

# Favorecendo o aprendizado do modelo eletrostático: análise de um processo de ensino de ligação iônica fundamentado em modelagem – Parte II

Paula Cristina Cardoso Mendonça e Rosária Justi\*

## ABSTRACT (Favouring the electrostatic model learning: Analysis of an ionic bonding modelling-based teaching - Part II)

A sequence of activities for the teaching of ionic bond was developed following both the modelling-based teaching and the electrostatic model theoretical backgrounds. Such activities were used in a medium level classroom (16-18 years old students) from a public Brazilian school. Data were collected from video-recording of the class, and written material produced by students. They supported the proposition of case studies for each group of students. From the analysis of the case studies, we discuss how the teaching activities favoured students learning about ionic bond.

**KEYWORDS:** ionic bond, electrostatic model, modeling-based teaching

**Resumen** (Favorecimiento del aprendizaje del modelo electrostático: análisis del modelo de enseñanza del enlace iónico con base en modelaje) Se elaboró una secuencia de actividades para la enseñanza del enlace iónico de acuerdo con las suposiciones de la enseñanza por modelaje y del modelo electrostático. Esa estrategia fue aplicada en una clase de bachillerato (16-18 años) de una escuela pública brasileña. A partir de los datos recogidos (filmación en el aula, actividades y evaluaciones) fueron hechos estudios de caso para cada uno de dos grupos de alumnos. Con base en esos datos discutimos cómo la estrategia de enseñanza favorece el aprendizaje del enlace iónico por los alumnos.

**Palabras clave:** enlace iónico, modelo electrostático, enseñanza basada en modelaje.

## Contextualização da pesquisa

Na ciência atual, um *modelo* pode ser compreendido como uma representação de uma idéia, objeto, evento, processo ou fenômeno para um dado sistema, que apresenta uma finalidade específica (Gilbert, Boulter and Elmer, 2000).

De acordo com Ferreira (2006), *modelagem* pode ser entendida como um processo de selecionar, interpretar e integralizar aspectos relevantes, conceitos e proposições objetivando descrever, explicar e prever fenômenos e sistemas.

Alguns autores (por exemplo, Clement, 2000; Justi & Gil-

bert, 2002) definem ciência como um processo de construção de modelos com diferentes capacidades de previsão. Essa definição une o processo (elaboração e uso dos modelos como instrumentos fundamentais para o desenvolvimento de raciocínio científico) e os produtos (modelos originados desse processo) como centrais na construção e disseminação do conhecimento científico (Justi, 2006).

Tais definições implicam na necessidade de inserção dos alunos em atividades de modelagem (elaboração, reformulação, teste e exploração das potencialidades de modelos) no contexto do ensino, para que eles possam compreender tanto a centralidade do papel de modelos na prática científica, quanto o caráter dinâmico, humano e não linear da ciência, em concordância com as exigências contemporâneas para o ensino de ciências (AAAS, 1990). Nesse caso, além de os alunos compreenderem um dos principais processos da prática científica, eles podem aprender vários aspectos dos modelos curriculares envolvidos nas atividades de modelagem.

Visando contribuir para melhorias nesse campo do ensino de ciências, principalmente oferecendo um caminho aos professores que desejem criar e conduzir atividades de modelagem no ensino, propusemos uma estratégia fundamentada em modelagem para o ensino do tema ligação iônica (Parte I). (Mendonça & Justi, 2009). Aplicamos essa estratégia em uma situação real de ensino e, nesse artigo, analisaremos os dados obtidos nessa intervenção. Optamos pela escolha desse tema, pelos motivos destacados a seguir:

- A existência de concepções alternativas – por exemplo, ligações iônicas ocorrem através de transferência de elétrons; a configuração eletrônica de um átomo determina o número de ligações que ele pode formar; quando os átomos envolvidos se estabilizam ocorre a formação de um molécula (Butts & Smith, 1987; Coll & Treagust, 2003; Ta-

**Recibido:** 1 de julio 2008; **aceptado:** 11 de noviembre 2008.

\* Faculdade de Educação, Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil.

**Correos electrónicos:** paulaquimica2003@yahoo.com.br; rjusti@ufmg.br

ber, 1994, 1997) – que podem advir da abordagem tradicional, que se baseia em regras e classificações (Mortimer, Mol and Paes, 1994; Taber, 2000).

- A importância desse assunto no âmbito da química. É a partir do conhecimento sobre as ligações químicas que, por exemplo, as propriedades das substâncias podem ser explicadas.
- A elevada exigência de abstração e capacidade de visualização por parte dos alunos para compreender a ligação e propriedades de compostos iônicos no nível sub-microscópico.
- A pouca quantidade de materiais e metodologias relatados que contribuam significativamente para a solução desses e de outros problemas freqüentemente descritos na literatura.

Essa estratégia de ensino se fundamentou em dois pressupostos teóricos – diagrama Modelo de Modelagem (Justi & Gilbert, 2002) e o modelo eletrostático.

O diagrama Modelo de Modelagem apresenta uma organização das etapas necessárias ao processo de modelagem. Ele foi proposto por Justi e Gilbert (2002) a partir de observações de como cientistas constroem modelos. Esses mesmos autores, em um artigo publicado em 2003 (Justi & Gilbert, 2003), salientaram a potencialidade do uso desse diagrama para assessorar a construção de atividades de modelagem no contexto de ensino.

O grande desafio dessa proposta de ensino foi a transposição das etapas presentes nesse diagrama para uma situação de ensino, de forma a favorecer a elaboração de atividades que levassem os alunos a vivenciar as etapas necessárias de um processo de modelagem.

Nas atividades de ensino nos preocupamos em discutir elementos que favorecem o entendimento e a elaboração de um modelo curricular com características coerentes com o modelo científico (modelo eletrostático). Isso porque esse modelo é o que capacita o aluno a entender as propriedades de substâncias iônicas, o que pode também acarretar em o aluno compreender o motivo de estudar ligação química no ensino médio<sup>1</sup>.

Para obter mais detalhes sobre o diagrama Modelo de Modelagem, o modelo eletrostático e melhor compreender o relacionamento desses na elaboração da estratégia de ensino para o tema ligação iônica ver o artigo “Favorecendo o Aprendizado do Modelo Eletrostático: Análise de um Processo de Ensino de Ligação Iônica Fundamentado em Modelagem – Parte I”.

### A estratégia de ensino

A estratégia consta de oito atividades cujos principais objetivos são, respectivamente:

1. Discutir a relação entre abaixamento de energia e estabilidade na formação de uma substância a partir de átomos isolados.
2. Explicar como íons são formados e quais são os íons mais estáveis gerados a partir de Na(s) e Cl<sub>2</sub>(g) através da análise de dados de energia de ionização e afinidade eletrônica.
3. Propor um modelo que demonstre como esses íons integram levando à formação do NaCl.
4. Testar os modelos através da proposição de uma explicação para a elevada temperatura de fusão do cloreto de sódio.
5. Testar os modelos através da análise de dados energéticos envolvidos na formação de NaCl a partir dos íons Na<sup>+</sup>(g) e Cl<sup>-</sup>(g).
6. Usar o modelo para explicar propriedades físicas de compostos iônicos, como a elevada temperatura de fusão e o fato de eles serem duros, quebradiços e apresentarem plano de clivagem.
7. Calcular a energia de rede do cloreto de sódio e interpretar o significado físico do cálculo.
8. Estabelecer um modelo consensual. Verificar abrangências e limitações desse modelo em relação ao curricular.

Maiores detalhes sobre a estratégia de ensino ver artigo Parte I.

### Questão de pesquisa

Nesse artigo abordaremos a seguinte questão: Qual a influência da discussão do modelo eletrostático através do ensino fundamentado em modelagem na aprendizagem de ligação iônica?

### Caracterização da pesquisa

#### Amostra

Após aprovação do projeto de pesquisa pelo Comitê de Ética em Pesquisa da Universidade Federal de Minas Gerais e assinatura de Termos de Consentimento Livre e Esclarecido por parte dos alunos e de seus responsáveis, a estratégia foi aplicada em uma turma do 2o ano do ensino médio (16 - 18 anos) de uma escola pública federal. A turma era constituída por 32 alunos, que se organizaram em 6 grupos com 5 a 6 componentes fixos durante todo ano letivo.

Em termos de conteúdos químicos, naquela escola os alunos já haviam estudado: propriedades dos materiais; modelo de partículas; modelos atômicos; distribuição eletrônica, tabela periódica e as propriedades periódicas; reação química e soluções (aspectos qualitativos e quantitativos).

A pesquisadora PCCM era a professora da turma, desde o início do ano letivo. Esses alunos não tinham estudado ligação química com essa professora.

O currículo de física da escola era recursivo, isto é, os alunos tinham contato com as áreas do conhecimento de física em todos os anos do ensino, aprofundando o nível de conhecimento em cada série. Portanto, eles já haviam estudado for-

<sup>1</sup> No Brasil, o ensino médio é o nível que precede o nível universitário. Ele ocorre em três anos e é geralmente cursado por alunos de 15-17 anos.

ça coulombiana em física quando a estratégia de ensino foi aplicada.

### Aspectos Metodológicos

O processo de ensino ocorreu em 20 horas/aulas (distribuídas em 10 encontros), incluindo as atividades de modelagem<sup>2</sup> e aulas de fechamento.<sup>3</sup> Durante todo o processo de ensino, a professora deu tempo para que os alunos pudessem discutir e expor suas idéias com bastante tranqüilidade.

Diversos tipos de instrumentos de coleta de dados foram utilizados intencionalmente, pois tínhamos o intuito de coletar diferentes tipos de dados que possibilitassem avaliar os sujeitos da pesquisa em momentos distintos e entender melhor suas idéias.

Os dados escritos consistiram das respostas às atividades elaboradas para o ensino de ligação iônica por modelagem e de avaliações de aprendizagem.<sup>4</sup> Estas eram compostas por questões abertas, que exigiam dos alunos conhecimento sobre aspectos energéticos envolvidos no estabelecimento de ligação química, dos modelos para ligações químicas e do uso desses modelos para explicar as propriedades físicas de substâncias (ver Anexo).

As ações e comunicações ocorridas nas aulas foram registradas em vídeo. Além disso, a professora fez anotações importantes ao final de cada aula. Através da filmagem das aulas foram obtidos dados relativos ao processo de elaboração e socialização dos modelos, além de aspectos atitudinais dos alunos em relação às atividades. Foram também recolhidas todas as atividades escritas e fotografados os modelos concretos produzidos pelos alunos.

A integração de todos os dados permitiu a elaboração de estudos de caso para cada grupo de alunos. As descrições dos estudos de caso possibilitaram o entendimento de algumas ações dos sujeitos e o estabelecimento de links, a partir dos quais as pesquisadoras realizaram inferências e teorizações, de forma independente. Posteriormente, na tentativa de garantir a confiabilidade da análise a partir do acordo entre árbitros (Cohen, Manion and Morrison, 2000), as análises realizadas por cada pesquisadora foram confrontadas e as divergências foram discutidas.

<sup>2</sup> Anteriormente a realização da Atividade 1, os alunos realizaram uma atividade cujo foco era discutir sobre modelos (natureza, funções, caráter provisório) e outra que discutia sobre modelagem (como sendo uma das principais práticas da ciência).

<sup>3</sup> Na qual a professora discutiu sobre outras propriedades dos compostos iônicos e apresentou outros exemplos de compostos dessa natureza, enfocando também suas estruturas cristalinas.

<sup>4</sup> Consistiram de um pós-teste 1, aplicado 4 semanas após o estudo de ligação iônica e de um pós-teste 2, aplicado 8 semanas após estudo de ligação iônica. Tais datas respeitaram o calendário regular de avaliações da escola

Após o estabelecimento de consenso sobre os aspectos mais relevantes do processo, foram redigidas as análises de cada estudo de caso (para obter mais detalhes sobre essa metodologia, consultar Cohen, Manion e Morrison (2000)). A análise dos estudos de caso fundamentou a discussão da questão de pesquisa.

### Resultados e discussão dos resultados

#### Visão Geral do Processo de Aprendizagem dos Alunos

Utilizaremos segmentos dos estudos de caso dos grupos para evidenciar como a discussão de algumas idéias químicas e do modelo eletrostático presentes na estratégia de ensino favoreceu o aprendizado de ligação iônica. Ao se fazer menção a um aluno de determinado grupo utilizaremos o código AxGy, onde x é o número aleatório do aluno no grupo e y corresponde ao número do grupo.

Na Atividade 1, com base nas evidências experimentais, os alunos interpretaram a liberação de energia como sendo evidência de uma reação química entre o magnésio e o oxigênio atmosférico, que ocorria a partir do fornecimento inicial de energia. Eles também afirmaram que o óxido de magnésio era mais estável do que o sistema inicial (Mg e O<sub>2</sub>), por não reagir quando exposto a uma chama. A professora pediu aos alunos que relacionassem a energia envolvida na combustão com as ligações químicas entre os átomos e que, a partir disso, explicassem a estabilidade do óxido de magnésio.

O grupo 5 questionou a professora sobre os estados de oxidação do magnésio e propôs uma explicação inicial para a estabilidade com base na quantidade dos elétrons envolvidos no processo de queima e na relação força da ligação e energia:

A6G5: "O magnésio fica mais estável quando recebe elétrons. Quanto mais forte a ligação mais estável é o composto?"

A5G5: "A ligação do magnésio pode ser, ao mesmo tempo, mais forte e gastar menos energia? A energia no MgO é menor, não é? Tanto que vai liberar energia (...) vai sobrar energia".

O grupo 6, a partir das evidências que dispunha até o momento, demonstrou um relacionamento entre abaixamento de energia e estabilidade:

"Se não há uma energia para que se inicie uma reação, o magnésio é estável. Já o óxido de magnésio, não tendo energia para liberar para que aconteça uma reação, é estável. O magnésio tem energia para liberar, o óxido de magnésio não, sua energia já foi liberada".

Ao perceber relacionamentos incoerentes de mesma natureza pelos dois grupos (energia como algo que as substâncias contêm ou armazenam sem relacionar ao processo) a professora informou à turma que: "Quando uma substância é formada ocorre abaixamento de energia, o que se relaciona com as quebras e formações de ligações dos átomos no processo.

MgO tem menor conteúdo energético que Mg e O<sub>2</sub> e, por isso, é mais estável. Portanto nós podemos pensar que as ligações são mais fortes. Nesse caso, o metal é mais estável quando ligado a um ânion”.

Após esse esclarecimento, alunos do grupo 3 afirmaram que, inicialmente, eles pensaram que a quebra de ligações entre os átomos das substâncias ocorria com liberação de energia, enquanto que na formação de ligações ocorria o contrário. Porém, para eles esse relacionamento não mais fazia sentido, após a constatação da intensa liberação de luz como sendo resultado da formação e estabilização do MgO.

Posteriormente, a partir da realização do experimento da “garrafa mágica” alunos dos grupos 5 e 6 questionaram a professora:

A6G5 e A5G6: “Quando é reversível ou irreversível tem a ver com essa variação de energia?”

A professora lhes informou que a variação de energia interferia no processo de reversibilidade. A partir disso, A2G4 explicitou para a turma que:

“Nesse caso aqui (se refere às reações que ocorriam na “garrafa mágica”), o sistema volta ao inicial porque a diferença de energia entre as substâncias é pequena. No outro não (se refere à queima do Mg), porque as diferenças de energia são grandes.”

Através da comparação entre esses dois sistemas, a relação entre abaixamento de energia na formação de ligações pode ser melhor compreendida pelos alunos, ou seja, foi possível chegar a um consenso de que a diferença de energia do sistema formado por Mg e O<sub>2</sub> em relação ao MgO era muito maior do que entre os reagentes e produtos da garrafa mágica. Portanto, o MgO era mais estável naquelas condições.

A partir da discussão do gráfico de energia potencial em função da distância entre átomos, os alunos aplicaram as idéias desenvolvidas, pois estabeleceram relacionamentos entre pontos da curva e o experimento envolvendo a reação entre magnésio e oxigênio. Por exemplo, eles relacionaram o poço ao estabelecimento de ligações entre magnésio e oxigênio e à formação da substância MgO, evidenciada experimentalmente pela liberação de luz.

As idéias químicas desenvolvidas nessa atividade a partir da discussão das perguntas à luz das evidências experimentais contribuíram para o entendimento de um aspecto geralmente difícil para os alunos: as relações entre formação de ligações e liberação de energia e entre quebra de ligações e consumo de energia (Teichert & Stacy, 2002), que foi primordial para a proposição de modelos cujo objetivo era explicar o estabelecimento de ligações iônicas, como será exposto a seguir.

A Atividade 2 tinha por objetivo a proposição de íons estáveis a partir de Na(s) e Cl<sub>2</sub>(g) com base na análise de dados de 1a. energia de ionização e afinidade eletrônica.

A professora enfatizou, quando necessário para alguns grupos, que não restringissem a resposta apenas à distribuição eletrônica com base na regra do octeto. A4G1 questionou a

professora sobre as outras energias de ionização do átomo de sódio. A professora lhe disse que a segunda energia de ionização seria bem maior do que a primeira. Com base nisso, A4G1 justificou o fato de o íon mais estável ser Na<sup>+</sup> não somente pela distribuição eletrônica, mas levando-se em consideração os valores de energia de ionização. Na socialização das respostas, todos os alunos da turma conseguiram concluir que os íons mais estáveis eram Na<sup>+</sup> e Cl<sup>-</sup> com base nas propriedades periódicas, como evidenciado pelas respostas:

“O íon de Na mais estável formado a partir de Na(s) é o Na<sup>+</sup>, já que é muito fácil ele perder um elétron (a energia de ionização é relativamente baixa) e é difícil ele ganhar um elétron (a afinidade eletrônica também não é muito alta)”. (Grupo 5)

“Cl<sup>-</sup>(g) já que sua energia de ionização é alta, dificilmente perde elétrons e sua afinidade eletrônica também é bem alta, uma grande probabilidade de ganhar elétrons. E um elétron por causa da distribuição eletrônica.” (Grupo 6)

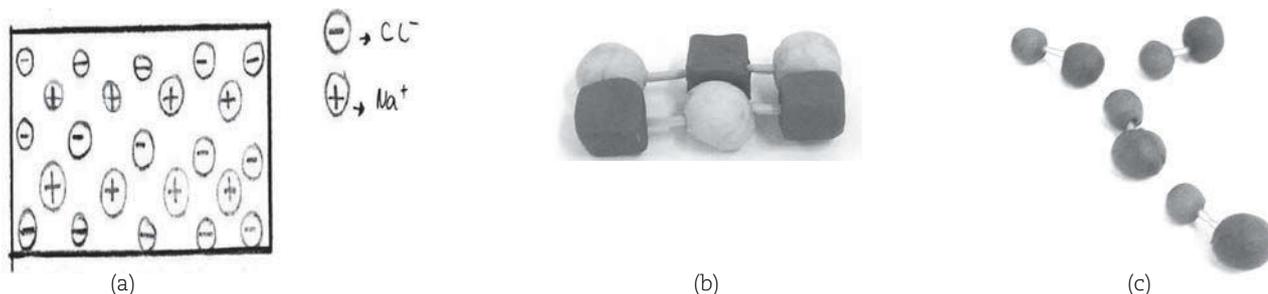
Além disso, eles conseguiram efetuar os cálculos de variação energética de calor de sublimação Na(s) → Na(g), energia de ionização para Na(g) → Na<sup>+</sup>(g) + e<sup>-</sup>, calor de atomização ½ Cl<sub>2</sub>(g) → Cl(g) e afinidade eletrônica Cl(g) + e<sup>-</sup> → Cl<sup>-</sup>(g) corretamente, demonstrando conhecimento do processo de formação de íons relacionado a questões energéticas, ao invés das regras enfatizadas no ensino tradicional.

Na Atividade 3, os alunos deveriam elaborar modelos de forma a explicar como os íons propostos na Atividade 2 se ligariam para formar a substância cloreto de sódio.

O grupo 4 propôs um modelo em rede (figura 1a) para o cloreto de sódio. Durante a discussão com a professora A2G4 deixou explícito que, ao propor seu modelo, ele tinha recordado das aulas de física do ano anterior, quando seu professor havia discutido sobre força eletrostática e lei de Coulomb e que, com base nisso, ele sabia que poderiam existir mais atrações, o que justificaria a formação de um sólido cristalino e organizado como o cloreto de sódio, apesar de não demonstrar organização em seu modelo expresso.

Os demais grupos propuseram modelos “moleculares” para o cloreto de sódio. Eles deixaram explícito que para eles o cloreto de sódio era composto por várias moléculas<sup>5</sup> formadas por uma única ligação entre os íons, enquanto entre uma molécula e outra haveria uma força de atração mais fraca. Ao justificar seu modelo (figura 1b), os alunos do grupo 2 afirmaram que a força de atração era inversamente proporcional à distância entre as cargas, de acordo com a lei de Coulomb. Por isso, eles representaram distâncias diferentes entre as bolinhas que representavam os íons, tentando evidenciar que a ligação corresponderia à menor distância entre os íons e que a interação corresponderia à maior distância. Os alunos dos grupos 3, 5 e 6 justificaram seus modelos (figura 1c) com base na atra-

<sup>5</sup> Termo empregado pelos alunos.



**Figura 1.** Modelos propostos na Atividade 3: (a) Modelo em rede proposto pelo grupo 4. (b) Modelo molecular proposto pelo grupo 2. (c) Modelo molecular proposto pelo grupo 5 (representações semelhantes foram feitas pelos grupos 1, 3 e 6). De acordo com esse modelo, o palito representa a ligação entre os íons, sendo que entre as moléculas há interações semelhantes a dipolo-dipolo.<sup>6</sup>

ção entre os íons de cargas opostas, do tipo eletrostática, de acordo com a lei de Coulomb. Apesar de terem se remetido à lei, para eles não era possível haver mais de uma ligação entre os íons, pois alguns enfatizaram que a ligação ocorria entre um cátion e um ânion devido à estequiometria do composto, 1:1 (remetendo à fórmula química do NaCl). Em contrapartida, A5G1 afirmou que suas representações foram feitas tomando como base a transferência de elétron (idéia que não havia sido comentada pela professora no processo de ensino) entre o cátion e o ânion e atrações eletrostáticas entre as moléculas.

A partir das justificativas dos alunos, percebe-se que a maneira como eles compreendiam força coulombiana, o conhecimento prévio da fórmula química do NaCl, remetendo a proporção 1:1, e a idéia de transferência de elétrons influenciaram significativamente na proposição desses primeiros modelos.

Não se tinha como intuito na Atividade 3 corrigir os modelos moleculares dos alunos, pois eles passariam para a fase de testes dos modelos nas próximas aulas, o que poderia ocasionar abandono da idéia de ‘moléculas de NaCl’. Entretanto, a idéia de transferência de elétrons por parte de componentes do grupo 1 foi corrigida pela professora, pois isso poderia influenciar na compreensão das etapas posteriores da modelagem. Ela fez isso retomando as discussões sobre os íons mais estáveis gerados a partir da análise dos dados apresentados na Atividade 2. Os componentes do grupo 1 entenderam a incoerência do uso da idéia de transferência de elétrons e disseram ter-se remetido à ela devido a outra etapa da escolarização, quando haviam estudado ligação iônica e esse aspecto havia sido enfatizado.

Na Atividade 4 (teste do modelo – explicar elevada temperatura de fusão do cloreto de sódio), alunos dos grupos 1 e 5 disseram que os modelos moleculares propostos na Atividade 3 não eram satisfatórios para explicar o dado empírico. A4G1 justificou diretamente à luz do novo dado:

*“nós consideravamos a interação entre as moléculas de valor inferior à força de atração entre os íons ... as interações entre as moléculas de NaCl seriam desfeitas com uma energia de valor muito menor”.*

Por outro lado, A3G6 se remeteu a um conhecimento prévio – dissolução do cloreto de sódio em água e a conseqüente formação de uma solução condutora – para enfatizar a inconsistência do modelo molecular e a necessidade de um novo modelo para explicar o novo dado empírico.

Em contrapartida, mesmo os alunos do grupo 6 tendo explicitado que a força da ligação deveria ser forte para justificar a elevada temperatura de fusão, a idéia de molécula persistiu, pois o grupo acreditava que se fosse atração por íons o sal deveria formar um grão gigante, pois *“...sempre vai ter uma carga para atrair outra.”*

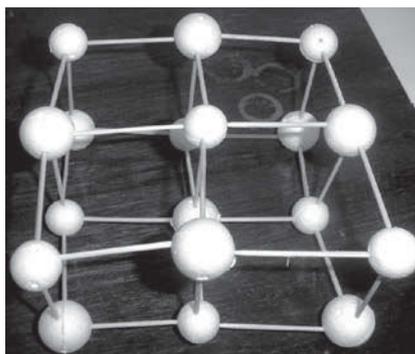
Na Atividade 5, visando favorecer o abandono de modelos moleculares e a proposição de modelos que evidenciassem a idéia de rede, os alunos deveriam interpretar um dado empírico relativo à energia liberada na formação de pares iônicos e de rede iônica à luz da discussão da Atividade 1.

A partir da interpretação desses dados, os alunos dos grupos 1, 4 e 5 confirmaram a validade de seus modelos não moleculares. Os alunos do grupo 5 afirmaram que o modelo era o mesmo da Atividade 4, mas que com os dados eles concluíram que:

*“para liberar mais energia teria que haver mais do que uma ligação por átomo [sic]. Sabendo que a energia liberada não é proporcional às ligações, não nos preocupamos em mostrar isso ..., porém, não se pode afirmar, se o número máximo de ligações será 6 (eles haviam proposto um modelo para o NaCl cúbico enfatizando 6 ligações para cada íon), não tenho todos os dados necessários”.*

Com base na análise dos dados empíricos, os alunos do grupo 2 apresentaram um modelo que evidenciou a idéia de rede (figura 2a) o que foi justificado a partir do relacionamento entre abaixamento de energia e estabilidade discutido na Atividade 1 e do conhecimento prévio da estrutura cúbica de cristais de cloreto de sódio.

<sup>6</sup>Termo não empregado pelos alunos, mas utilizado aqui na interpretação dos dados para indicar que os alunos sugeriram a idéia de interações entre pólos de naturezas distintas.



(a)



(b)

**Figura 2.** Modelos propostos na Atividade 5: (a) Modelo em rede tipo bolas e vareta proposto pelo grupo 2. (b) Modelo em rede compacto proposto pelo grupo 6.

Durante a realização dessa atividade, os componentes do grupo 6 questionaram a professora sobre os tipos de espécies químicas que eram condutoras de eletricidade. A professora os informou sobre os elétrons livres presentes nas estruturas metálicas e sobre os íons em movimento em soluções. A partir desse dado e de inferências realizadas a partir dos dados empíricos, eles concluíram que, no sólido, o que está ligado são os íons, não as moléculas (figura 2b). É importante ressaltar que eles abandonaram conscientemente o modelo molecular para o NaCl, ao justificarem que:

*“Pensamos que para o Na se ligar a Cl libera uma quantidade de energia maior que a do par, e se ligariam de alguma forma para ficarem mais estáveis, liberando assim mais energia. Então propomos que um íon Na se liga a mais de um Cl por interação eletrostática e este mesmo a mais de uma Na e assim por diante.”*

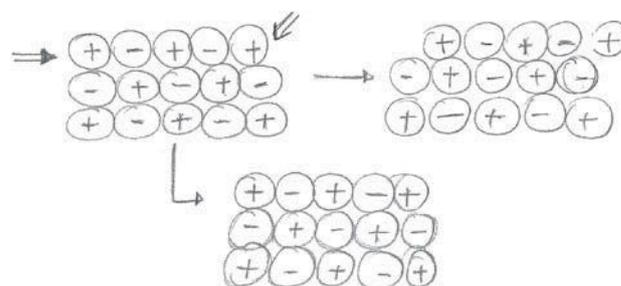
É importante destacar que, inicialmente, os alunos do grupo 3 estavam confusos, pois pensaram que no cloreto de sódio haveria dois pares iônicos. Para eles, se um par liberava 104,5 kcal de energia, dois pares liberariam o dobro, o que se aproximaria do valor experimental (206 kcal/mol). Posteriormente, eles lembraram que os cristais têm organização e planos de crescimento definidos. Além disso, a professora enfatizou que a energia não era proporcional ao número de pares que liberam energia, pois com o aumento dos pares aumentaria a repulsão entre os íons. A partir do conhecimento prévio – organização dos cristais – e da discussão com a professora, o grupo conseguiu propor um modelo tridimensional enfatizando apenas ligações interatômicas.

Posteriormente, os modelos em rede propostos pelos grupos foram testados na Atividade 6. Os grupos foram capazes de utilizar seus modelos para explicar de forma coerente a elevada energia gasta para romper as interações entre os íons no cristal e associaram a dureza de compostos iônicos com as várias e fortes ligações iônicas. Eles também conseguiram explicar porque de acordo com o sentido com que uma força é aplicada os compostos iônicos se fragmentam, como pode evidenciado na figura 3.

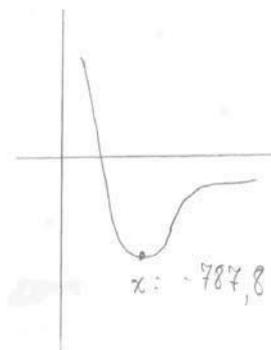
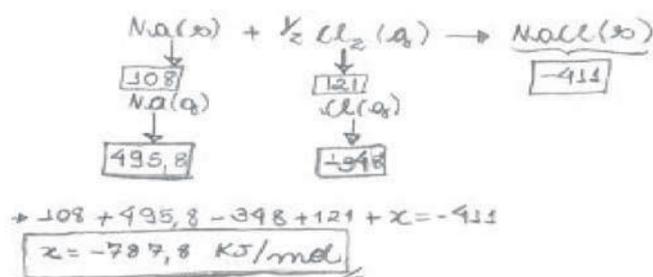
Após os alunos terem conhecimento da rede iônica do cloreto de sódio, eles calcularam sua energia de rede (Atividade 7). Para efetuar esse cálculo, foi fornecida uma tabela contendo as etapas envolvidas na formação do NaCl a partir de Na(s) e Cl<sub>2</sub>(g) com o respectivo  $\Delta H$  (semelhante a figura 4 da Parte I).

Todos os grupos conseguiram efetuar o cálculo corretamente e, ainda, explicar o significado físico do cálculo. Alguns deles até fizeram referência ao poço do gráfico de energia potencial em função da distância internuclear (sem que isso lhes fosse socilitado explicitamente), como pode ser visto na figura 4.

No fechamento da Atividade 8, os alunos, juntamente com a professora, aplicaram a lei de Coulomb a diferentes distâncias no retículo cúbico para o cloreto de sódio (de forma análoga a figura 3 da Parte I). Alguns alunos explicitaram que o valor de energia calculado através da expressão matemática deveria se aproximar do valor experimental de energia liberada na formação do NaCl (poço do gráfico). A professora enfatizou que esse raciocínio era correto, visto que o modelo eletrostático era o que melhor descrevia a ligação num composto iônico, e assim, deveria se aproximar do valor experimental. Isso foi especialmente importante porque a professora teve



**Figura 3.** Modelo proposto pelo grupo 1 para explicar porque ocorre a fragmentação de compostos iônicos ao ser aplicada força em determinados sentidos.



"Para ocorrer a formação de um mol desta rede iônica a partir de  $\text{Na}^+(g)$  e  $\text{Cl}^-(g)$  é necessário que se libere 787,8 kJ.

Figura 4. Cálculo da energia de rede e sua interpretação física (Grupo 1).

evidência de que alguns alunos compreenderam que os modelos propostos para justificar determinada ligação química deveriam explicar o abaixamento de energia através de uma boa aproximação com o valor determinado experimentalmente. Acreditamos que isso demonstra uma compreensão de conteúdo e sobre o fazer científico, pois evidencia uma aproximação do processo de construção do conhecimento dos alunos ao processo através do qual o conhecimento é elaborado na ciência.

Visando promover um entendimento mais amplo do tema ligação iônica, a professora apresentou distintos modelos para o cloreto de sódio – modelos bidimensionais na forma compacta e de bolas e varetas, modelo tridimensional e fórmula química – e discutiu sobre vantagens e desvantagens de cada forma de representação. Posteriormente, ela apresentou modelos de outros tipos de compostos iônicos para a turma (modelos bidimensionais e tridimensionais) com o intuito de evidenciar diferentes redes iônicas, números de coordenação e como a estrutura cristalina evidencia o aspecto macroscópico de um sólido iônico.

### Verificando o Aprendizado do tema: Análise das Avaliações

No pós-teste 1, verificamos que 71,9% dos alunos demonstraram idéias relativas ao modelo eletrostático (por exemplo, formação de retículo cristalino, no qual os íons interagem através de forças eletrostáticas) nas questões que exigiam conhecimento e uso do mesmo (questões 1 e 2 – ver Anexo). Também verificamos que 15,8% dos alunos demonstraram idéias relacionadas ao octeto (transferência de elétrons e molécula como unidade elementar de uma substância iônica) e 12,3% apresentaram respostas inconcludentes quanto ao tipo de modelo que apresentavam para uma substância iônica.

Na questão 4 do pós-teste 1, pedimos aos alunos que analisassem uma sentença relacionada ao fator que estabiliza o cloreto de sódio. No quadro 1 é apresentada a análise dessa questão.

A análise do quadro 1 evidencia que 40,7% dos alunos foram capazes de perceber que a sentença era incorreta e relacionar a estabilidade alcançada pelo NaCl com alguma idéia

coerente. Dos demais alunos (59,3%) que não conseguiram perceber incoerências na sentença, 13,5% não demonstraram qualquer conhecimento do modelo eletrostático nas demais questões, enquanto, que 45,8% desses apresentaram idéias do modelo eletrostático nas demais questões. Isso pode ser um indício de que alguns alunos conviveram com o conhecimento obtido em outra etapa de escolarização (ligação iônica como transferência de elétrons) com o conhecimento atual (modelo eletrostático), visto que alguns desses alunos relataram esse conhecimento prévio na proposição de seus modelos, como A5G1 (como apresentado anteriormente).

Ao se comparar os percentuais obtidos na análise dessa questão com a pesquisa realizada por Mortimer et al. (1994), no qual os autores investigaram respostas a uma questão de vestibular<sup>7</sup> muito semelhante à questão do pós-teste 1 ora analisada, constatamos que o percentual de respostas coerentes (40,7%) é bem mais elevado do que os obtidos por esses pesquisadores (em cuja amostra apenas 7,6% dos estudantes<sup>8</sup> utilizaram explicações distintas da regra do octeto para explicar a estabilidade do cloreto de sódio). Isso parece evidenciar que a discussão de fatores energéticos durante vários momentos da estratégia de ensino favoreceu o desenvolvimento de uma postura mais crítica por parte dos alunos quanto às regras geralmente impostas no ensino de química.

Em relação aos alunos que apresentaram idéias para ligação iônica restritas ao modelo do octeto ou que não apresentaram um modelo para ligação iônica, constatamos que eles foram exatamente aqueles que faltaram a muitas aulas da estratégia de ensino e os que menos se engajaram cognitivamente no processo de ensino por modelagem, participando pouco nos grupos.

<sup>7</sup> Exame para ingresso na universidade que os alunos têm que fazer no Brasil. Na UFMG, ele acontece em duas etapas, sendo a primeira constituída de questões fechadas de caráter mais geral e a segunda de questões abertas e mais complexas.

<sup>8</sup> É importante ressaltar que esses estudantes podem ser considerados como muito bons, pois já haviam sido selecionados na primeira etapa do vestibular para cursos muito concorridos.

**Quadro 1.** Análise da questão 4 do pós-teste1.

<i>Categorias</i>	<i>% de alunos</i>
Refuta a idéia de estabilidade do NaCl relacionada ao octeto e associa estabilidade...	
... à força eletrostática existente entre os íons, sendo o fator responsável pelo abaixamento de energia.	12,5
... à força eletrostática existente entre os íons, sem apontá-la como o fator responsável pelo abaixamento de energia.	9,4
... com abaixamento de energia (idéia geral de ligação química)	18,8
Reconhece que a estabilidade do NaCl é devida à formação de octetos de valência e...	
... aponta esse fator como sendo o responsável pelo abaixamento de energia.	31,2
... não relaciona com o abaixamento de energia.	18,8
Vago	9,4

No pós-teste 2, investigamos novamente como os alunos relacionavam a estabilidade de um composto com questões energéticas (questão 4 – Anexo). No quadro 2 a análise da questão é apresentada:

Um percentual mais elevado de respostas coerentes foi observado nesse caso, pois 59,4% dos alunos relacionaram corretamente a causa da liberação de energia na formação do NaCl. Correlacionando com o pós-teste 1, verificamos que dos 8 alunos que haviam apresentado idéias dos dois modelos anteriormente (25% da turma), no pós-teste 2, apenas 2 (6,25%) mantiveram idéias baseadas na regra do octeto. Atribuímos isso a dois fatores. O primeiro relaciona-se ao incentivo dado pela professora aos alunos para que justificassem suas idéias de forma coerente nas atividades de modelagem e na discussão do pós-teste 1, quando relacionamentos coerentes quanto à natureza dessa questão foram fornecidos pela professora, que também chamou atenção sobre o uso de regras sem reflexão crítica a respeito das mesmas. O segundo fator se relaciona ao fato de essa questão não deixar tão evidente aos alunos a influência do octeto na estabilização do NaCl, o que poderia ter uma influência menos significativa em suas análises.

Todos os alunos que apresentaram idéias coerentes nessa questão também utilizaram o modelo eletrostático coerentemente em questões que exigiam explicações para solubilidade de substância iônica, sendo, praticamente, os mesmos alunos que haviam tido bom desempenho no pós-teste 1.

### Conclusões e implicações

Os dados apresentados nesse artigo evidenciaram a importância dos conhecimentos prévios dos alunos aliados a novos dados fornecidos no contexto de ensino para construção e reformulação de modelos (Para mais detalhes, ver Parte I). A forma

**Quadro 2.** Análise da questão 4 do pós-teste2.

<i>Categorias</i>	<i>% de alunos</i>
Reconhece que o processo de formação do NaCl(s) ocorre com liberação de energia...	
...devido a estabilidade adquirida quando ligações fortes entre os íons são estabelecidas.	59,4
...devido ao $\Delta H$ de cada etapa e do processo global.	15,6
...devido a uma ligação estabelecida entre Na e Cl.	3,1
Reconhece que o processo de formação do NaCl(s) ocorre com absorção de energia...	
...para justificar a formação de uma substância mais estável.	9,4
...devido ao $\Delta H$ de cada etapa e do processo global.	9,4
Vago	3,1

como algumas idéias químicas foram discutidas no ensino por modelagem foi essencial para o desenvolvimento de conceitos adequados sobre ligação iônica por boa parte dos alunos pesquisados. Destacamos quais foram essas idéias e a forma como foram abordadas no processo de ensino:

- O relacionamento envolvendo energia e estabilidade. Inicialmente, isto foi abordado a partir de experimentos empíricos que forneceram evidências para condução de experimentos mentais que exigiam relacionamentos entre a energia envolvida no estabelecimento de ligações químicas e a estabilidade das substâncias formadas. Posteriormente, essa relação foi retomada na Atividade 2, ao se discutir sobre formação de íons mais estáveis; na Atividade 3, ao exigir uma justificativa para o modelo proposto para o cloreto de sódio; na Atividade 5, na análise dos dados empíricos relativos a energia liberada na formação de pares iônicos ou de uma rede de íons; e na Atividade 7, ao se efetuar o cálculo da energia de rede do NaCl e interpretá-lo. Portanto, parece que discutir esse aspecto em vários momentos da estratégia de ensino foi essencial para que os alunos tivessem várias oportunidades para compreendê-lo, não relacionassem estabilidade apenas ao octeto e para que entendessem ligação química de uma forma mais ampla.
- Energia de ionização e afinidade eletrônica, propriedades imprescindíveis para se compreender a formação de íons, não restringindo a explicação à transferência de elétrons e a completar a camada de valência, idéias que são comumente empregadas no ensino tradicional. Sendo assim, o processo de ensino não relacionou a ligação iônica com transferência de elétrons do metal para o ametal, o que contribuiu para que boa parte dos alunos não desenvolvesse a concepção alternativa 'ligação iônica como doação de elétrons'.
- Força coulombiana, conhecimento empregado na elaboração dos modelos e no desenvolvimento de uma compreensão qualitativa sobre a lei de Coulomb, como instrumento para entendimento do modelo eletrostático. A discussão desse modelo foi fundamental para que os alunos pudessem perceber que suas idéias anteriores, expressas no mo-

delo molecular, eram limitadas, não explicando propriedades importantes do NaCl, como a temperatura de fusão e as variações energéticas envolvidas em sua formação.

A estratégia de ensino por modelagem favoreceu a boa parte dos estudantes um entendimento qualitativo do modelo eletrostático de acordo com os três aspectos básicos para compreensão de um tipo de ligação química enfatizados por Mcwenny (1979): (i) mecanismo da ligação; (ii) número de ligações e estequiometria e (iii) estrutura dos compostos. O entendimento do mecanismo da ligação ocorreu através da discussão da variação energética envolvida na formação do cloreto de sódio (Atividade 1, de forma geral, e Atividades 5, de forma específica). Quanto ao segundo e terceiro aspectos – número de ligações e estequiometria e estrutura – eles foram discutidos nas proposições dos modelos concretos, principalmente, nas Atividades 3 e 5, na proposição do modelo consensual da turma e nas aulas de fechamento. Acreditamos que a priorização desses aspectos na estratégia favoreceu o entendimento das propriedades dos compostos iônicos por parte dos alunos como verificado nas avaliações.

Por outro lado, pudemos perceber como o ensino anterior de ligação iônica (ao qual apenas alguns alunos haviam sido submetidos, em outras escolas) influenciou na proposição de modelos na Atividade 3, no qual tais alunos construíram modelos 'NaCl molécula' para justificar a estequiometria 1:1 e a transferência de elétrons, mesmo apresentando conhecimentos de lei de Coulomb. Essas duas justificativas eram idéias que estavam fortemente arraigadas na estrutura cognitiva desses alunos, sendo que alguns continuaram utilizando as mesmas nas avaliações. Com base nisso, é importante salientar aos professores de química que o ensino baseado em fórmulas e regras pode ser problemático para os alunos, pois eles passam a utilizar essas regras como dogmas inquestionáveis (Mortimer et al., 1994), ao invés de ter oportunidade de desenvolver um raciocínio mais coerente em relação ao modelo científico. A partir dessas constatações, julgamos não ser pertinente discutir ligação iônica em outra etapa anterior de escolarização. Isso pode ser justificado pelo fato de não se discutir em detalhes com os alunos do ensino fundamental os pré-requisitos (modelo atômico de Bohr e as propriedades periódicas energia de ionização e afinidade eletrônica) necessários para o estudo do modelo eletrostático. Somente a partir do entendimento de como os íons são formados é que os alunos poderão entender o processo pelo qual a ligação ocorre (expresso sinteticamente no diagrama de Born-Haber – ver parte I). Como salientado na parte I, algumas simplificações podem ser feitas nas Atividades 1, 2 e 5 de forma a tornar a estratégia de ensino possível de ser aplicada a todos os alunos que tenham os pré-requisitos julgados básicos por nós.

Os resultados alcançados nessa intervenção também evidenciam a validade de se utilizar estratégias de modelagem no ensino, pois quando o aluno tem a oportunidade de construir e testar seus modelos, as informações apresentadas a ele podem fazer mais sentido, o que difere da situação em que o aluno

recebe o modelo pronto. Isso acarretou em uma aprendizagem mais significativa sobre o conteúdo, como comentado neste artigo. Obtivemos também indícios de como esse tipo de ensino acarretou em melhor compreensão dos alunos sobre o processo de desenvolvimento do conhecimento científico.

## Agradecimentos

Agradecemos ao CNPq pelo apoio financeiro na realização dessa pesquisa.

## Referências bibliográficas

- AAAS. *Science for All Americans - Project 2061*. Oxford University Press. New York and Oxford, 1990.
- Butts, B. and Smith, R. Chemistry students' understanding of the structure and properties of molecular and ionic compounds, *Research in Science Education*, **17**, 192-201, 1987.
- Clement, J. Model based learning as a key research area for science education, *International Journal of Science Education*, **22**(9), 1041-1053, 2000.
- Cohen, L., Manion, L. and Morrison, K. *Research Methods in Education* (5<sup>th</sup> ed.). RoutledgeFalmer. London and New York, 2000.
- Coll, R. K. and Treagust, D. Investigation of secondary school, undergraduate and graduate learner's mental models of ionic bond, *Journal of Research in Science Teaching*, **40**, 464-486, 2003.
- Ferreira, P. F. M. *Modelagem e suas Contribuições para o Ensino de Ciências: Uma análise no estudo de equilíbrio químico*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Educação da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.
- Gilbert, J. K., Boulter, C. J. and Elmer, R. Positioning Models in Science Education and in Design and Technology Education. In: J. K. Gilbert and C. J. Boulter (eds.), *Developing Models in Science Education*. Dordrecht: Kluwer, 2000, pp. 3-17.
- Justi, R. La Enseñanza de Ciencias Basada en la elaboración de modelos, *Enseñanza de Las Ciencias*, **24**, 173-194, 2006.
- Justi, R. and Gilbert, J. K. Modelling, teachers' views on the nature of modelling, implications for the education of modellers, *International Journal of Science Education*, **24**(4), 369-387, 2002.
- Justi, R. and Gilbert, J. K. Models and Modelling in Chemical Education. In: J. K. Gilbert, O. d. Jong, R. Justi, D. F. Treagust & J. H. v. Driel (eds.), *Chemical Education: Towards Research-based Practice*. Dordrecht: Kluwer, 2003, pp. 47-68.
- McWenny, R. *Coulson's valence*. Oxford University. London, 1979.
- Mendonça, P.C.C. and Justi, R. Favorecendo o aprendizado do modelo eletrostático: Análise de um processo de ensino de ligação iônica fundamentado em modelagem - Parte I, *Educac. quim.*, **20**, núm especial, 282-293, 2009.
- Mortimer, E. F., Mol, G. and Paes, L. D. Regra do octeto e teoria da ligação química no ensino médio: dogma ou ciência?, *Química Nova na Escola*, **17**, 243-252, 1994.
- Taber, K. S. Misunderstanding the ionic bond, *Education in Chemistry*, **31**, 100-103, 1994.
- Taber, K. S. Student understanding of ionic bonding: molecular versus electrostatic framework?, *School Science Review*, **78**, 85-95, 1997.
- Taber, K. S. Trainee Science Teachers' Conceptions of Chemical

## Anexos

### Pós-teste 1 (Questões relacionadas à ligação iônica)

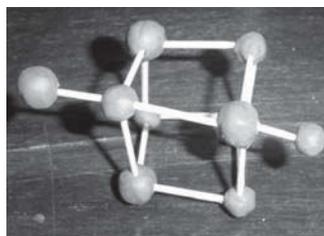
1. Considere o quadro contendo os valores temperatura de fusão de algumas substâncias:

Substância	TF(K)	Substância	TF (K)
HCl	159,2	CaO	2845
CaF <sub>2</sub>	1691	Br <sub>2</sub>	265,7
C(grafite)	3773	H <sub>2</sub> O	273
C(diamante)	4096	LiCl	823

Levando-se em consideração esses dados e seus conhecimentos:

- Agrupe** as substâncias que apresentam comportamento semelhante e justifique a escolha.
- Escolha** uma substância de cada grupo que você formou na questão anterior e represente uma modelo para cada uma delas evidenciando, em nível submicro, as partículas antes e após a fusão. Coloque legenda em seu desenho.
- Explique** porque a temperatura de fusão da substância óxido de cálcio, CaO, é muito maior do que a da substância cloreto de lítio, LiCl.

2. Considere os dois modelos:<sup>9</sup>

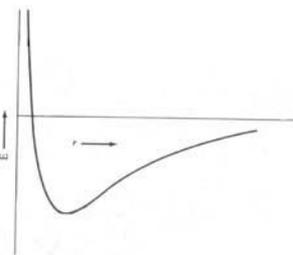


**Indique e justifique** qual desses modelos seria o mais adequado para explicar as ligações e duas propriedades físicas de:

- uma substância molecular.
  - uma substância iônica.
4. Considere a seguinte sentença: "o que estabiliza o cloreto de sódio é a formação de octetos de elétrons de valência nos íons cloreto e sódio". Analisando os valores da tabela e o gráfico de energia potencial em função da distância internuclear, **discuta** sobre o conteúdo dessa sentença.

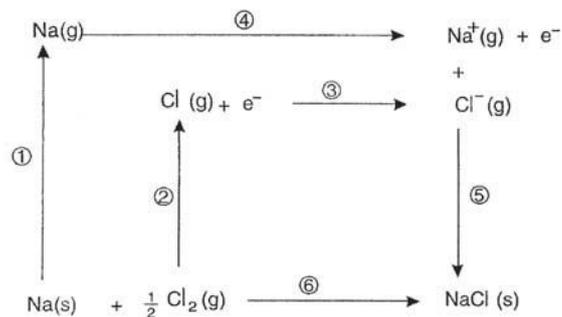
**Tabela 1.** Energia envolvidas na formação do NaCl(s).

Etapa	Equação Representativa	Varição energética (kJ/mol)
1. Energia de sublimação	$\text{Na(s)} \rightarrow \text{Na(g)}$	+108
2. Energia de ionização	$\text{Na(g)} \rightarrow \text{Na}^+(\text{g}) + \text{e}^-$	+496
3. Energia de atomização	$\frac{1}{2} \text{Cl}_2(\text{g}) \rightarrow \text{Cl}(\text{g})$	+121
4. Afinidade eletrônica	$\text{Cl}(\text{g}) + \text{e}^- \rightarrow \text{Cl}^-(\text{g})$ $\Delta H_{\text{ae}} = -348 \text{ kJ}$	-348
5. Formação do retículo	$\text{Na}^+(\text{g}) + \text{Cl}^-(\text{g}) \rightarrow \text{NaCl(s)}$	-788
Processo global	$\text{Na(s)} + \frac{1}{2} \text{Cl}_2(\text{g}) \rightarrow \text{NaCl(s)}$	-411



### Pós-teste 2 (Questão relacionada à ligação iônica)

4. Considere a formação do cloreto de sódio sólido, a partir das substâncias elementares sódio e cloro, através de uma série de etapas.



- Entre as etapas 1 a 5, identifique quais ocorrem com liberação ou absorção de energia. Explique seu raciocínio.
- Levando em consideração as etapas do processo de formação do NaCl(s) e a estabilidade desse composto, indique se o processo global (6) ocorre com liberação ou absorção de energia. Justifique sua indicação.

<sup>9</sup> Modelos elaborados pelos alunos durante as atividades. Esta informação não foi fornecida aos alunos no teste.