sujeito"[7]. Já a acomodação é definida como a necessidade do esquema de assimilação em considerar as particularidades próprias dos elementos a assimilar. Esses mecanismos são solidários. Todo esquema de assimilação tende a alimentar-se, ou seja, a incorporar em si elementos exteriores a ele, que são compatíveis com sua natureza. Por outro lado, todo esquema de assimilação é forçado a acomodar-se aos elementos que assimila, o que significa que deve modificar-se em função das particularidades desses elementos.[8]

O processo pelo qual um indivíduo constrói esquemas de conhecimento e os articula em totalidades é chamado de equilibração. Segundo Piaget, a equilibração é um processo que é acionado quando o sistema cognitivo de um indivíduo reconhece uma perturbação, gerada pela insuficiência de elementos para resolver uma situação nova (o que caracteriza uma lacuna), ou pelo fato da previsão do indivíduo em relação a determinado evento ou objeto estar em conflito com um fato ou com o resultado de um evento (o que caracteriza um conflito). Em resposta, o sistema cognitivo produz uma série de construções compensatórias (regulações), num processo gradual, que conduz novamente ao equilíbrio. Se o novo estado de equilíbrio conseguiu absorver a perturbação, transformando-a numa variação da estrutura reorganizada, tem-se o que Piaget chama de equilibração majorante, já que o novo estado de equilíbrio é melhor que o anterior.[9]

A teoria piagetiana prevê a existência de três diferentes formas de equilibração do sistema cognitivo: a primeira delas ocorre entre a assimilação dos objetos aos esquemas do sujeito e a acomodação destes esquemas aos objetos. A segunda pode ocorrer entre esquemas ou entre subsistemas, numa assimilação-acomodação recíproca entre diferentes esquemas que se referem aos mesmos objetos ou eventos. A terceira é uma equilibração entre diferentes esquemas e/ou subsistemas e uma totalidade que os engloba (por exemplo um conceito ou uma teoria), através de um processo de integração-diferenciação. Neste caso a integração no todo é um caso de assimilação e a diferenciação exige acomodação.[10]

Stavy e Berkovitz[11] identificaram o uso de dois tipos de conflitos em estratégias de ensino que estão claramente relacionados às diferentes formas de equilíbrio na teoria piagetina. O primeiro caracteriza o conflito entre a concepção do aluno sobre um fato da realidade e a própria realidade; o segundo, entre duas diferentes estruturas cognitivas relacionadas a um mesmo fato.

Nussbaum e Novick[12] usaram o primeiro tipo de conflito para sugerir uma estratégia de ensino cuja principal característica é o uso de eventos discrepantes, que entrariam em conflito com as concepções dos alunos. Esta estratégia tem sido largamente questionada em face da dificuldade de se encontrar eventos discrepantes ou 'experimentos cruciais' que provoquem insatisfação dos alunos em relação às suas idéias prévias. Para perceber anomalias ou contra-exemplos, eventos discrepantes ou experimentos cruciais, o indivíduo precisa possuir a nova idéia ou teoria que lhe permita ver os fatos como tais. Esta argumentação é claramente explicada em termos da filosofia e história da ciência por Lakatos[13], que mostra que um experimento só é visto como crucial retrospectivamente, décadas após a nova teoria ter triunfado.

Alguns autores levam este tipo de dificuldade em consideração no desenvolvimento de estratégias de ensino. Rowell e Dawson[14] apontam para a ineficácia do uso de conflitos no início de uma sequência de ensino, baseados na idéia de que uma teoria só é abandonada após uma outra, melhor, haver sido construída. Isso leva os autores a proporem a construção da melhor teoria em primeiro lugar, que é então colocada em conflito com as idéias dos alunos.

O principal problema neste tipo de estratégia é a dificuldade que o aluno enfrenta para reconhecer e vivenciar conflitos. Isto talvez explique a ineficácia de algumas discus-

sões em grupos, em sala de aula, nas quais os estudantes tendem a desenvolver cinturões protetores (num sentido Lakatosiano[15]) em torno do núcleo central de suas idéias no lugar de tentarem a superação de possíveis conflitos. Chi[16] chama atenção para o fato de que talvez o momento crucial no processo de mudança conceitual seja o reconhecimento de anomalias. Entender como elas são vistas como tal e como atingem a proporção de um conflito ou de uma crise no conhecimento, possibilitando a mudança, seria um passo importante para entender esse processo.

No presente artigo, nos propomos a investigar como os vestibulandos reagiram ao fato de que os dados, calculados por eles mesmos, sobre a energia de um sistema antes e depois de algumas reações, eram potencialmente perturbadores para a crença de que o que explica a estabilidade dos compostos químicos é a formação do octeto de elétrons na camada de valência. Para isso há que se considerar como o indivíduo pode reagir a uma perturbação. Piaget, por exemplo, considera que a existência de uma situação potencialmente perturbadora não leva, necessariamente, à superação da idéia inicial. O estudante poderia não reconhecer a perturbação como tal, e sua idéia inicial permaneceria inalterada. Ainda que ele reconhecesse a perturbação, poderia recorrer a hipóteses *ad hoc* para adaptar a velha idéia ao evento perturbador, evitando de mudá-la no essencial.

Para que a perturbação leve o estudante a um progresso no seu conhecimento, é necessária uma construção compensatória, em que as lacunas sejam preenchidas por reforços e os conflitos corrigidos. Piaget[17] identifica três fases na construção compensatória. Na primeira fase, o sujeito procura neutralizar a perturbação, seja simplesmente ignorando-a, seja deformando-a para não reconhecê-la como tal. A existência desse tipo de compensação não leva a um estado de equilíbrio melhor que o anterior, pois o indivíduo não modifica suas idéias. Isso ajuda a explicar a dificuldade de se lidar com estratégias de ensino baseadas em conflitos. Os alunos podem simplesmente deformar o observável ou ignorar o conflito.

Essa primeira fase da construção compensatória pode evoluir para uma segunda, em que o expediente de neutralizar a perturbação dá lugar à tentativa de integrá-la, criando teorias específicas para explicá-la, ou mudando um pouco a explicação inicial, a fim de incorporar a perturbação. Nesta fase, a idéia antiga pode conviver com a nova e essa contradição aparentemente não traz problemas ao indivíduo. Ao contrário do que ocorre na primeira fase, a perturbação é reconhecida e integrada na idéia anterior, que é assim modificada, mesmo que através de uma estratégia de mínimo custo e máximo ganho.

A reorganização de idéias iniciada na segunda fase se completará quando a perturbação for totalmente eliminada enquanto tal e passar a ser vista como uma possibilidade e não como um distúrbio. Neste caso o sistema explicativo é capaz de antecipar, por previsão ou dedução, as variações possíveis, que deixam de ser perturbadoras.

Essas idéias constituir-se-ão no referencial teórico para a análise das respostas que os alunos forneceram à questão sobre ligação química, uma vez que os resultados dos cálculos solicitados estavam em contradição com a explicação para a estabilidade do cloreto de sódio baseada na regra do octeto. A análise da questão permitirá, portanto, detectar se os estudantes reconheceram esses fatos potencialmente perturbadores e, em caso positivo, como compensaram a perturbação.

É importante ressaltar que a teoria piagetiana da equilibração não é uma teoria de aprendizagem, e sim parte de uma epistemologia que procura explicar como o sujeito constrói seu conhecimento, como ele melhora suas noções e se aproxima do conhecimento aceito como científico[18]. A teoria da equilibração tem, todavia, consequências importantes para o estabelecimento de estratégias de ensino de disciplinas científicas, como já procuramos esboçar neste artigo. Apesar disso, sua aplicação para a análise de respostas dos candidatos ao vestibular tem algumas limitações, cuja discussão é importante para estabelecer o alcance e a generalidade dos resultados que serão apresentados. O uso da teoria nos parece válido uma vez que a questão que está sendo analisada contém uma perturbação em potencial para o conhecimento do candidato e pode ter desencadeado um processo de construção compensatória na reflexão para obter a resposta. Entretanto, os processos de equilibração podem demandar tempo para que ocorra a passagem de uma fase a outra da construção compensatória. O fato do candidato estar numa situação anormal, sob tensão emocional e pressionado pelo tempo, inviabiliza que a perturbação seja devidamente refletida e absorvida num processo de construção compensatória. O nosso dado é um instantâneo desse processo e reflete apenas a reação inicial e imediata do candidato à perturbação.

Há que se considerar, ainda, que o item da questão analisada envolve dois tópicos do programa (termoquímica e ligações químicas), que normalmente são tratados como independentes no Ensino Médio. Apesar do programa do vestibular da UFMG fazer referência explícita à inter-relação entre os diversos tópicos do programa na análise de fenômenos químicos[19], o fato da questão demandar esse tipo de inter-relação pode se constituir numa perturbação adicional. Já nos referimos às três formas de equilibração dentro da teoria piagetiana. A dificuldade de assimilação recíproca entre os dois conjuntos de conceitos (no caso termoquímica e ligações químicas) e sua articulação em uma totalidade de modo a propiciar a análise da questão seria uma perturbação adicional a ser compensada. As respostas dos candidatos que são classificadas como um não reconhecimento da perturbação apresentada podem estar refletindo muito mais esse tipo de dificuldade, que seria anterior e talvez necessária ao reconhecimento de que a formação do octeto de elétrons não explica a estabilidade do composto formado.

A análise dos resultados segundo o referencial proposto tem, portanto, dois tipos de limitação. Não é possível saber, a partir das respostas, o que gerou o comportamento que o candidato apresentou ao responder a questão, principalmente quando este comportamento envolveu o desconhecimento da perturbação apresentada. Ao mesmo tempo o candidato, ao contrário do que acontece numa sala de aula, não teve tempo para percorrer as diferentes fases do processo de assimilação-acomodação da perturbação introduzida, e os resultados apresentados refletem apenas a reação imediata a ela. Essas limitações, no entanto, não invalidam a análise, uma vez que ela mostra, através de um exemplo concreto, como a a teoria piagetiana explica as dificuldades que as pessoas enfrentam para mudar suas concepções, mesmo frente a novas informações potencialmente perturbadoras para essas concepções.

RESULTADOS

A questão cujos resultados foram analisados (quadro 1) constava de 3 itens. No primeiro item o aluno deveria calcular a energia envolvida na formação do cátion sódio e do ânion cloreto no estado gasoso. O resultado desse cálculo evidencia o fato de que é necessário fornecer energia para formar os íons no estado gasoso, já que o ΔH da reação é positivo. No segundo item o aluno deveria calcular a energia envolvida no processo global de formação do NaCl(s) a partir do átomos gasosos. Neste processo global há liberação de energia, já que o ΔH é negativo. Os resultados desses cálculos evidenciam que a formação dos octetos nos íons

cloreto e sódio não estabiliza, por si só, o NaCl. Um sistema que apenas formasse os octetos e continuasse com os átomos isolados seria menos estável, pois teria mais energia (resultados do item 1). Os cálculos do item 2 ajudam a evidenciar que é a formação da rede cristalina através das ligações iônicas entre os íons cloreto e sódio o que realmente estabiliza o NaCl, uma vez que essa é a etapa que envolve maior liberação de energia.

Esses resultados estão em contradição com a afirmativa do item 3, que atribui a estabilidade do cloreto de sódio à formação dos octetos nos íons. Ao vestibulando foi solicitado que avaliasse a afirmação como 'verdadeira' ou 'falsa', e justificasse sua resposta considerando os resultados obtidos nos itens A e B. Teoricamente, mesmo que o aluno tivesse aprendido esse tipo de explicação para a estabilidade do cloreto de sódio, ele teria condições de rever sua concepção, desde que ele soubesse que um sistema é mais estável quando tem menos energia. A análise dos resultados que iremos apresentar mostra, no entanto, um quadro bem diferente.

Apesar de não ser objetivo do artigo avaliar a questão do vestibular e sim seus resultados, é necessário comentar que o fato da afirmativa do item C estar em contradição com os dados apresentados nos itens 1 e 2 é que permite o tipo de análise que propusemos. Se a afirmativa estivesse de acordo com os resultados apresentados e pudesse ser considerada como verdadeira, não teríamos como falar em perturbação e nosso referencial de análise não seria apropriado. Apesar disso, considerarmos que há um certo maniqueísmo em solicitar a avaliação da afirmativa como verdadeira ou falsa, uma vez que a formação dos octetos é uma etapa na formação do cloreto de sódio sólido e, apesar de não ser a etapa que estabiliza o composto formado, faz parte do processo cujo resultado final é um composto com menos energia, portanto mais estável, que os átomos isolados. Esse tipo de maniqueísmo poderia ter sido evitado se no item 3 tivesse sido solicitado para se comparar a afirmativa com os resultados e não avaliá-la como verdadeira ou falsa à luz dos resultados. Temos dúvida, no entanto, se tal procedimento conduziria a um padrão de respostas tão claro como o que apresentaremos a seguir.

AS EXPLICAÇÕES DOS ESTUDANTES

Nós analisamos as respostas dos estudantes em uma amostra aleatória de 25 % do total das provas da segunda etapa, o que significa 779 num total de 3113 provas. Esse total inclui todos os candidatos que se submeteram à prova de química da segunda etapa e não apenas os que foram aprovados no vestibular. É importante salientar que esse grupo pode ser considerado como uma amostra dos melhores estudantes entre os aproximadamente 30.000 que se submeteram ao vestibular, uma vez que fazem a prova da segunda etapa apenas os estudantes que obtêm as melhores notas na primeira etapa, numa proporção de aproximadamente 3 candidatos para cada vaga no curso pretendido. Na primeira etapa os estudantes são avaliados por provas de múltipla escolha em todas as disciplinas que fazem parte do exame (Português, Matemática, Química, Física, Biologia, História, Geografia e Língua Estrangeira). Na segunda etapa se submetem à prova de química os candidatos aos cursos de Biologia, Enfermagem, Engenharia (Civil, Elétrica, de Minas, Mecânica, Metalúrgica e Química), Fisioterapia, Física, Geologia, Medicina, Medicina Veterinária, Odontologia, Química e Terapia Ocupacional. Todos os cursos foram amostrados igualmente.

O primeiro resultado a considerar é que um total de 69,7% (542 estudantes) da amostra acertou completamente os ítens A e B da questão, que envolviam os cálculos de ΔH para etapas do processo, o que demandava uma aplicação simples e direta da Lei de Hess. Se acrescentarmos a este grupo os estudantes que acertaram um dos itens e erraram o outro, o total sobe para 81,6% (635 estudantes). Isso significa que mais de 80% dos estudantes, na amostra considerada, sabem lidar com cálculos envolvendo a aplicação da Lei de Hess. Ou seja, é grande o número de estudantes que têm sucesso na aplicação de um *procedimento* prático na solução de um problema químico. O exame que faremos do item 3, a seguir, mostra que a situação é totalmente diferente quando se trata de aplicar *princípios*.

Para analisar os resultados dos alunos no item 3 foi necessário encontrar padrões comuns de respostas, de modo que pudéssemos agrupar as respostas de acordo com esses padrões. Para encontrar esses códigos, procedemos a uma análise geral da amostra, antes de iniciar a codificação. Isso permitiu a idendificação dos padrões e a codificação na análise mais detalhada feita a seguir. Além disso, tivemos que considerar, na construção da tabela 1, esses padrões em relação ao fato do estudante ter avaliado a afirmativa como verdadeira ou falsa, e dele ter acertado os ítens A e B totalmente, parcialmente, ou ter errado totalmente estes itens.

Para reduzir o número de diferentes padrões a serem considerados, decidimos levar em conta apenas aqueles padrões que pudessem ser identificados em mais de 1,0% (8 estudantes) da amostra. Todos os que tiveram uma percentagem menor que 1,0 foram somados numa categoria de *outras respostas*. Usando esse critério foi possível agrupar as justificativas apresentadas em 5 tipos diferentes (vide tabela 1).

A justificativa que obteve maior percentagem foi rotulada como *regra do octeto*. Sob esse rótulo, consideramos todos os estudantes que usaram a própria regra do octeto ou que fizeram menção a ela para justificar a afirmativa do item 3. Como exemplo desse tipo de resposta podemos considerar a justificativa de que a afirmação é verdadeira porque

"o que estabiliza o NaCl é o Cl^- recebendo um elétron e completando 8 elétrons na última camada e o sódio perdendo um elétron e ficando com sua camada anterior completa",

ou que

"para estabilizar o NaCl há formação dos octetos nos íons Cl^- e Na^+, liberando grande quantidade de energia",

ou ainda que

"se não ocorrer a formação dos octetos nos íons Na^+ e Cl^- não formará NaCl, pois Na(g) e Cl(g) não reagirão entre si."

Um total de 296 estudantes (38,0%) usou este tipo de justificativa. Desse total, 285 (36,6%) consideraram a afirmativa como verdadeira. Apenas 11 estudantes (1,4%) usaram esse tipo de argumento para justificar que a afirmativa era falsa. Apesar do pequeno número, há que se considerar que esse raciocínio encerra uma contradição lógica, uma vez que usa, para justificar a falsidade de um argumento, esse mesmo argumento. Quanto aos 36,6% que consideraram a afirmativa verdadeira e justificaram usando a regra do octeto, podemos considerar que aqueles que acertaram os itens A e B totalmente (218 estudantes ou 28,0%) ou mesmo que parcialmente (40 estudantes ou 5,1%) desconheceram totalmente os resultados dos cálculos que tinham acabado de efetuar. Estes alunos foram, portanto, incapazes de reconhecer esses resultados enquanto uma perturbação para a idéia de que o que estabiliza o cloreto de sódio é a formação do octeto nos íons.

O segundo tipo de justificativa mais usado pelos vestibulandos obteve a preferência de 137 estudantes (17,6%). Segundo este grupo, a estabilidade do cloreto de sódio está relacionada ao abaixamento da energia do sistema devido à

Tabela 1. Tipos de Respostas Apresentadas pelos Estudantes ao Item 3 da Questão Analisada (valores em número de estudantes e porcentagem).

	Afirmativa do item 3 é verdadeira			Afirmativa do item 3 é falsa			Totais
Desempenho nos itens anteriores / Tipo de Justificativa	Acertou os itens A e B	Acertou os itens A ou B	Errou os itens A e B	Acertou os itens A e B	Acertou os itens A ou B	Errou itens A e B	
Regra do Octeto	218 (28,0%)	40 (5,1%)	27 (3,5%)	8 (1,0%)	---	3 (0,4%)	296 (38,0%)
Ligação Iônica e/ou Força Eletrostática e/ou Rede Cristalina	63 (8,1%)	11 (1,4%)	2 (0,3%)	57 (7,3%)	2 (0,3%)	2 (0,3%)	137 (17,6%)
Formação de NaCl Libera Energia e/ou Formação dos Íons Absorve	56 (7,2%)	13 (1,7%)	4 (0,5%)	51 (6,55%)	9 (1,2%)	2 (0,3%)	135 (17,3%)
Íon Sódio e/ou Cloro Não Forma Octeto	1 (0,1%)	---	1 (0,1%)	24 (3,1%)	6 (0,8%)	4 (0,5%)	36 (4,6%)
NaCl é Formado a Partir dos Átomos Gasosos	3 (0,4%)	1 (0,1%)	---	21 (2,7%)	1 (0,1%)	1 (0,1%)	27 (3,5%)
Outros Tipos de Justificativa	24 (3,1%)	7 (0,9%)	4 (0,5%)	16 (2,1%)	3 (0,4%)	7 (0,9%)	61 (7,8%)
Totais	365 (46,9%)	72 (9,2%)	38 (4,9%)	177 (22,7%)	21 (2,7%)	19 (2,4%)	692 (88,8%)
Item 3 em Branco							67 (8,6%)
Questão em Branco							20 (2,6%)
Total Geral							779 (100%)

interação eletrostática entre os íons, ou à formação da ligação iônica, ou ainda à formação do retículo cristalino. Nós chamamos esse grupo de *ligação iônica e/ou rede cristalina e/ou força eletrostática*, para indicar que os argumentos utilizados estão relacionados à teoria das ligações químicas. Desse total de 137 (17,6%) apenas 61 (7,8%) consideraram que a afirmativa do item 3 era falsa, o que pode ser considerada como uma compensação completa da perturbação. Para esses alunos, os resultados obtidos nos itens anteriores não seriam perturbadores, uma vez que eles poderiam ser antecipados por uma explicação que considera que não é a formação dos octetos e sim a formação da rede cristalina, fruto da atração eletrostática entre o íons, o fator responsável pelo abaixamento da energia e consequente estabilização do cloreto de sódio. Como exemplo desse tipo de resposta podemos considerar aquela que afirma que:

"A formação dos octetos necessita de energia, não sendo estados estáveis, e não é a formação desses octetos o que estabiliza o NaCl e sim a união dos íons."

ou ainda

"A afirmativa é falsa pois para que Na(g) e Cl(g) estabilizem é necessário a sua união com liberação de energia e não só a formação do octeto."

Por outro lado, 76 estudantes (9,8%) desse total de 137 (17,6%) usaram este tipo de justificativa, mas consideraram a afirmativa como verdadeira. Nos parece que esses alunos também desconheceram o fato da formação dos octetos dispender energia ou não consideraram esse fato como perturbador. Nossa impressão é que esses alunos conheciam uma explicação para estabilidade de compostos químicos em termos de abaixamento de energia do sistema na formação de ligacões químicas, mas consideraram esse tipo de explicação como complementar àquela fornecida pela regra do octeto. Um exemplo desse tipo de resposta é aquele que justifica que a afirmativa é verdadeira porque:

"O NaCl é um composto iônico que forma redes cristalinas onde seus elétrons desemparelhados se aproximam para obterem a estabilidade";

ou ainda

"Quando o Na^+ e Cl^- se juntam através de ligação iônica, eles se estabilizam liberando assim muito mais calor do que quando estão sob a forma de íons."

O terceiro grupo de argumentos é bastante semelhante a este anterior, pois faz referência ao fato de que a estabilidade do NaCl está relacionada ao baixo conteúdo energético do composto ou que a formação do NaCl é acompanhada de grande liberação de energia, ou ainda que, apesar da formação dos íons absorver energia, a formação do composto libera. Apesar disso nós decidimos classificar essas repostas em um grupo diferente pelo fato delas não fazerem nenhu-

ma referência à causa dessa liberação de energia, que no grupo anterior era atribuída à ligação iônica, ou à atração eletrostática entre os íons, ou ainda à formação da rede cristalina. Há que se considerar ainda que essa referência ao conteúdo energético do NaCl é apenas uma constatação, decorrência imediata da leitura dos resultados obtidos nos itens A e B da questão, que mostram exatamente esse dado de que a formação do NaCl é acompanhada de grande liberação de energia e que a formação dos íons envolve absorção de energia. Nós chamamos esse grupo de *formação do NaCl libera energia.*

Do total de 135 estudantes (17,3%) que usaram esse tipo de argumento, 62 (8,0%) consideraram a afirmativa do item 3 como falsa, sendo que desse total 60 (7,7%) acertaram os itens A e B totalmente (51 estudantes ou 6,6%) ou parcialmente (9 estudantes ou 1,2%). Consideramos que esses alunos reconheceram a perturbação introduzida pelos resultados dos itens A e B, mas não conseguiram mais do que constatá-la, não introduzindo nenhuma explicação adicional. Esse grupo estaria numa posição intermediária entre aqueles que simplesmente ignoram os dados e aqueles para os quais os dados são previsíveis e portanto não perturbadores, pois podem ser antecipados pela teoria da ligação química. Neste grupo intermediário o aluno aceita a perturbação e procura incorporá-la à sua explicação, mesmo que apenas através de uma constatação. Como exemplo de respostas classificadas neste grupo temos aqueles estudantes que afirmaram que a afirmativa era falsa por que:

"o que dá estabilidade ao NaCl é o baixo conteúdo energético do composto. Sua formação é acompanhada de grande liberação de energia";

ou ainda que

"o que estabiliza o NaCl é sua baixa energia em relação aos seus íons constituíntes".

O número de estudantes que usou esse tipo de justificativa mas que considerou a afirmativa do item 3 como verdadeira foi maior do que os que a consideraram como falsa. Esse número corresponde a um total de 73 estudantes (9,4%), sendo que desse total 69 (8,9%) acertaram os itens 1 e 2 totalmente (56 estudantes) ou parcialmente (13 estudantes). Consideramos que esses alunos constataram os dados apresentados nos itens A e B, de que a formação do NaCl libera energia e a formação dos íons absorve energia, mas não consideraram esses fatos como perturbadores para a explicação de que a origem da estabilidade do NaCl é a formação dos octetos. Consideramos que esse tipo de resposta é hierarquicamente superior ao do grupo *regra do octeto*, uma vez que o grupo *formação do NaCl libera energia* pelo menos reconheceu uma constatação oferecida pelos resultados obtidos nos cálculos dos itens A e B, enquanto que o outro grupo se limitou a formular a mesma regra com outras palavras. No entanto, em termos das categorias de compensação a que nos referimos, esse grupo também pode ser classificado entre aqueles que desconheceram a perturbação potencialmente oferecida pelos resultados. O tipo de justificativa usado pelos estudantes que avaliaram a afirmação do item 3 como verdadeira é inteiramente similar ao daqueles que a avaliaram como falsa. Como exemplo, podemos citar o estudante, que escolhendo a afirmativa como verdadeira, escreveu que

"Tal fato pode ser justificado a partir do raciocínio de que quando Na(g) e Cl(g) reagem para formar NaCl, há uma grande liberação de calor, fazendo com que a energia interna do NaCl seja pequena. É esta energia interna reduzida o que confere estabilidade ao NaCl".

O quarto e o quinto grupo de respostas apresentaram dois tipos de raciocínio bem interessantes para conciliar o resultado encontrado no item 1 (formação dos íons, e portanto dos octetos, absorve energia) e a idéia de que a formação do octeto de elétrons é sinônimo de estabilidade. Ou o estudante afirmava que os íons sódio e cloreto não formavam o octeto, o que explicava porque no item 1 houve absorção de energia (quarto grupo), ou o estudante afirmava que a formação do NaCl sólido não passava por essa etapa do item 1, ou seja, ele poderia ser formado diretamente a partir dos átomos gasosos (quinto grupo). Nos dois casos nos parece que os estudantes preferiram negar a formação do octeto nos íons do que negar inteiramente a regra do octeto como sinônimo de estabilidade.

Assim, 36 estudantes (4,6%) afirmaram que o íon sódio e/ou o íon cloreto não formam octeto. Desse total, 34 (4.3%) usaram esse argumento para justificar que a afirmativa do item 3 era falsa. Exemplos desse tipo de resposta:

"Falsa. Nos íons cloro e sódio não há formação de octeto e por isso é preciso absorver energia."

"Falsa. Os íons Na^+ e Cl^- formam entre si uma ligação iônica, sendo que nessa ligação apenas o Cl^- completa o seu octeto eletrônico. "

Nossa interpretação para esse tipo de raciocínio foi a seguinte: apesar de reconhecer a perturbação, o estudante não modifica o seu conceito de que o octeto é sinônimo de estabilidade, mas deforma o significado do resultado do item 1, afirmando que a formação dos íons não leva à formação dos octetos, já que houve aumento de energia. A maioria dos que optaram por essa resposta se referiu apenas ao íon sódio, o que nos levou a interpretar que o aluno poderia estar pensando, equivocadamente, que perda do elétron pelo sódio deixaria sua camada de valência sem nenhum elétron, não correspondendo, portanto à formação do octeto.

As respostas do quinto grupo têm um significado um pouco diferente. No lugar de tentar eliminar a perturbação deturpando o significado dos resultados, esse grupo a aceitou e criou uma hipótese *ad hoc* para justificá-la: o NaCl pode ser formado diretamente a partir dos átomos gasosos, sem que seja necessário passar pela etapa de formação dos íons, calculada no item 1 como aquela que absorve energia.

Optaram por esse tipo de resposta 27 estudantes (3,5%). Desse total, 23 (3,0%) usaram esse argumento para justificar que a afirmativa C era falsa. Exemplos desse tipo de resposta:

"A afirmativa é falsa pois os elementos usados na formação do NaCl(s) são o Na(g) e o Cl(g) e não seus respectivos íons."

"A afirmativa é verdadeira porque podemos fazer o NaCl a partir também de seus átomos gasosos que formarão os octetos quando se combinarem."

A tentativa de preservar a regra do octeto, através de hipóteses *ad hoc*, é evidente nestas afirmações.

Um número relativamente grande de respostas (61 estudantes ou 7,8%) não pôde ser classificado entre esses 5 grupos anteriores. No entanto, entre as argumentacões apresentadas por esse grupo nenhuma chegou a caracterizar um outro grupo que pudesse ser considerado como significativo (mais de 8 estudantes ou 1,0 %). Além disso, grande parte desses argumentos não apresentavam uma justificativa relacionada aos dados que haviam sido calculados ou com a afirmação que estava sendo avaliada. Exemplos desse tipo de resposta:

"A afirmativa é verdadeira porque não é necessário dividir ou multiplicar nenhuma equação durante a formação do NaCl."

"Verdadeira. É uma reação endotérmica com uma energia de ativação bastante alta, dando assim maior estabilidade".

"Verdadeira, pois os elétrons formados nos Cl^- e Na^+ se neutralizam permitindo a formação do NaCl."

INTERPRETANDO OS RESULTADOS EM TERMOS DE RECONHECIMENTO DA PERTURBAÇÃO E DE SUA COMPENSAÇÃO

Para analisar os resultados sob esse prisma, optamos por abandonar os resultados dos alunos que erraram totalmente os itens A e B, uma vez que não sabemos se esses alunos chegaram a um resultado que pudesse ser considerado como perturbador para a afirmação, contida no item 3, de que o que estabiliza o cloreto de sódio é a formação do octeto de elétrons nos íons cloreto e sódio. Também desconsideramos as respostas classificadas como "outros tipos de justificativa" na tabela 1, em razão da dificuldade de analisarmos esses argumentos. Por outro lado, agrupamos os alunos que acertaram totalmente os itens A e B com aqueles que acertaram apenas parcialmente, de modo a facilitar a apresentação dos dados. Em consequência desses arranjos, a tabela 2 apresenta o cruzamento dos tipos de justificativa com a opção pelo verdadeiro ou falso na avaliação do item 3. Nos interstícios da tabela apresentamos, além dos resultados, a interpretação do tipo de compensação apresentada, segundo os critérios que já discutimos ao longo da apresentação dos resultados. Há que se chamar a atenção para o fato de que, devido a esses arranjos, nem todos os estudantes amostrados foram considerados na tabela 2, de modo que a soma das porcentagens é inferior a 100.

Na construção da tabela optamos por considerar três tipos de compensação. A compensação do tipo I não pode ser considerada como uma compensação propriamente dita, pois neste caso o estudante desconheceu a perturbação apresentada, pois optou por considerar a afirmativa contida no item 3 como verdadeira, apesar dos cálculos do item 1 revelarem que um sistema contendo íons cloreto e sódio gasosos, com o octeto completo mas não ligados, tem mais energia (por-

Tabela 2. Análise das Respostas dos Estudantes em Termos de Compensação à Perturbação (valores em número de estudantes e porcentagem).

Tipo de Justificativa	Afirmação do Item 3 é Verdadeira	Afirmação do Item 3 é Falsa
Regra do Octeto	simplesmente desconhece a perturbação e nada acrescenta à explicação contida no item 3 Tipo de compensação: I_1 258 (33,1%)	inconsistência lógica 8 (1,0%)
Ligação iônica e/ou força eletrostática e/ou rede cristalina	desconhece a perturbação mas acrescenta uma explicação além da regra do octeto Tipo de compensação: I_3 74 (9,5%)	considera a perturbação como previsível dentro da explicação apresentada. Portanto, a perturbação não é considerada como tal, mas como uma possibilidade dentro do sistema de explicação: Tipo de compensação: III 59 (7,6%)
Formação do NaCl libera energia e/ou formação dos íons absorve energia	desconhece a perturbação apesar de constatar o fato de que a formação dos íons absorve energia Tipo de compensação: I_2 69 (8,9%)	reconhece a perturbação mas não a compensa, pois não oferece nenhuma explicação para o fato perturbador, apenas constatando-o. Tipo de compensação: II_1 60 (7,7%)
Íon sódio e/ou cloro não formam octeto	inconsistência lógica 1 (0,1%)	reconhece a perturbação mas deturpa o significado do resultado no lugar de modificar o conceito expresso no item 3 Tipo de compensação: II_2 30 (3,9%)
NaCl é formado diretamente a partir dos átomos gasosos	cria um artifício para ignorar a perturbação, ignorando a etapa de formação dos íons em virtude dela consumir energia Tipo de compensação: I_2 4 (0,5%)	reconhece a perturbação e cria uma hipótese *ad hoc* para compensá-la, no lugar de modificar o conceito expresso no item 3 Tipo de compensação: II_3 22 (2,8%)

tanto, é menos estável) do que um sistema contendo os átomos isolados (sem o octeto completo). Neste caso ele pode ter simplesmente repetido os argumentos contidos na afirmação do item 3 (compensação do tipo I_1); ou ter constatado o resultado de que a formação dos íons absorve energia mas nem por isso considerado este resultado como perturbador para a idéia contida no item 3 (compensação do tipo I_2); ou ainda ter acrescentado uma explicação correta para a estabilidade do cloreto de sódio, baseada no conceito de ligação química, mas sem rever a idéia de que a formação do octeto estabiliza o cloreto de sódio (compensação do tipo I_3).

Consideramos como compensação do tipo II aquela em que o estudante reconheceu a perturbação, avaliando a afirmação do item 3 como falsa, mas ou não a compensou, apenas constatando o fato (compensação do tipo II_1), ou a compensou apenas parcialmente. Neste último caso, ou o estudante deturpou o significado dos resultados, afirmando por exemplo que o íon sódio e/ou cloreto não haviam formado o octeto (compensação do tipo II_2); ou ele criou hipóteses auxiliares (*ad hoc*) para absorver a perturbação, afirmando, por exemplo, que o cloreto de sódio pode ser formado diretamente a partir dos átomos gasosos, sem passar pela etapa de formação dos íons (compensação do tipo II_3). Em todos esses casos, apesar do estudante ter considerado como falsa a afirmativa de que a estabilidade do cloreto de sódio é explicada pela formação dos octetos de elétrons nos íons sódio e cloro, sua justificativa nos leva a inferir que ele não descarta totalmente esse tipo de explicação, já que em suas hipóteses ele elimina a etapa de formação do octeto na formação do cloreto de sódio ou nega a própria formação do octeto. Poderíamos inferir, em relação a estas respostas, que o estudante preferiu abandonar a etapa de formação do octeto, em que seus cálculos indicaram um aumento de energia, a abandonar a própria idéia de que é a formação de octetos de elétrons que estabiliza os compostos químicos. Neste caso, portanto, ele teria considerado a afirmação do item 3 como falsa não por negar a explicação que ele encerra, mas por considerar que no caso particular do cloreto de sódio ou não ocorre a formação do octeto ou a formação do NaCl pode ocorrer sem essa etapa.

Finalmente, foi considerada como compensação do tipo III aquela em que a perturbação perdeu esse caráter por ter sido considerada como previsível dentro do conceito de ligação química. Assim, podemos inferir que os estudantes classificados neste tipo não consideraram como perturbador o fato de que os íons isolados, com octeto completo, tenham mais energia que os átomos isolados. Esses alunos teriam considerado que é a formação do cristal através da ligação entre os íons, devido à atração eletrostática entre eles, o que explica o abaixamento da energia do sistema e sua estabilidade, e não a formação dos octetos.

A figura 1 apresenta os mesmos dados da tabela 2, da distribuição dos estudantes da amostra por esses diferentes tipos de compensação, só que através de um gráfico de barras, o que facilita a comparação dos resultados. A análise do gráfico revela uma nítida predominância do tipo de compensação I, em que o estudante simplesmente desconhece a perturbação apresentada. Isso é uma clara evidência do caráter dogmático que predomina no ensino de química, onde as evidências, os resultados, ou os dados valem pouco ou nada frente à regras práticas ensinadas como princípios.

A título de comparação apresentamos o mesmo tipo de figura apenas para os estudantes candidatos ao Curso de Medicina, uma vez que os candidatos a esse curso obtiveram a média mais alta na prova analisada. Apesar de haver uma diminuição relativa do tipo de compensação I_1 e um aumento relativo dos tipos I_2, I_3, II_1 e III, a tendência geral de predominância do primeiro tipo de compensação foi mantida, e a figura 2 tem a mesma forma geral da figura 1. Isso evidencia que as conclusões que podemos tirar dessa análise são generalizáveis ao ensino de química como um todo, pois a tendência geral dos resultados se confirmou mesmo entre os melhores estudantes.

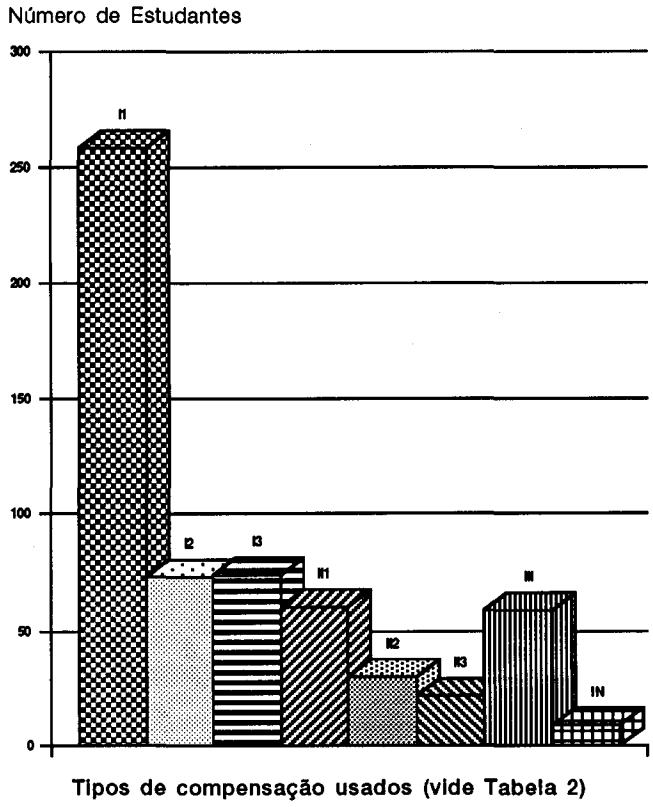

Figura 1. Tipos de compensação usados pelos estudantes na amostra completa.

CONCLUSÕES E IMPLICAÇÕES PARA O ENSINO

Os resultados obtidos mostram que há uma tendência generalizada no ensino de química em atribuir a estabilidade dos compostos químicos à formação do octeto eletrônico e que esta "crença" não é abalada facilmente por evidências ou resultados contrários a ela. Essa constatação nos remete ao papel das evidências empíricas ou experimentais no ensino de química e à relação entre "princípios" e "rituais" a que nos referimos no início deste artigo.

Nossos dados confirmam a dificuldade dos estudantes em reconhecer um fato empírico ou um resultado experimental como perturbador e potencialmente refutador de uma determinada "verdade" aprendida através do ensino. Esse fato demonstra que a relação entre evidência experimental e teoria não vem sendo enfatizada no ensino de química, uma vez que o estudante parece não estar habituado a trabalhar com a possibilidade de que um fato experimental possa refutar uma afirmação teórica. Afinal, apenas 7,6% dos estudantes amostrados consideraram os resultados da questão como previsíveis, apresentando uma explicação alternativa à formação do octeto para a estabilidade do cloreto de sódio. Além desses, apenas outros 14,4% reconheceram os resultados dos cálculos de entalpia de formação dos íons gasosos e de formação do NaCl sólido como perturbadores para a afirmação de que a estabilidade do cloreto de sódio é devida à formação dos octetos nos íons cloreto e sódio. Esses estu-

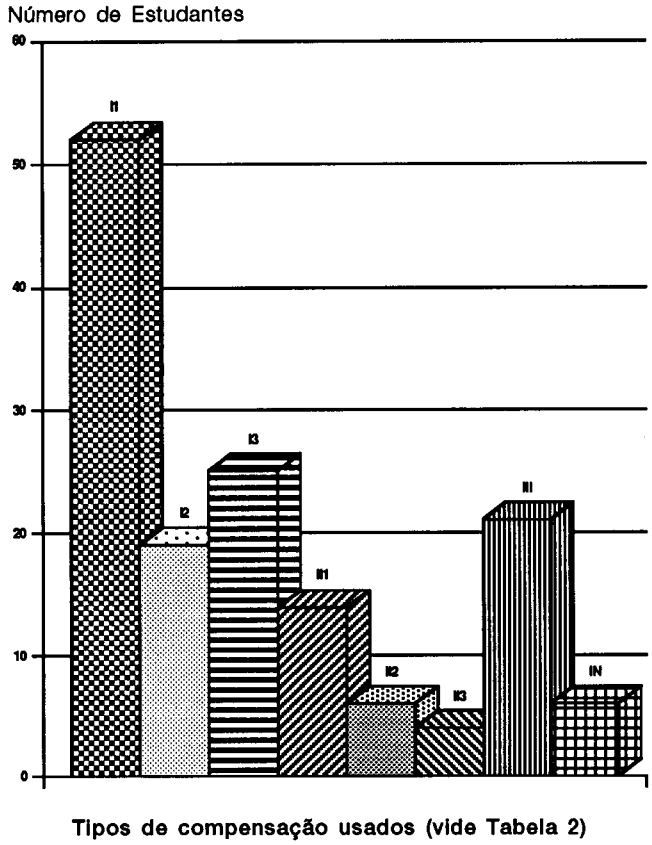

Figura 2. Tipos de compensação usados pelos candidatos ao curso de medicina.

dantes, apesar de não terem apresentado uma explicação plausível para o fato, foram capazes de reconhecer um resultado como potencialmente refutador em relação à afirmação teórica em questão. Dos restantes 78,0%, pelo menos 52,0% desconheceram totalmente os resultados a que haviam chegado, uma vez que esses estudantes acertaram os cálculos dos itens 1 e 2 mas não reconheceram esses resultados como perturbadores para o tipo de explicação que haviam aprendido, baseado na regra do octeto.

Além da necessidade de se enfatizar a relação entre teoria e resultado experimental, ou entre conjectura teórica e fato empírico, nossos dados apontam na direção de que a melhoria do ensino de química não passa simplesmente pelo implementação de um ensino experimental. Mais do que isso, é necessário reconhecer que os resultados experimentais, por si só, são insuficientes para levar à construção do conhecimento químico pelo aluno. O conhecimento não reside nos fatos empíricos, uma vez que toda observação é carregada de teoria. Diferentemente, o processo de construção do conhecimento em sala de aula passa necessariamente por uma negociação do entendimento entre o professor e o aluno. A sala de aula é um espaço social onde o conhecimento a ser compartilhado entre professor e aluno depende tanto de uma troca linguística de significados quanto da leitura de resultados e dados experimentais.

O segundo aspecto importante que nossos dados revelam é a ênfase no conhecimento "ritual" em detrimento do conhecimento de "princípios" químicos. A "crença" na regra do octeto como panacéia explicativa revela seu caráter de dogma de fé, totalmente distante de um procedimento racional que seria esperado de alguém que supostamente aprende uma "ciência". O uso da racionalidade e do conhecimento empírico como critérios para avaliação do alcance de afirmações teóricas é claramente prejudicado pelo excessivo apelo a um conjunto de procedimentos práticos, ritualísticos, que parece permear diferentes assuntos ensinados em Química no Ensino Médio. Dos truques mnemônicos para memorizar a ordem dos elementos químicos nos primeiros períodos da tabela períodica ao diagrama de Pauling, das regras de nomenclatura às regras para se determinar os números quânticos de um elétron num átomo, um infinito número de procedimentos sobrevive nas salas de aula independente dos princípios que lhes deram origem. Não há como negar o valor desses procedimentos práticos, pois eles conferem agilidade ao processo de resolução de problemas práticos. No entanto, é inaceitável que esses procedimentos substituam, como fonte de explicação para os fatos químicos, os princípios químicos que lhes deram origem. Isso os transforma em conhecimento ritualístico e reforça a má fama da Química, entre os estudantes e o público em geral, como "ciência da memória" ou "coisa de iniciados meio loucos", afastando muitos daqueles estudantes que poderiam se interessar pela profissão do químico. Reverter essa tendência ritualística e resgatar os princípios químicos e sua relação com os fatos experimentais como temas centrais do ensino nos parece tarefa fundamental para reafirmar o caráter da Química como ciência racional e não como conhecimento dogmático e ritualístico.

NOTAS E REFERÊNCIAS

1. in Silva, R.H. & Silva. E.B. *Curso de Química 1* (2ª Edição). Editora Harbra, São Paulo 1992, pp. 204-205. Essa afirmação aparece, em forma bastante semelhante, em quase todos os livros de uso corrente no Ensino Médio.
2. no mesmo livro citado na nota 1 encontramos a regra do octeto apresentada numa subseção do capítulo de ligação química intitulada "Os átomos e suas estabilidades".
3. in Ferreita, R., *Ciência e Cultura* (1962) **14**, 76, p. 78.
4. Edwards, D. and Mercer, N. *Common knowledge - The development of understanding in the classroom.* Routledge, London (1987), p. 97.
5. Apesar do uso generalizado da expressão 'mudança conceitual' na literatura, há pouco consenso sobre seu significado. Os primeiros modelos de ensino como mudança conceitual apareceram nos artigos de Posner, G.J., Strike, K.A., Hewson, P.W. and Gertzog, W.A., *Science Education,* (1982) **66**, 211, e nos artigos de Hewson, P.W., *Eur. J. Sci. Educ.* (1981) **3**, 383 e (1982) **4**, 61. Nestes artigos, mudança conceitual é definida como "o processo pelo qual conceitos centrais e organizadores de indivíduos muda de um conjunto de conceitos a outro, incompatível com o primeiro" (Posner et alli, op. cit. p. 411, tradução nossa). Para uma revisão dos principais aspectos teóricos e metodológicos envolvidos nas propostas de mudança conceitual, ver West, L.H.T. and Pines, A.L., *Cognitive Structure and Conceptual Change*, Academic Press, Orlando (1985). Para uma revisão do uso do modelo de mudança conceitual na literatura, ver Hewson, P.W. and Thorley, R., *Int. J. Sci. Educ.* (1989) **11**, 541. Para diferentes formas de abordar a mudança conceitual em sala de aula vide, Neidderer, H., Goldberg, F. and Duit, R., *Research in Physics Learning: Theoretical issues and empirical studies.* Proceedings of The International Workshop: Research in Physics Learning, University of Bremen, Bremen (1991). Para uma crítica e a discussão de alternativas ao modelo de mudança conceitual, vide Mortimer, E.F., *Quím. Nova* (1992) **15**, 242.

6. A explicitação desses dois princípios aparece em vários artigos de revisão de ensino-aprendizagem numa perspectiva contrutivista. Ver, por exemplo, Driver, R., *Int. J. Sci. Educ.* (1989) *11, 481, p. 481* ou Duit, R., *Science Eduction* (1991) **75**, 649, p. 652.
7. Piaget, J. *O desenvolvimento do pensamento: Equilibração das estruturas cognitivas.* Dom Quixote, Lisboa, (1977), p. 16.
8. Piaget, J. (1977). Op. cit., p. 18.
9. idem, p. 45 e 46.
10. ibidem, p. 21.
11. Stavy, R. and Berkovitz, B. *Science Education* (1980) **64**, 679.
12. Nussbaum, J. and Novick, S. *Instructional Science* (1982) **11**, 183.
13. Lakatos, I. Falsification and the methodology of scientific research programmes, in I. Lakatos & A. Musgrave (Eds.) *Criticism and the growth of Knowledege.* Cambridge University Press, Cambridge (1970), p. 158, tradução nossa.
14. Rowell, J.A. and Dawson, C., *Eur. J. Sci. Educ.* (1984) **7**, 331.
15. Lakatos, I. (1970), op. cit.
16. Chi, M.T.H. Conceptual change within and across ontological categories: Examples from learning and discovery in Science. In R. Giere (Ed.) *Cognitive models of Science: Minnesota Studies in the Philosophy of Science.* Minnesota, University of Minnesota Press, Minnesota (1991).
17. Piaget, J. (1977), op. cit., p. 90.
18. Piaget, J. *Lógica e Conhecimento Científico.* Livraria Civilização, Porto (1977).
19. Universidade Federal de Minas Gerais, *Guia do Candidato.* UFMG, Belo Horizonte (1991).