

## A QUANTIDADE DE MATÉRIA NAS CIÊNCIAS CLÁSSICAS

Alessandro Ranulfo Lima Nery e Adalberto Bono Maurizio Sacchi Bassi\*

Instituto de Química, Universidade Estadual de Campinas, CP 6154, 13084-862 Campinas - SP, Brasil

Recebido em 7/8/08; aceito em 3/4/09; publicado na web em 10/8/09

THE CHEMICAL AMOUNT IN CLASSICAL SCIENCES. The chemical amount values vary in a discrete or continuous form, depending on the approach used to describe the system. In classical sciences, the chemical amount is a property of the macroscopic system and, like any other property of the system, it varies continuously. This is neither inconsistent with the concept of indivisible particles forming the system, nor a mere approximation, but it is a sound concept which enables the use of differential calculus, for instance, in chemical thermodynamics. It is shown that the fundamental laws of chemistry are absolutely compatible to the continuous concept of the chemical amount.

Keywords: chemical amount; discrete and continuous media; thermodynamics.

## INTRODUÇÃO

Após ser experimentalmente evidenciado que a matéria é descontínua, sendo formada por partículas que, a menos que se percama as características físicas e químicas da amostra sob análise, são indivisíveis, desapareceu a histórica dúvida sobre a estrutura da matéria. Mas, dependendo da opção para o seu estudo, demonstra-se experimentalmente que a matéria pode ser tratada como contínua (como, por exemplo, ocorre na mecânica e na termodinâmica clássicas), o que significa que a sua densidade seria positiva em todos os pontos geométricos da amostra, variaria de modo contínuo de um ponto para outro<sup>1</sup> e a amostra poderia ser infinitamente dividida, sem perder as suas características. A questão passou a ser, então, porque as teorias clássicas, que consideram contínuo o meio material, conseguem descrevê-lo tão bem no enfoque macroscópico, não obstante esta incorreção.

Um conjunto de valores discretos pode ser finito (como, por exemplo, 4, 6, 8, 12, 20, que é o conjunto dos números de faces dos cinco poliedros regulares) ou infinito (como, por exemplo, o conjunto dos números inteiros positivos e o conjunto dos níveis de energia eletrônica de um átomo). Em ambos os casos, os elementos do conjunto são enumeráveis ou contáveis, porque valores discretos são contáveis.<sup>2</sup> Já valores contínuos são mensuráveis, o que quer dizer que são comparáveis a um padrão.

A massa de uma amostra de substância pura é proporcional à quantidade de matéria nesta amostra, sendo a constante de proporcionalidade dada pela massa molar. Isto indica que, de acordo com o enfoque adotado, ou ambas as propriedades variam de modo discreto, ou ambas variam de modo contínuo. Porém, sabe-se que em toda amostra (macroscópica ou não) de qualquer material existe um número inteiro de partículas e que, no caso de uma substância pura, os valores da quantidade de matéria e da massa, na amostra, são proporcionais a este número (as constantes de proporcionalidade são dadas, respectivamente, pelo inverso da constante de Avogadro e pelo produto deste inverso pela massa molar). Isto, *aparentemente*, nega a possibilidade de variação contínua dos valores da quantidade de matéria e da massa.

Considerar que a variação contínua é uma aproximação, aceitável devido ao enorme número de partículas existente em amostras macroscópicas, é numericamente correto, porque o erro envolvido é, *quantitativamente*, de fato desprezível. Além disto, considerar que se trate *somente* de uma aproximação é coerente com a citada negação aparente da possibilidade de variação contínua. Porém, considerar que se trate apenas de uma aproximação é conceitualmente errado, porque,

nas teorias clássicas, o cálculo integral e diferencial é aplicado à quantidade de matéria e à massa. Este instrumento matemático baseia-se em diferenças infinitesimais, portanto as teorias clássicas consideram diferenças infinitesimais de quantidade de matéria e de massa, as quais são *qualitativamente* distintas (porque envolvem o conceito matemático de limite) de qualquer diferença finita, por menor que esta seja.<sup>3</sup>

Em amostras macroscópicas, por causa da mencionada indistinguidibilidade numérica entre as variações discreta e contínua da quantidade de matéria e, também, da massa, pode parecer desnecessário propor o estudo, sob enfoque estritamente conceitual, da coerência entre teorias que suponham estes dois tipos distintos de variação. Mas, analogamente, sabe-se que uma soma de áreas de retângulos adjacentes entre si, cujas bases inferiores estejam sobre o eixo  $x$  e que apresentem pelo menos um dos pontos das respectivas bases superiores sobre uma curva traçada no plano  $x$ - $y$ , se aproxima do valor da área entre a curva e o eixo  $x$ , ao passo que diminuir a largura dos retângulos e aumentar o número deles.

Logo, sempre haverá somas, para um número finito de retângulos, numericamente indistinguíveis da área sob a curva, embora nenhuma de tais somas seja conceitualmente igual à área sob a curva (diferença qualitativa). Seria supérfluo, então, estudar o embasamento lógico-matemático do conceito de integral, bastando apenas pensar numa soma de áreas de retângulos? Somente se for positiva a resposta a esta pergunta poderá, também, ser considerado desnecessário o estudo conceitual proposto, porque a analogia é rigorosa.

Aliás, foi precisamente para demonstrar a coerência estritamente conceitual entre teorias (para o mundo microscópico) que pressupõem a variação discreta e outras (para o mundo macroscópico) que consideram a variação contínua de uma mesma grandeza, que Boltzmann<sup>4</sup> e Gibbs<sup>5</sup> criaram a mecânica estatística. Um dos seus resultados mais conhecidos é a Equação de Boltzmann, que relaciona os níveis discretos de energia das partículas com a temperatura (proporcional à energia interna molar) contínua (*não* aproximadamente contínua) do sistema. A mecânica estatística propõe um modelo estrutural da matéria, no enfoque macroscópico, que corresponde ao conceito matemático de limite adotado pelo cálculo diferencial e integral.<sup>4,5</sup> É por causa deste modelo que, por exemplo, de acordo com esta ciência a probabilidade de ocorrência de um determinado estado da partícula coincide com a fração de partículas naquele estado, num sistema macroscópico formado por partículas idênticas entre si.

Considerando que, frequentemente, num curso de química o aluno não recebe aulas de mecânica estatística, ou só as recebe ao final do curso, a proposta deste trabalho é, sem envolver mecânica estatística, apresentar o citado modelo, mostrar que ele é compatível com as leis fundamentais

\*e-mail: [bassi@iqm.unicamp.br](mailto:bassi@iqm.unicamp.br)

da química e comentar o conceito de quantidade de matéria. O aluno poderia, então, antes de iniciar o estudo da termodinâmica clássica, saber que o modelo material que esta teoria pressupõe não é aquele que ele apreendeu em química geral, mas sim uma conciliação das leis da química com as do cálculo diferencial e integral.

## MODELOS PARA MEIOS CONTÍNUO E DESCONTÍNUO

Seja um sistema macroscópico formado por  $a$  partículas cúbicas indivisíveis idênticas, adjacentes nas seis faces (imagine, por exemplo, um cubo formado por  $a$  cubinhos adjacentes, sendo  $\sqrt[3]{a}$  um inteiro). A massa  $M$  de uma amostra com  $N$  partículas (cubinhos), sendo  $N$  um inteiro da ordem do valor numérico da constante de Avogadro, será dada por  $M = N.m$ , onde  $m$  é a massa de cada partícula. Logo, qualquer variação de massa da amostra será dada por  $\Delta M = \Delta N.m$ , onde  $\Delta N$  é um inteiro igual à variação na quantidade de partículas na amostra. O volume da amostra será dado por  $V = N.v$ , onde  $v$  é o volume de cada partícula, sendo qualquer variação de volume dada por  $\Delta V = \Delta N.v$ . Esta amostra será denominada Modelo I.

O Modelo I é inadequado para representar qualquer amostra material porque, mesmo admitindo que cada partícula pudesse ser considerada um cubinho de volume igual ao volume da partícula, não existe material cristalino ou vítreo no qual mais do que 78% do volume total esteja ocupado por partículas<sup>6,7</sup> (no caso, 100% do volume total estaria ocupado). A utilidade do Modelo I é apenas didática, já que ele pode ser tomado como exemplo para uma amostra *macroscópica* na qual nem a massa, nem o volume, possam variar de forma contínua, o que, também, não acontece na natureza em que vivemos.

Mas suponha que, sem alteração na massa  $M$  da amostra, no seu volume  $V$  e no número  $N$  de partículas nela presentes, aumente a densidade de cada uma das partículas, por meio da diminuição do seu volume  $v$  com a conservação da sua massa  $m$ . Se o volume da amostra  $V$  tivesse sido aumentado e o volume de cada cubinho  $v$  tivesse sido mantido, seria como se a amostra tivesse explodido, separando os cubinhos, mas mantendo a integridade dos mesmos. Considerando que, na verdade,  $V$  foi mantido e  $v$  foi diminuído, é como se a imagem explodida fosse contraída até chegar ao volume original da amostra. Após este processo, a amostra passará a ser chamada de Modelo II. Neste modelo, evidentemente ainda se tem  $M = N.m$  e  $\Delta M = \Delta N.m$ , mas  $V > N.v$ , porque agora existe, na amostra, um espaço vazio de volume igual a  $V - N.v$ . Além disto,  $|\Delta V| > |\Delta N|v$ , porque variações no volume da amostra podem incluir quantidades variáveis de espaço vazio.

Considere que uma superfície *imaginária* separe a amostra da parte restante do sistema, cuja estrutura seja a *mesma* daquela da amostra (Modelo II). Suponha, portanto, a existência de um invólucro fechado contendo, além de espaço vazio,  $N$  cubinhos, dentre o total de  $a$  cubinhos que o sistema contém, sendo  $N$  um inteiro da ordem do valor numérico da constante de Avogadro. Imponha que, do lado externo da superfície, o volume de espaço vazio a ela adjacente seja, no mínimo, igual a  $v$  e que, ao se esticar e deformar, a superfície possa adicionar à amostra qualquer porção do mencionado espaço vazio, inclusive o inteiro espaço vazio a ela adjacente. Suponha que seja acrescentado, de modo temporalmente contínuo (ou seja, sem que, em qualquer instante, ocorra um acréscimo finito de volume), um espaço vazio no mínimo igual a  $v$ .

Em seguida, considere que seja adicionada à amostra qualquer partícula adjacente à superfície, do seu lado externo (se não houver tal partícula no instante inicial, a superfície se esticará e deformará, no mínimo, até que isto ocorra). Mas, nesta última adição, um volume finito  $v$  seria acrescido à amostra, em determinado instante. Como todo aumento de volume deve ocorrer de modo temporalmente contínuo, considere que a superfície, simultaneamente, devolva ao exterior um volume de espaço vazio  $v$ , fazendo com que a absorção da partícula não altere o volume da amostra.

Pela repetição deste mecanismo, ou seja, pela absorção contínua de um espaço vazio de volume mínimo  $v$ , seguida de devolução de espaço vazio de volume  $v$  concomitante à absorção de uma partícula, seguida de nova absorção contínua de um espaço vazio de volume mínimo  $v$  etc., torna-se evidente que, existindo um espaço vazio de volume mínimo  $v$ , externamente adjacente à superfície imaginária que delimita a amostra, o volume desta *pode* aumentar de maneira contínua (analogamente para a diminuição do volume da amostra). Se a distância média entre os cubos fosse da ordem de vinte arestas de um cubo, no que se refere apenas a esta proporção o Modelo II representaria, aproximadamente, um gás nas condições ambientais. Aumentando a proporção de volume vazio em relação ao volume total, ter-se-ia um gás mais rarefeito, enquanto que diminuindo tal proporção ter-se-ia um gás menos rarefeito, um líquido ou um sólido.

Logo, considerando o já citado limite máximo de 78% para o volume ocupado por partículas, o Modelo II será uma representação grosseira da matéria real sempre que, para cada três partículas, no mínimo o volume de aproximadamente uma seja mantido vazio. Como consequência, o volume de qualquer amostra *macroscópica* real apresenta uma probabilidade tão alta de mudar de modo contínuo, que a alteração contínua do volume é uma lei do mundo macroscópico estatisticamente explicada de maneira análoga a tantas outras leis macroscópicas. Tal probabilidade é tão alta porque o volume vazio, de cada lado da superfície que separa a amostra do resto do sistema real, é da ordem do produto do valor numérico da constante de Avogadro, elevado a dois terços, pelo volume  $v$ , enquanto que, conforme mostrado, bastaria que houvesse um volume vazio igual a  $v$  para que a variação pudesse ser contínua.

Porém, no Modelo II a massa não se pode modificar de modo contínuo, como também acontece na matéria real. Para que o volume e a massa mudem, *ambos*, continuamente, faz-se necessário evoluir para o Modelo III. Para alcançar o Modelo III suponha que, a partir do Modelo II, tanto  $m$  como  $v$  diminuam na mesma proporção do aumento de  $N$ , de modo a que não se alterem os produtos  $N.m$  e  $N.v$ . Por exemplo, se o número de partículas dobrar, tanto a massa como o volume de cada partícula passará a ser a metade do correspondente valor inicial. Isto indica que não se modifica a massa da amostra,  $M = N.m$  e, impondo que o volume  $V$  da amostra também não mude, o mesmo ocorrerá com o seu volume de espaço vazio,  $V - N.v$ . Suponha que este processo continue infinitamente, por exemplo, passando  $v$  e  $m$  sempre a ser a metade dos seus respectivos valores anteriores, enquanto que  $N$  dobre. *No limite matemático*, em que  $N$  tende para infinito enquanto que  $v$  e  $m$  tendem para zero, ter-se-á o Modelo III.

Durante o processo de diminuir massa e volume das partículas, aumentando o número delas na mesma proporção, passa-se seguidamente por modelos quantitativamente diferentes, mas qualitativamente iguais entre si, porque todos eles correspondem ao Modelo II. Mas, ao se extrapolar para o limite matemático no qual  $N$  tende para infinito enquanto que  $v$  e  $m$  tendem para zero, a modificação passa a ser qualitativa, ou seja, atinge-se o Modelo III. De acordo com o segundo parágrafo da Introdução, este modelo contém um conjunto contável de infinitas partículas, cada uma delas com massa e volume nulos. Logo, no Modelo III as partículas são pontos matemáticos. Note que estes pontos matemáticos mantêm a característica de indivisibilidade, a qual não foi afetada ao se passar do Modelo I para o Modelo II e, deste, para o Modelo III.

Ressalte-se que, embora o volume ocupado por cada partícula seja nulo, a soma dos volumes de todas as infinitas partículas é bem definida, porque o produto  $N.v$  não se alterou no processo de passagem do Modelo II para o Modelo III. Analogamente, embora a massa de cada partícula seja nula no Modelo III, a soma das massas de todas as infinitas partículas é bem definida e igual a  $M$ , que é o valor da massa da amostra. No Modelo III, tanto  $M$  como  $V$  variam continuamente, porque a adição ou subtração de uma única partícula, ou mesmo de qualquer número finito delas (por maior que seja a enormidade de tal número), não modifica

nem  $M$ , nem  $V$ , já que  $m = 0$  e  $v = 0$  (alterações em  $M$  e  $V$  decorrem de adições ou subtrações de infinitas partículas, sendo o conceito de infinito qualitativamente diferente do conceito de número finito).

O Modelo III não representa a matéria, nem sequer grosseiramente, assim como também acontece com o Modelo I. Mas a extrapolação que leva ao Modelo III é necessária para que o cálculo diferencial e integral possa ser utilizado, nas teorias clássicas, para a obtenção de valores de massas e quantidades de matéria de amostras macroscópicas do sistema. Por outro lado, demonstra-se que, em tais teorias, este uso do cálculo diferencial e integral produz resultados experimentalmente corretos. Evidentemente, tal confirmação experimental de resultados ocorre porque, a partir de valores suficientemente diminutos da massa e do volume, as medidas macroscópicas não mais têm a precisão necessária para numericamente distinguir os Modelos II e III, embora eles sejam qualitativamente diferentes.

Por exemplo, é experimentalmente confirmado o resultado da integração da equação diferencial  $dM = \rho dV$ , onde  $\rho = dM/dV$ , equação esta última que exige a continuidade da massa proporcionada Modelo III, mas não pelo Modelo II. Aliás, o modo como foi construído o Modelo III, a partir do Modelo II, também permite que  $\rho = dM/dV$  seja positivo e varie espacialmente de forma contínua, conforme exigido para que um meio seja considerado contínuo.<sup>1</sup> Mas, embora  $\rho$ , assim como qualquer outra propriedade intensiva, não seja definida no Modelo II, a densidade média da amostra é igual nos Modelos II e III, porque  $\bar{\rho} = M/V$ , onde tanto  $M$  quanto  $V$  não se alteram ao passar do Modelo II para o III.

Note que, numa amostra homogênea,  $\rho = \bar{\rho}$ , o que permite definir  $\rho$  no Modelo II, analogamente ocorrendo com toda propriedade intensiva. Esta é a única razão porque, na termodinâmica clássica (restrita a amostras com um só meio homogêneo, ou com meios homogêneos em equilíbrio de fases), as propriedades intensivas podem ser definidas sem a necessidade de referência ao modelo III (a termodinâmica dos meios contínuos<sup>1</sup> exige o Modelo III para definir as propriedades intensivas). Este fato merece ser lembrado sempre que, conforme mencionado na Introdução, parecer desnecessário estudar, sob enfoque estritamente conceitual, a coerência entre teorias que suponham variações discretas e outras que considerem variações contínuas da massa e da quantidade de matéria.

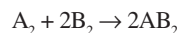
## LEIS PONDERAIS E CONTINUIDADE

Pretende-se, agora, mostrar que as leis em que se fundamenta a química permitem a passagem do Modelo II para o Modelo III. Para isto, inicialmente as próprias leis fundamentais serão comentadas. São elas as conhecidas leis de Lavoisier (para uma reação química que ocorre em um sistema fechado, a massa dos produtos é igual à soma das massas dos reagentes),<sup>8-10</sup> Proust (um dado composto contém seus elementos constituintes em uma dada proporção),<sup>8,9,11</sup> Gay-Lussac (numa reação de elementos no estado gasoso, os volumes dos reagentes e dos produtos, nas mesmas condições de pressão e temperatura, estão entre si como pequenos números inteiros)<sup>8,9,12</sup> e Avogadro (volumes iguais de todos os gases, nas mesmas condições físicas, contêm o mesmo número de moléculas).<sup>8,9,13</sup>

Avogadro partiu das observações de Gay-Lussac, mas considerou que as moléculas, no estado gasoso, em média estão distantes o suficiente para que as forças de interação entre elas sejam desprezadas. Portanto, nas mesmas condições de temperatura e pressão, a distância média entre as moléculas seria a mesma para qualquer gás, logo o volume só dependeria da quantidade de moléculas. Tanto para a lei de Avogadro, quanto para a teoria atômica de Dalton,<sup>8,9</sup> é uma premissa a matéria ser descontínua e formada por partículas indivisíveis. Porém, na teoria atômica de Dalton a premissa é o átomo, sendo o composto formado pela combinação de átomos de elementos diferentes, numa proporção de números inteiros (para o composto, Dalton não utiliza o termo molécula). Avogadro in-

troduz o conceito de molécula, podendo esta ser formada por átomos do mesmo elemento ou de elementos diferentes, sempre numa proporção de números inteiros.

As leis de Lavoisier, Proust e Gay-Lussac não exigem o conhecimento das estruturas das substâncias, logo não exigem que a matéria seja descontínua e formada por moléculas indivisíveis, com uma proporção bem definida de átomos. Por exemplo, considere que duas substâncias simples  $A_2$  e  $B_2$ , com massas moleculares respectivamente nos valores de 10 e 30 u, reajam de acordo com a equação química:



Para verificar a validade das três leis para esta reação, basta apenas notar que a equação química mostra que 1 g de  $A_2$  reage com 6 g de  $B_2$  formando 7 g do composto (no caso da proporção em volume, 1 L de  $A_2$  reage com 2 L de  $B_2$  formando 2 L do composto  $AB_2$ ).

Porém, a lei de Avogadro parte da premissa de que a matéria é constituída de moléculas e, portanto, que a matéria, além de ser descontínua, contém átomos que se agrupam em moléculas. Para a mesma reação e substâncias do exemplo, considere que estas sejam conjuntos de átomos, os quais não se agrupem em moléculas. Logo, suponha que as substâncias simples tenham apenas átomos de A ou de B, enquanto que o composto seja constituído por átomos de A e B, na proporção de dois átomos de B para cada átomo de A. Para reagentes e produtos nas mesmas condições de pressão e temperatura, a lei de Avogadro não seria observada se, no seu enunciado, a palavra “moléculas” fosse substituída por “átomos”, uma vez que a proporção atômica é 1:2:3, enquanto que a proporção volumétrica é 1:2:2. Mas as leis de Lavoisier, Proust, Gay-Lussac e Avogadro serão obedecidas se o conceito de molécula for usado.

O método de determinação das massas atômicas de Cannizzaro<sup>8,14</sup> é fundamentado na idéia de que a molécula precisa conter um número inteiro de átomos de cada elemento que a constitui. Assim, a massa molecular deve ser a soma de múltiplos inteiros das massas atômicas dos elementos que formam a substância. Partindo da lei de Avogadro, considerando que a massa molecular do gás hidrogênio seja  $2u$  e conhecendo a composição em massa de várias substâncias, Cannizzaro fez uma série de medidas e obteve as massas moleculares relativas para uma quantidade de compostos gasosos. Por exemplo, para compostos oxigenados foram determinadas massas relativas de oxigênio, obtendo-se, entre outros, os seguintes valores:

Composto	Massa molecular em relação ao $H_2$	Massa relativa de oxigênio
Água	18	16
Monóxido de nitrogênio	30	16
Monóxido de dinitrogênio	44	16
Dióxido de carbono	44	32
Dióxido de enxofre	64	32
Oxigênio	32	32
Ozônio	48	48

Todos os valores obtidos para a massa relativa de oxigênio são múltiplos de 16 e, como a premissa é que na molécula existem números inteiros de átomos, a massa atômica do oxigênio só pode ser 16 (em nenhum composto oxigenado a massa relativa de oxigênio é, apenas, múltiplo de 2, 4 ou 8).

No método de Cannizzaro, assim como na comprovação das leis de Lavoisier, Proust, Gay-Lussac e Avogadro, todos os valores são

calculados a partir de observações macroscópicas, especialmente observações de massas e volumes. Ao se fazer, conforme proposto na seção anterior, com que  $m$  e  $v$  diminuam na mesma proporção do aumento de  $N$ , pode permanecer inalterada a validade das quatro leis e do método de Cannizzaro, tanto em relação ao aumento finito de  $N$  quanto em relação à sua extrapolação para infinitas moléculas, cada uma delas com massa e volume nulos. A anterior apresentação claramente indica que isto ocorrerá sempre que, ao se passar do Modelo II para o Modelo III, forem mantidas as proporções entre os números de moléculas de todas as espécies químicas presentes.

## QUANTIDADE DE MATÉRIA

De acordo com o Sistema Internacional de Unidades<sup>15</sup> (SI) “o mol é a quantidade de matéria de um sistema que contenha tantas entidades elementares quantos sejam os átomos em 0,012 kg de carbono 12; seu símbolo é ‘mol’. Quando o mol é usado, as entidades elementares devem ser especificadas e podem ser átomos, moléculas, íons, elétrons, outras partículas, ou grupos especificados de tais partículas”. Nesta definição, são referidos átomos não ligados de carbono 12, em repouso e no seu estado fundamental. Como consequência, a massa molar do isótopo 12 de carbono é exatamente 0,012 kg/mol. Esta definição também determina o valor da constante de Avogadro,  $N_A$  ou  $L$ . Se  $N(X)$  denotar o número de entidades  $X$  na amostra e  $n(X)$  indicar a quantidade de matéria de entidades  $X$  na mesma amostra, tem-se  $n(X) = N(X) / N_A$ , onde  $N_A = 6,022.141.79 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ , cuja incerteza padrão é  $0,000.000.30 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ .

De acordo com o Modelo II, evidentemente o valor numérico de  $N_A$  é um inteiro contável, mesmo que tal contagem seja apenas hipotética. Em qualquer teoria clássica, além do enfoque macroscópico da matéria ser coerente com o Modelo III, não com o Modelo II, o conhecimento do valor numérico da constante de Avogadro não é exigido. Aliás, elas nem sequer exigem que se saiba se o valor numérico de tal constante é, ou não, um real. De fato, considerar  $N_A \rightarrow \infty$ , o que permite impor  $N(X) \rightarrow \infty$  mantendo-se  $n(X) = N(X)/N_A$  finito e bem determinado, é uma característica de tais teorias, em especial da termodinâmica. Tal característica indica que  $n(X)$  é um valor contínuo mensurável (não contável, veja a Introdução), decorrente da comparação entre a amostra (que apresenta  $N(X) \rightarrow \infty$  partículas) e um padrão (que apresenta  $N_A \rightarrow \infty$  partículas).

Em outras palavras, assim como 1 kg pode ser associado à massa de um objeto, independentemente da estrutura microscópica interna de tal objeto referencial, um mol pode ser associado à quantidade de matéria do objeto referencial 0,012 kg de carbono 12, independentemente da estrutura microscópica interna deste último objeto. Esta interpretação, tanto quanto a definição oficial de mol, também padroniza a massa molar do isótopo 12 de carbono em 0,012 kg/mol. Padronizada a massa molar do isótopo 12 de carbono, pelo método de Cannizzaro (que, conforme mostrado na seção anterior, é válido também para o Modelo III) obtêm-se as massas molares de todas as substâncias simples e de todos os compostos. Dividindo-se a massa de uma amostra de substância pura, massa esta considerada uma grandeza de variação contínua, pela massa molar desta substância, obtém-se a quantidade de matéria, também considerada uma grandeza de variação contínua.

Tem-se, assim, o conceito de quantidade de matéria, no Modelo III.<sup>16</sup> É claro que a definição oficial de mol se refere à realidade material, que não é representável pelo Modelo III. Finalmente, cabe ressaltar que o nome *quantidade de substância* é um anglicanismo proveniente de *amount of substance*. O nome *quantidade de matéria*, equivalente à expressão francesa *quantité de matière*, é o correto para o português falado no Brasil.

## CONCLUSÃO

No enfoque macroscópico, o comportamento do todo é extrapolado para regiões microscópicas nas quais, na verdade, ele não é válido. Mas esta extrapolação se justifica porque, após integração, ela reproduz resultados experimentalmente comprovados para o todo. Os resultados são experimentalmente corretos porque a precisão experimental macroscópica se encontra enormemente distante de poder perceber a diferença entre zero e o valor numérico da massa, ou do volume, de uma partícula. As leis ponderais em que a química se baseia não excluem o enfoque contínuo, porque foram experimentalmente elaboradas tendo como base a massa, o volume e outras propriedades físicas e químicas macroscópicas dos participantes da reação.

Todo o instrumental matemático das ciências clássicas pressupõe que as propriedades extensivas do sistema variem de forma contínua, inclusive a quantidade de matéria. Por exemplo, o potencial químico do componente  $i$  do sistema pode ser dado por  $\mu_i = (\partial G / \partial n_i)_{T,P,n}$ , onde  $n = n_1, n_2, \dots = / n_i$ , o que indica que tanto a energia de Gibbs, quanto a quantidade de matéria, se alteram de forma contínua. Para o cálculo diferencial e integral, há uma diferença qualitativa entre tão pequeno quanto se queira (ou finito) e nulo (ou infinitesimal). Portanto, nas ciências clássicas a quantidade de matéria não é aproximadamente contínua, ela é *exatamente* contínua.

A termodinâmica clássica é restrita ao estudo de amostras com um único meio homogêneo, ou com meios homogêneos em equilíbrio de fases. Logo, em cada meio homogêneo as propriedades intensivas coincidem com seus respectivos valores médios. Somente por causa disto, nesta ciência é possível definir propriedades intensivas sem a *necessidade* de explicitar o modelo III, no qual se baseiam a mecânica estatística e a termodinâmica dos meios contínuos.

## REFERÊNCIAS

- Liu, I-S.; *Continuum Mechanics*, Springer: Berlin, 2002.
- Halmos, P. R.; *Naive Set Theory*, Van Nostrand: Princeton, 1960.
- Dedekind, R.; *Essays on the Theory of Numbers*, The Open Court: London, 1901.
- Boltzmann, L.; *Vorlesungen über Gastheorie I e II*, Barth: Leipzig, 1896 e 1898.
- Gibbs, J. W.; *Elementary Principles in Statistical Mechanics developed with especial reference to the rational foundations of thermodynamics*, Yale: New York, 1902.
- Rogers, C. A.; *Proc. London Math. Soc.* **1958**, 8, 609.
- Salsburg, Z. W.; Wood, W. W.; *J. Chem. Phys.* **1962**, 37, 798.
- Dickerson, R. E.; Gray, H. B.; Haight, G. P.; *Chemical Principles*, Benjamin: Los Angeles, 1972.
- Partington, J. R.; *A Short History of Chemistry*, Mac Millan: Londres, 1951.
- Lavoisier, A.; *Elements of chemistry*. Em *Greats Books*, Encyclopaedia Britannica: Chicago, 1952.
- Proust, J. L.; *Journal de Physique* **1806**, 63, 566.
- Gay-Lussac, J. L.; *Memoir on the Combination of Gaseous Substances with Each Other*. Em *Foundations of the Molecular Theory: Comprising Papers and Extracts by John Dalton, Joseph Louis Gay-Lussac, and Amadeo Avogadro*, (1808-1811), Alembic Club Reprints: Edinburgh, 1911.
- Avogadro, L. R. A. C.; *Journal de Physique* **1811**, 73, 58-76.
- Cannizzaro, S.; *Sketch of a course of Chemical Philosophy*, Alembic Club Reprints: Edinburgh, 1918.
- Bureau International des Poids et Mesures; *Le Système International d'Unités (SI)*, 8ª Ed., BIPM: Sèvres, 2006.
- <http://www.chemkeys.com/br/2005/09/24/quantidade-de-substancia>, acessada em Julho 2009.