
DISCUSSÃO CONCEITUAL PARA O EQUILÍBRIO TÉRMICO⁺*

José Lourenço Cindra
Odete Pacubi Baierl Teixeira
Departamento de Física e Química –UNESP
Guaratinguetá – SP

Resumo

Neste trabalho, pretendemos realizar uma análise conceitual envolvendo o equilíbrio térmico. Ainda que, no contexto do estudo da Termologia, tanto nos livros didáticos quanto no cotidiano escolar, os conceitos de calor e temperatura sejam priorizados, o equilíbrio térmico acaba sendo relegado a um segundo plano. Contudo, várias pesquisas têm apontado a importância de um melhor entendimento do equilíbrio térmico, que acabaria possibilitando a compreensão de uma série de outros conceitos que estariam ligados aos fenômenos térmicos. Destacamos alguns tópicos que julgamos relevantes com relação ao entendimento conceitual do equilíbrio térmico. Faremos considerações sobre o ponto de vista epistemológico, sobre a relação do equilíbrio térmico com os conceitos de calor e temperatura, sobre o desenvolvimento histórico das noções relacionadas ao calor, temperatura e equilíbrio térmico, sobre os obstáculos epistemológicos, e finalmente, salientamos algumas similaridades entre teorias e as concepções espontâneas relacionadas aos fenômenos térmicos.

Palavras-chave: *Ensino de Física, calor e temperatura, equilíbrio térmico.*

⁺ A conceptual discussion for the understanding of the thermal equilibrium

^{*} *Recebido: setembro de 2003.*
Aceito: fevereiro de 2004.

Abstract

In this article we intend to show a conceptual analysis concerning thermal equilibrium. Although the concepts of heat and temperature are generally discussed in textbooks and everyday school experiences about Thermology study, the thermal equilibrium itself is somewhat neglected, somewhat it is setted without a satisfactory consideration. Many researches show the importance of a better comprehension of the thermal equilibrium. This comprehension would give the understanding of several other concepts about thermal phenomena. On that account, in this study, we emphasize the importance of some topics which we consider relevant to the conceptual understanding of this matter. We shall consider the epistemological aspects of the question; the relation between thermal equilibrium and the concepts of heat and temperature; the historical development the notions concerning heat, temperature, and thermal equilibrium. Finally, we shall try to remark some similarities between various theories and the spontaneous conceptions concerning heat and temperature.

Keywords: *Physics teaching, heat and temperature, thermal equilibrium.*

I. Introdução

A palavra “calor” começa a fazer parte do vocabulário das crianças por volta dos 2 ou 3 anos de idade. Por meio da sensação tátil, uma criança discerne “objetos quentes”, “objetos frios”, “sente frio” ou “sente calor”, com esta idade. Assim, é de se esperar que, durante as tentativas de explicações de diferentes situações envolvendo fenômenos térmicos, apareçam justificativas ligadas àquelas “percebidas” ou “sentidas” no cotidiano dos sujeitos. São utilizadas justificativas ligadas à vida: “*sem calor não haveria vida, tudo morreria*”; a um efeito: “*pode queimar*”; a uma transformação: “*o gelo derrete*”; a uma percepção sensorial: “*arde a pele*”; e à necessidade de se estabelecer um suporte para que o calor seja conduzido: “*é parecido com fumaça*”. Essas características podem ser encontradas nas explicações envolvendo situações relacionadas aos fenômenos térmicos, parecendo estar implícita a necessidade de associação ligada às propriedades que os objetos possuem: “*metal é frio, madeira é quente*”, “*metal conduz o frio*”, “*o metal deixa o calor entrar e sair mais facilmente*”, “*farinha não esquenta muito*”, “*pregos podem se tornar quentes*”, “*farinha não ferve*”, “*ferro fica vermelho*”, “*lenha queima*”, “*cera de vela derrete*”, “*álcool evapora*” ou à ne-

cessidade de se estabelecer uma forma pela qual o calor vai se propagar: “*se está no fogo, vai esquentar, o fogo passa calor*”.

No que tange às explicações causais, as situações mecânicas se apresentam particularmente mais acessíveis às crianças (a manipulação, propriamente dita, e o controle visual acabam colaborando para isso, visto que existem relações diretas com as ações exercidas). O mesmo não acontece com as situações envolvendo os fenômenos térmicos, pois agora estão em jogo as sensações táteis e os efeitos provocados, e portanto as percepções manifestadas pelos sujeitos são realizadas através de regulações muito menos ativas e amplas do que aquelas onde estejam presentes situações envolvendo a causalidade mecânica (PIAGET; GARCIA, 1973).

Thomaz et al. (1995), realizando uma análise, em diferentes artigos, sobre as concepções dos alunos, oriundas de questões qualitativas, ressaltam as seguintes considerações:

- Crêem que o calor é uma espécie de substância contida nos objetos e que pode passar de um corpo para o outro – essa concepção é às vezes reforçada pelos livros-texto;

- Tendem a pensar que diferentes sensações significam diferentes temperaturas – o equilíbrio térmico garantido pelos professores e pelos livros-texto não é considerado pela maioria dos alunos;

- Entendem que a temperatura é uma propriedade do material do qual o corpo é constituído e é a medida do calor;

- Pensam que aquecer um corpo sempre significa aumentar sua temperatura – a temperatura de mudança de fase não é considerada como uma característica de uma substância pura;

- Interpretam a temperatura da mudança de fase como a temperatura máxima que a substância pode ter quando aquecida.

Os autores afirmam que o problema está no fato de os alunos necessitarem entender de forma correta o significado do equilíbrio térmico, portanto o equilíbrio térmico é o ponto-chave para o entendimento de outros conceitos. Da mesma forma, Laval (1985) aponta a ausência da noção de equilíbrio térmico como uma das causas para o não entendimento dos conceitos de calor e de temperatura.

Rozier e Viennot (1991) salientam que os alunos têm dificuldades em entender o significado do estado estacionário de um sistema, ou seja, entender o significado do equilíbrio térmico, do ponto de vista microscópico. Sabemos que, macroscopicamente, quando ocorre uma colisão inelástica, há transformação de energia mecânica em energia interna, o que inclusive causa aumento de temperatura dos corpos. Microscopicamente, o mesmo não acontece com as colisões entre as partículas das substâncias, ou seja, com o movimento térmico. As colisões envolvendo o movimento térmico devem ser consideradas elásticas, desta forma não contribuem para o aumento de temperatura. A energia cinética média desse

movimento representa a própria temperatura. Se essa energia permanece inalterada, temos uma situação de equilíbrio térmico ou seja, de temperatura constante. Segundo esses autores, os alunos não interpretam dessa forma o estado de equilíbrio térmico, pois entendem que as colisões internas entre as partículas do corpo, necessariamente, vêm acompanhadas de aquecimento do mesmo. Mas se assim fosse, ocorreria uma produção contínua de calor, o que violaria o próprio equilíbrio térmico, que estamos supondo existir.

Portanto, o entendimento adequado do equilíbrio térmico seria um dos aspectos mais relevantes para a compreensão dos conceitos de calor e temperatura.

II. Algumas considerações sobre o equilíbrio térmico e sua relação com os conceitos de calor e temperatura

Um aspecto importante que inicialmente salientamos é que, não raras vezes, a maneira como os livros didáticos tratam os conceitos relacionados aos fenômenos térmicos pode contribuir para um entendimento inadequado de vários conceitos específicos da física térmica. Isso porque, ao tratar de um conceito científico, outros poderão estar a ele envolvidos. Ao se fazer uma abordagem conceitual de calor, verificaremos que vários outros conceitos estarão implicados, tais como: temperatura, energia, transferência de energia, energia interna e interação térmica. Além disso, exige-se como pré-requisito o conceito de temperatura em seus aspectos macroscópicos e microscópicos, e os de energia, suas formas e seus modos fundamentais de transferência. Vazquez Diaz (1987), inspirando-se em Reif (1983), apresenta uma definição do conceito de calor considerada adequada:

Quando dois sistemas macroscópicos, a diferentes temperaturas, são postos em interação térmica (exclusivamente), denomina-se calor a energia líquida que se transfere do sistema inicialmente a mais alta temperatura para o sistema inicialmente a mais baixa temperatura.

Partindo desta definição, o autor aponta para alguns aspectos que devem ser levados em conta:

- A aparição do calor implica a presença de dois sistemas (pelo menos);
- Os sistemas devem estar a diferentes temperaturas;
- Há de se assegurar as condições de interação térmica;
- Existe uma referência clara para o calor que é a energia;
- Ao mesmo tempo, destaca a situação de que deve haver transferência de energia.

Porém, para o entendimento dessa definição, presume-se também a compreensão do equilíbrio térmico. Ainda que os aspectos acima sejam mencionados, a importância do conceito de equilíbrio térmico não foi destacada pelo autor.

Verifica-se que em muitos livros, principalmente os de química e de física introdutória, são utilizadas expressões infelizes, referindo-se, por exemplo, ao “calor de um corpo” como se o calor fosse uma propriedade do corpo; ou ainda, empregam termos como “energia térmica”, por meio de um conceito indefinido, muitas vezes obscuro e ambíguo. O mesmo acontece com o termo energia, que muitas vezes se apresenta sem uma definição correta (ZEMANSKY, 1970). Várias pesquisas apontam esse problema. Tripp (1976), ao realizar uma análise de 43 livros de química, encontrou somente 6 deles que apresentavam uma definição correta para o conceito de calor. Warren (1972) não se surpreendeu ao ter verificado que estudantes universitários concebiam as noções de calor e de energia interna de forma não diferenciada, na medida em que muitos livros de Física Elementar também não apresentam de forma clara as noções de calor e energia interna, fazendo, não raras vezes, um tratamento incorreto dos conceitos. O mesmo foi observado por Tripp:

Às vezes o calor é confundido com a energia cinética das moléculas num sistema. Por exemplo, são comuns afirmações como ‘o calor é o movimento aleatório das moléculas’. Na realidade, esta energia cinética molecular é parte da energia interna do sistema e, sob condições adequadas, pode ser aumentada ou diminuída pela transferência de energia sob a forma de calor ou trabalho, ou por alguma outra mudança interna ao sistema, na qual não está envolvida nenhuma transferência [de energia] para as vizinhanças do sistema. A energia cinética média das moléculas pode ser relacionada à temperatura de um sistema por meio dos argumentos da teoria cinética, sendo chamada por alguns autores de energia térmica do sistema. Esta forma de energia nunca deveria ser confundida com calor. (ibid, p. 783).

Segundo Garcia Houcarde e Rodriguez de Avila (1985), a maioria dos livros para o ensino médio acaba estabelecendo princípios inadequados, tais como o calor pensado como um fluido contido nos corpos, que de alguma maneira poderia passar de um corpo para outro. Exemplos desse tipo são dados: “é o fluxo de calor cedido ou absorvido”, “passa calor do primeiro para o segundo”, “o calor que tem um corpo”, “a energia térmica que toma ou cede”, e assim por diante. As frases são confusas e os modos de explicação estão mais coerentes com a teoria do calórico que com a atual. Além disso, levando-se em conta as formas de transmissão de calor, não é fácil para os alunos admitir que algo que se transmite

é diferente durante a transmissão e ao final da mesma, considerando que a idéia de algo que se transmite está ligada à conservação da identidade de “*o que se transmite*”. Portanto, fica difícil para os alunos entenderem corretamente estes conceitos, porque durante o processo de transmissão de calor ainda não foi atingido o equilíbrio térmico, entretanto quando este equilíbrio é alcançado, o calor como tal deixa de existir, e o correto seria dizer que o corpo tem determinada temperatura e determinada energia interna, e não dizer que tem calor.

O significado preciso do termo calor parece também não existir entre muitos autores de livros-texto e, segundo sugeriu Fernández Uría (1986), a dúvida surge entre três opções, cada uma delas concebendo o calor como:

- Um processo de transferência de energia;
- A forma em que a energia se manifesta em tal processo;
- A quantidade de energia transferida nesse processo.

Dada a importância do equilíbrio térmico para a compreensão de diferentes conceitos associados aos fenômenos térmicos, apresentamos a seguir algumas considerações sobre o desenvolvimento das noções relacionadas ao calor e ao equilíbrio térmico.

III. Algumas considerações sobre o desenvolvimento das noções relacionadas ao calor e ao equilíbrio térmico

Analisando a evolução dos conceitos envolvendo os fenômenos térmicos, pudemos perceber que o conceito de calor foi um dos mais difíceis de serem construídos pelos pensadores e cientistas no decorrer do tempo. Os primeiros pensadores associavam o calor ao fogo e suas manifestações.

Alguns filósofos pré-socráticos emitiram opiniões sobre a natureza do calor. Anaximandro (610-547 a.C.) disse que algo que se separou da substância eterna e infinita e indeterminada, o *apeiron*, foi capaz de produzir o calor e o frio. Heráclito de Éfeso (535-470 a.C.) considerava o fogo como elemento responsável pelas transformações no universo. Em um de seus aforismos ele disse: “*Por fogo se trocam todas as coisas e fogo por todas, tal como por ouro mercadorias e por mercadorias ouro*” (HERÁCLITO, Frag. 90, 1996). Empédocles (492-432 a.C.) elaborou um esquema explicativo com base nos chamados quatro elementos primordiais (água, ar, terra e fogo), associando o calor ao fogo. Filósofos posteriores, como Platão e Aristóteles, apresentando explicações, conceitualmente, um pouco mais elaboradas, aprofundaram essas noções mais ou menos vagas dos pré-socráticos. Hoppe (1928, p. 277) expressa as idéias de Platão, apresentadas no *Timeu*, da seguinte maneira:

Quando o fogo penetrava no corpo, suas partículas entravam em movimento, fazendo com que elas se separassem. Se o fogo é

afastado, o resfriamento intervém e o ar que penetra de novo no lugar do fogo comprime novamente as partículas. Assim se explica a expansão e a contração por meio do aquecimento e do resfriamento.

Aristóteles (384-322 a.C.) incorporou à sua filosofia natural os quatro elementos de Empédocles, introduzindo ainda um quinto elemento, o éter, a substância constitutiva dos corpos celestes. Para Aristóteles, o frio e o quente, como qualidades contrárias, assim como o leve e o pesado, eram propriedades fundamentais dos corpos. Ele chegou a fazer alusão de que o movimento do éter produzia o calor (KINDER; HILGEMANN, 1985).

Apesar de até este momento as explicações serem bastante primitivas, nota-se uma preocupação com a diferenciação entre o calor e o fogo, tendo em vista que o calor passa a ser visto como efeito do movimento das partículas da matéria. Pelo menos para Platão, calor e frio são palavras que possuem conotações relativas, elas não podem indicar entidades absolutamente contrárias, como até então alguns acreditavam. Hoppe (op. cit.) faz uma observação de que, neste aspecto, Aristóteles parece ter dado um passo atrás, em relação às posições de Platão. Em diferentes períodos da Idade Média, prevaleceram explicações ora do tipo das de Platão ora das de Aristóteles. Com pequenas variações, essas abordagens chegaram até o fim do Renascimento. Bernardino Telesius (1504-1588) ainda mantém a oposição entre o calor e o frio. Ele reduziu todas as forças ativas às forças de expansão pelo calor e as passivas às de contração pelo frio. Segundo Jammer (1999, p. 76-77):

“Na opinião deste célebre representante italiano da filosofia natural do Renascimento, o calor é o que origina o movimento e a vida, o frio, pelo contrário, dá origem ao repouso e à rigidez.”

Johannes Kepler (1571-1630) e Galileu Galilei (1564-1642), apesar de serem contemporâneos um do outro, tinham posições divergentes quanto à natureza do calor. Kepler compartilha das idéias de Roger Bacon, afirmando que o calor era um movimento das partes dos corpos. Quanto a Galileu, a exemplo de Bernardino Telesius (1504-1588), considerava o calor como uma espécie de fluido. Na obra de 1623 *“O Ensaiador”* (GALILEU, 1991, p. 105 e p. 121-2), ele ridiculariza a tese, considerada aristotélica, segundo a qual, o calor é engendrado por qualquer atrito, inclusive entre um corpo sólido e um fluido. Galileu não duvida que o atrito entre dois corpos sólidos pode produzir calor, mas, que o atrito entre um sólido e um fluido possa produzir calor, ele rejeita categoricamente. Segundo ele, o calor seria uma espécie de fluxo de corpúsculos do fogo, moven-

do-se a grande velocidade, que penetrando em nosso corpo, são capazes de causar em nós as sensações típicas do quente e do frio.

Pierre Gassendi (1592-1655) concebia duas matérias térmicas distintas: uma produzindo calor, outra frio. Idéias semelhantes haviam sido expressas muito antes por Lucrécio (95-55 a.C.), identificando, na sua obra *De Rerum Natura* duas substâncias distintas: o calor que está no Sol e o frio que está nos rios.

Francis Bacon (1561-1626) considerava o calor não como um movimento em expansão, mas como um movimento vibratório das partículas de um corpo; idéia também compartilhada por Robert Boyle (1627-1691), que entendia o calor como um estado de movimento das moléculas (HOPPE, 1928, p. 278). No tocante à natureza do calor, Daniel Bernoulli (1700-1782), em sua *Hydrodynamica* (1738), mostrou ser adepto de um ponto de vista semelhante. Leonhard Euler (1707-1783) era outro que compartilhava dessas mesmas idéias. Isaac Newton (1642-1727), pelo contrário, considerava o calor como sendo uma oscilação do éter, que partiria dos corpos celestes e penetraria nos corpos:

Não é o calor transmitido através do vácuo pelas vibrações de um meio muito mais sutil do que o ar, que, depois que o ar é retirado, permanecia o vácuo? E não é este meio o mesmo que aquele pelo qual a luz é refratada e refletida e através de cujas vibrações a luz comunica calor aos corpos, e é facilmente refletida e facilmente transmitida?[...] E os corpos quentes não comunicam seu calor aos corpos contíguos frios pelas vibrações desse meio propagadas nos meios frios? E não é este meio mais rarefeito e mais sutil que o ar, e extremamente mais elástico e ativo? (NEWTON, 1996, p. 257).

Segundo o físico-químico escocês Joseph Black (1728-1799), até meados do século XVIII, predominava a concepção de que as quantidades de calor requeridas para aumentar o calor de diferentes corpos no mesmo número de graus seriam diretamente proporcionais à quantidade de matéria de cada um deles. E, portanto, quando os corpos eram de mesmo tamanho, as quantidades de calor seriam proporcionais às suas densidades.

Herman Boerhaave (1668-1738) procurou interpretar algumas experiências caloríficas, feitas no início do século XVIII, envolvendo misturas de águas a diferentes temperaturas ou misturas de água e mercúrio. Ele concluiu, indevidamente, que o calor se distribuía uniformemente entre os corpos em equilíbrio térmico, afirmando que o calor recebido por um corpo seria simplesmente proporcional ao seu volume (ver BASSALO, 1992, p. 30). Pieter van Musschenbroeck (1692-1761) compartilhava da mesma opinião. Supunha-se que a intensidade do calor era a mesma em todos os pontos do espaço ocupado pelos corpos.

Black afirmou que, quando começou a pensar sobre esse assunto, a partir do ano de 1760, percebeu que ambas as concepções estavam erradas; nem a concepção de que o calor era proporcional à massa, nem a de que o calor era proporcional ao volume estavam corretas. Ele aceitava a hipótese de que o calor era uma espécie de fluido, que podia passar de um corpo para outro. Concluiu então que para atingir o equilíbrio entre si ou para aumentar as suas temperaturas em número igual de graus, as quantidades de calor que diferentes tipos de matéria recebem não estão em proporção à quantidade de matéria em cada uma delas, nem em proporção ao volume, mas sim em uma proporção muito diferente disso, e para a qual ainda não se poderia atribuir nenhum princípio geral ou uma razão específica. É nesse contexto que Black tem a idéia da necessidade de introduzir o conceito de capacidade térmica. Em 1784, Johan Gadolin (1760-1852), matematicamente, denomina de *calor específico*, $c=Q/m\Delta T$, onde Q é a quantidade de calor trocada, m, a massa da substância e ΔT , a variação de temperatura (PINHO; ANDRADE, 2002, p. 145-146). Gadolin inclusive estudou o calor específico de diversas substâncias.

Quase ao mesmo tempo, Antoine Lavoisier (1743-1794) e Pierre Simon Laplace (1749-1827) constroem o calorímetro de gelo e conseguem medir os calores específicos de várias substâncias. No tocante à natureza do calor, eles chegaram a afirmar, em fins do século XVIII, que os estudiosos divergem quanto à natureza do calor: alguns o tomam como um fluido, outros o consideram como um movimento invisível das moléculas dos corpos. Inclusive foi Lavoisier quem introduziu o termo calórico para designar a suposta substância responsável pelos fenômenos térmicos. Portanto, tudo indica que Lavoisier deveria estar mais propenso à aceitação da teoria do calor como um fluido.

Nessa época, para os adeptos da teoria substancialista do calor, o calórico podia ser descrito por meio de cinco postulados básicos, descritos por Roller (1950), conforme é apresentado por Castro (1993, p. 43-44):

- O calórico é um fluido elástico e auto-repulsivo;
- As partículas do calórico são atraídas pelas partículas da matéria comum;
- O calórico é indestrutível e não pode ser criado;
- O calórico pode ser sensível ou latente;
- O calórico não tem peso apreciável.

Devemos salientar que, nessa época, quando se falava em equilíbrio do calor, se subentendia o equilíbrio do calórico, ou seja, era como se no equilíbrio térmico houvesse uma distribuição do calórico recebido pelo corpo, proporcional ao seu calor específico. Hoppe (1928) comenta que é na passagem do século XVIII para o século XIX que começa a luta decisiva sobre a natureza do calor. Rumford, tentando elucidar a natureza do calor, chegou à conclusão de que o calor seria um movimento. Sir Humphry Davy (1778-1829), procurando esclarecer a verdadeira natureza do calor, conclui que o calor seria uma espécie

de movimento repulsivo (MAGIE, 1935, p. 168). Por outro lado, Fox (1971, p.4) afirma que nos dez anos seguintes a 1820 não ocorreu um rompimento brusco da teoria do calórico, apesar das experiências espetaculares de Rumford e de Davy. O que houve foi um certo agnosticismo no tocante à natureza do calor. A teoria do calórico só foi abandonada por volta de 1850. Apesar de ter sido um período muito importante para o desenvolvimento das teorias sobre a natureza do calor, não vamos neste trabalho focar essa questão.

No que diz respeito à intensidade do calor, ou seja, em se tratando da natureza da temperatura, a idéia de se estabelecer critérios para uma medida que representasse a intensidade do quente e do frio é bastante antiga. Podemos destacar o médico Galeno (129-200), que propõe representar o calor e o frio por meio de uma escala de graus numéricos, atribuindo o “calor neutro” ao ponto zero, que correspondia a uma mistura de água fervendo e gelo. Entre os séculos XI e XII, os trabalhos de Galeno foram traduzidos para o latim e a palavra mistura de graus de calor foi interpretada pelo termo “tempera”, isto é, temperatura. Apesar da definição deste termo, ainda não havia sido estabelecido o conceito de temperatura como atualmente é entendido. Para o estabelecimento do conceito de temperatura, foi muito importante a construção de termômetros cada vez mais precisos. Neste sentido, as contribuições de Filón de Bizâncio (século I a.C.) e Heron de Alexandria (século II a.C.) foram importantes para a criação dos primeiros termoscópios, que evoluíram, originando os primeiros termômetros. Dentre os que contribuíram para o aperfeiçoamento dos termômetros, podemos citar: Cornelius van Drebbel (1572-1634), Giambattista della Porta (1535-1615), Santorre Santorio (1561-1636), Galileu Galilei (1564-1642), Paolo Sarpi (1552-1623), Robert Fludd (1574-1637), Francis Bacon (1561-1626), Jan Baptista van Helmont (1577-1644), Jean Rey (1627-1704), Ole Römer (1644-1710), Guillaume Amontons (1663-1705), Joachim D'Alencé (1640-1707), Daniel Fahrenheit (1686-1736), Anders Celsius (1701-1744), Fredrik Rudberg (1800-1839).

É importante salientar que o aperfeiçoamento dos termômetros possibilitou uma melhor compreensão de vários aspectos relacionados às propriedades térmicas dos materiais. Estas, por sua vez, permitiram uma melhor compreensão do equilíbrio térmico. O fato de um pedaço de metal se apresentar, sensorialmente, mais frio do que um pedaço de madeira, não significa que a temperatura do metal seja menor. Na realidade, todos esses termômetros foram construídos com base no princípio de que o aparelho entra em equilíbrio térmico com o sistema cuja temperatura se quer medir. Este princípio, que inicialmente, parecia ser apenas uma suposição razoável, mais tarde veio ser chamado de Lei Zero da Termodinâmica (PINHO; ANDRADE, 2002, p. 141-144). A Lei Zero da Termodinâmica diz que: *“Se dois corpos A e B estão em equilíbrio térmico com um terceiro corpo C, estão em equilíbrio térmico um com o outro”* (HALLIDAY et al., 1996, v. 2, p. 171).

IV. Obstáculos epistemológicos no tocante ao equilíbrio térmico

Segundo a visão de Bachelard (1984), um obstáculo epistemológico não se trata de algo externo ao conhecimento, pois:

É no próprio ato de conhecer, intimamente, que aparecem, por uma espécie de necessidade funcional, lentidões e perturbações. É aqui que residem causas de estagnação e mesmo de regressão, é aqui que iremos descobrir causas de inércia a que chamaremos de obstáculos epistemológicos. (p. 165)

Nada é natural. Nada é dado. Tudo é construído. (p. 166)

Deste modo, o conhecimento precisa ser mobilizado, tendo em vista que todo conhecimento é resposta a uma questão, portanto se não houver uma questão, não haverá conhecimento científico. Todo conhecimento envolve uma construção.

Há que se diferenciar a construção do conhecimento do ponto de vista histórico e do ponto de vista epistemológico. Segundo Bachelard (op. cit., p.168), o historiador das ciências tem de tomar as idéias como fatos, diferentemente do epistemólogo, que tem de tomar os fatos, como idéias, inserindo-os num sistema de pensamento.

Com relação ao equilíbrio térmico, parece que um obstáculo epistemológico importante foi a questão do discernimento da diferença entre calor propriamente dito e temperatura. O refinamento da técnica de construção de termômetro contribuiu para um avanço no entendimento da diferenciação dos conceitos de calor e temperatura, sendo que os mais importantes foram os avanços na técnica de construção de termômetros de mercúrio e a constatação da dilatação praticamente regular dos gases.

Partindo do princípio de que havia uma linearidade entre o calor fornecido ao corpo e a variação do grau de calor, que era traduzido pela variação da coluna termométrica, poderia parecer à primeira vista que graus de calor (temperatura) e calor propriamente dito fossem pelo menos proporcionais entre si. Nesse contexto, não se dispunha de critério para que se fizesse a distinção mais sutil entre o conceito de calor e temperatura. É quando entra em cena a questão da relação entre uma grandeza intensiva²³ e uma grandeza extensiva²⁴. Tinha-se o contro-

²³

As propriedades de um sistema, em um dado estado, que são proporcionais à massa do sistema, são chamadas de propriedades extensivas. Exemplos: o volume total e a energia total do sistema. O calor, embora não seja uma propriedade de um sistema, é uma grandeza extensiva, como é a energia.

le sobre a variação de uma grandeza extensiva (a variação do comprimento da coluna termométrica), que era suposta proporcional à variação de outra grandeza extensiva (a quantidade de calor fornecida ao corpo), mas não se tinha uma idéia clara de outra grandeza relacionada ao calor, a temperatura, que seria uma grandeza intensiva.

Somente em meados do século XVIII, com o desenvolvimento da calorimetria, é que essa questão pôde ser resolvida. Operacionalmente, foi preciso utilizar a condição de equilíbrio térmico para diferentes corpos, comparados com um corpo de prova, que seria um termômetro. Foi também preciso superar concepções incorretas, no tocante à capacidade calorífica dos corpos, mais precisamente, àquelas relacionadas à noção de calor específico e capacidade térmica de um corpo.

Até as primeiras décadas do século XVIII era aceita a idéia de que as quantidades de calor requeridas, necessárias para aumentar o calor de diferentes corpos em um mesmo número de graus, deveriam ser diretamente proporcionais à quantidade de matéria nesses corpos, isto é, à sua densidade e volume. Entretanto, como já mencionamos, quando Boerhaave e Musschenbroek procuraram compreender os resultados de algumas experiências caloríficas, feitas no início do século XVIII, envolvendo misturas de águas a diferentes temperaturas ou misturas de água e mercúrio, criaram a suposição de que o calor se distribuía uniformemente entre os corpos em equilíbrio térmico, afirmando que o calor recebido por um corpo seria simplesmente proporcional ao seu volume. Mas, uma análise mais cuidadosa do assunto, feita por Black, veio mostrar que essa hipótese contradizia os próprios resultados que eles queriam interpretar.

Embora o conceito de temperatura parece já ter sido introduzido por Samuel Klingensjerna (1698-1765), que em 1729 formulou a hipótese que havia diferença entre grau e quantidade de calor (HOPPE, 1928, p. 246), essa questão parece que só foi satisfatoriamente resolvida por Black, por volta de 1760, que por meio de experiências cuidadosas, concluiu:

- o calor não se distribui sobre diferentes corpos de modo proporcional às suas respectivas densidades;
- também não se distribuía uniformemente em todo o volume ocupado por diferentes corpos;
- no equilíbrio térmico, a grandeza comum a todos os pontos ocupados por diferentes corpos é a temperatura.

Com relação às duas primeiras afirmações, na realidade, Black disse que a causa do comportamento diverso dos corpos, relacionada à capacidade térmica era ainda desconhecida (MAGIE, 1935, p. 135-6). Também foi Black que,

²⁴ As propriedades de um sistema, que são independentes da massa, são chamadas de propriedades intensivas. A temperatura, a pressão e a densidade são exemplos de propriedades intensivas. (ver SEARS, F. W.; SELINGER, G. L., 1986)

em 1756, introduziu o conceito de calor latente, e, em 1760, o de capacidade térmica. Em 1761, introduz o conceito de calor latente de fusão e, em 1765, verifica que o mesmo acontece com a água em ebulição (calor de vaporização da água). O conceito de calor específico foi introduzido por Johan Carl Wilcke (1732-1796) em 1772. Salientamos que até a época dos trabalhos de Black não se tinha o conhecimento de que, durante o processo de mudança de fase, estava envolvida uma quantidade apreciável de calor. Black afirmou que, por exemplo, no processo de derretimento da neve, caso não estivesse presente uma grande quantidade de calor, teríamos um processo quase instantâneo da passagem da neve do estado sólido para o líquido, causando grandes avalanches.

Ao introduzir novos conceitos, tais como, capacidade térmica e calor latente, Black, na realidade, estava superando obstáculos epistemológicos no que se refere à natureza do calor. As concepções anteriores eram até certo ponto resultados de intuições mais ou menos ingênuas. E como Bachelard (1984) afirmou:

O conhecimento do real é uma luz que sempre projeta algures umas sombras. Nunca é imediato e pleno. Nós conhecemos contra um conhecimento anterior, destruindo conhecimentos mal feitos, ultrapassando aquilo que, no próprio espírito, constitui um obstáculo epistemológico. (p.165)

Como já foi citado, por volta de 1783, Lavoisier e Laplace constroem o primeiro calorímetro de gelo, e com isso conseguem medir o calor específico de vários materiais. Eles, inclusive, mostraram que os calores específicos de cada substância não eram constantes, já que variavam com a temperatura. Estes avanços científicos serviam para uma melhor compreensão dos conceitos de calor e temperatura, pois como já havia sido chamada atenção por Black, o conceito de capacidade térmica, e em particular, do ponto de vista operacional, o de calor específico, era fundamental para a constatação dos papéis distintos desempenhados pela temperatura e pelo calor, nos fenômenos térmicos.

V. Teorias e concepções espontâneas relacionadas aos fenômenos térmicos: algumas similaridades

A questão do paralelismo entre o desenvolvimento histórico das ciências e as concepções espontâneas ou idéias “intuitivas” dos alunos já foi discutida por diversos autores. Dentre eles, podemos citar Piaget e Garcia (1987), Saltiel e Viennot (1985). No trabalho de Saltiel e Viennot são discutidas as semelhanças entre as idéias espontâneas dos alunos e algumas teorias pré-clássicas sobre a mecânica, concentrando-se nas similaridades entre as concepções espontâneas dos alunos e diversos aspectos da teoria do *impetus*, ressaltando que, apesar de haver uma certa correspondência entre as concepções dos estudantes e as dos autores

medievais, que escreveram sobre a teoria do *impetus*, o paralelismo entre elas não pode ser levado muito longe, podendo haver apenas um paralelismo parcial (op. cit., p. 141).

Um dos motivos por que não pode haver um paralelismo estrito entre as concepções espontâneas dos alunos e as dos cientistas, em épocas pretéritas das ciências, deve-se, em parte, à seguinte consideração:

Talvez o mais importante a compreender é o fato de que em cada momento [histórico] os cientistas eram coerentes, quer dizer, não pensavam em “termos atuais”, senão que utilizavam as ferramentas lógicas de seu meio e de sua época. (GAGLIARDI; GIORDAN, 1986, p. 257)

No que concerne às questões relacionadas com o calor e à temperatura, também podemos observar algumas semelhanças entre concepções espontâneas dos alunos e o desenvolvimento histórico desses conceitos, dentre os quais destacamos:

V.1 A interpretação do calor como fluido

Os alunos concebem o calor como se fosse “algo” que os corpos têm e que este “algo” pode passar de um corpo para outro. Historicamente falando, concepções semelhantes já existiram: foram as hipóteses do calor-substância, o calor como um fluido *sui generis*, e, em particular, a teoria do calórico. Alguns alunos, como foi citado no item 1 deste trabalho, concebem o calor como uma propriedade ligada aos objetos (“*metal é frio*”, “*madeira é quente*”, etc). Essas idéias podem fazer lembrar as de Lucrecio, no primeiro século antes de nossa era, ou os conceitos de Gassendi, no século XVII, expressas na hipótese da existência de duas matérias térmicas, uma produzindo o frio e a outra o calor.

Um conceito bastante difícil de ser assimilado por nossos alunos é o de calor latente. A história das ciências mostra que essa concepção, que durante muito tempo ainda não existia como tal, foi, às vezes, mal compreendida ou mesmo ignorada, pois se pensava que as mudanças de estado de agregação das substâncias não envolviam quantidades significativas de calor. Será que os estudantes do ensino médio e dos primeiros anos do curso de Física têm consciência que as mudanças de estado dos corpos envolvem quantidades apreciáveis de calor? Essa questão, que, para grande parte dos alunos, muitas vezes, parece ser inaceitável, foi um assunto muito polêmico entre cientistas em épocas passadas, principalmente no período anterior aos trabalhos de Black, conforme comentamos no item III.

V.2 A não diferenciação dos conceitos de calor e temperatura

A distinção entre calor e temperatura é outra questão de difícil compreensão para os alunos no início de seus estudos sobre fenômenos térmicos. De modo bastante semelhante, ocorreram algumas vicissitudes históricas que estiveram na origem da separação desses conceitos e de sua compreensão mais profunda e adequada. Dentre essas podemos citar: a suposta linearidade entre o calor fornecido ao corpo e a variação do grau de calor, fenômeno esse que não ocorre quando se trata de calor latente; a relação entre uma grandeza intensiva e uma grandeza extensiva; a relação entre o fornecimento de calor para diferentes corpos e suas respectivas variações de graus de calor.

Historicamente, essa diferenciação ocorreu somente em meados do século XVIII, com o desenvolvimento da calorimetria, na medida em que conceitos como capacidade térmica e calor específico de um corpo passaram a ter significados mais precisos.

V.3 A interpretação do equilíbrio térmico

Tomemos uma questão-chave no estudo da calorimetria, como é a questão do conceito de equilíbrio térmico. A idéia de que no equilíbrio térmico, uma grandeza intensiva, a temperatura, é comum a todo o sistema, e não o calor, é motivo de confusão para muitos alunos. De modo análogo, a história da Física também mostra que durante muito tempo esse assunto continuava mal compreendido pelos cientistas. Para o seu entendimento adequado, foi necessário o estabelecimento do conceito de calor específico das diversas substâncias. Acontece, porém, que, inicialmente, como já tivemos oportunidade de mostrar, muitas idéias inadequadas foram expressas a esse respeito.

Acreditamos que, no que se refere aos fenômenos envolvendo calor e temperatura, de fato, existe um certo paralelismo entre as concepções espontâneas dos alunos e as dos cientistas em épocas passadas, mas que seria talvez mais certo falar de um paralelismo parcial, tendo em vista que algumas das idéias dos cientistas eram bem estruturadas e estavam baseadas em paradigmas então vigentes. Mesmo que essas concepções possam ser consideradas inadequadas, segundo os padrões atuais, naquela época, elas podiam ser consistentes e, em geral, eram bastante matizadas: estavam inseridas em um contexto teórico bastante amplo, ao contrário do que acontece com as concepções espontâneas dos alunos, que, em geral, são incoerentes, sem embasamento teórico adequado, são fragmentadas e, às vezes, totalmente contraditórias.

VI. Algumas questões que poderiam suscitar discussões em sala de aula

Tendo em vista o desenvolvimento histórico dos conceitos de calor e temperatura, acreditamos que algumas questões podem ser interessantes para uma discussão em sala de aula. Dentre elas, destacamos:

➤ Suponha que você tenha dois cubos de volumes idênticos, na temperatura ambiente, porém de materiais diferentes (por exemplo, ferro e alumínio) e que seu objetivo é aquecê-los, fazendo-os atingir uma mesma temperatura final. Nessas circunstâncias, você afirmaria que ambos os corpos devam receber a mesma quantidade de calor?

➤ Suponha que você tenha dois cubos de mesmo material, porém com volumes diferentes, e que seu objetivo é aquecê-los, fazendo-os atingir uma mesma temperatura final. Nessas circunstâncias, você afirmaria que ambos os corpos devam receber a mesma quantidade de calor?

➤ O que aconteceria com o derretimento das geleiras, se a fusão do gelo fosse instantânea, conforme se pensava antes da elaboração da teoria formulada por Black?

➤ Quando misturamos dois litros de água, cada litro, inicialmente, a temperaturas diferentes, a temperatura final da mistura será obtida pela média aritmética de suas temperaturas iniciais. Mas se é misturado um litro de água com um litro de álcool, com temperaturas iniciais diferentes, a temperatura final de equilíbrio da mistura será diferente daquela obtida pela média aritmética de suas temperaturas iniciais. Por que isso acontece? Qual é a grandeza física, além do calor e da temperatura, que precisa ser considerada nesse problema?

➤ Em um recinto de paredes adiabáticas, você coloca diversos corpos, feitos de diferentes materiais, digamos vidro, papel, diferentes metais, madeira. Inicialmente, esses corpos podem estar a temperaturas diferentes, no entanto, passado um intervalo de tempo razoavelmente longo, espera-se que eles irão adquirir uma mesma temperatura final (equilíbrio térmico). Isso pode ser confirmado por meio de um termômetro. Apesar disso, se você tocar cada corpo com a mão, você poderá achar que os metais estão mais frios que os outros corpos. Por que isso acontece?

➤ Quando um objeto quente esquenta um frio, suas mudanças de temperaturas são iguais em magnitude? (Ou seja, o corpo quente irá diminuir sua temperatura e o corpo frio aumentará a sua no mesmo número de graus?)

➤ Imagine que, ao abrir o forno quente, quando um frango coberto com papel alumínio esteja sendo assado, você suporta bem a temperatura. Ao você suspender a folha de alumínio, sentirá na sua pele uma grande sensação de ardência, dando a impressão de que a temperatura está extremamente elevada. Como você explicaria esse fato?

➤ Você põe a mão dentro de um forno quente para tirar uma forma e queima seus dedos nela. Entretanto, o ar em torno dela está à mesma temperatura, mas não queima seus dedos. Por quê?

Referências Bibliográficas

BACHELARD, G., **A Epistemologia**. Lisboa: Edições 70, 1984.

BASSALO, J. M. F. A crônica do Calor: Calorimetria. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 14, n. 1, p. 29-38, 1992.

CASTRO, R. S. **História e Epistemologia da Ciência: investigando as suas contribuições num curso de Física de segundo grau**. 1993. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências: modalidade Física) - Instituto de Física, Faculdade de Educação, Universidade de São Paulo, São Paulo.

FERNANDEZ URIA, E. Reflexiones acerca del concepto de calor. **Enseñanza de las Ciencias**, v. 4, n. 1, p. 91-92, 1986.

FOX, R. **The caloric theory of gases from Lavoisier to Regnault**. Oxford: Clarendon Press, 1971.

GAGLIARD, R.; GIORDAN A. La historia de las ciencias: una herramienta para la enseñanza. **Enseñanza de las Ciencias**, v. 4, n. 3, p. 253-258, 1986.

GALILEU, G. **O Ensaíador**. Coleção Os Pensadores. São Paulo: Ed. Abril, 1991.

GARCIA HOUCARDE, J. L.; RODRIGUES de AVILA, C., Preconcepciones sobre el calor em 2o de BUP. **Enseñanza de las Ciencias**, v. 3, n. 3, p. 188-193, 1985.

HALLIDAY, D. et al. **Física**. v. 2. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1996.

HERÁCLITO. **Pré-Socráticos**. São Paulo: Nova Cultural, 1996.

HOPPE, E. **Histoire de la Physique**. Paris: Payot, 1928.

JAMMER, M. **Concepts of force**. New York: Dover, 1999.

KINDLER, H.; HILGEMANN, W. **Atlas Histórico Mundial**. Madrid: Ediciones Istmo, 1985.

LAVAL, A. Chaleur, temperature et Changements d'Etat. **Recherches en Didactique des Sciences Experimentales**, v. 6, p. 115-132, 1985.

MAGIE, W. F. **A Source Book in Physics**. New York: McGraw-Hill Book, 1935.

NEWTON, I. **Óptica**. São Paulo: EDUSP, 1996.

PIAGET, J.; GARCIA, R. **Las Explicaciones Causales**, Barcelona: Barral ed., 1973.

PIAGET, J.; GARCIA, R. **Psicogênese e História das Ciências**, Lisboa: Dom Quixote, 1987.

PINHO, S. T. R.; ANDRADE, R. F. S. Evolução das Idéias da Termodinâmica e da Mecânica Estatística. In: ROCHA, J. F. M. (Org.). **Origens e evolução das idéias da Física**, Salvador: EDUFBA, 2002.

PLATÃO, **Timeu e Crítias ou Atlântida**. São Paulo: Hemus, 1981

REIF, R. **Statistical and Termal Physics**. Tóquio: McGraw Hill International Book Co., 1983.

ROZIER, S.; VIENNOT, L. Student's reasonings in thermodynamics. **International Journal of Science Teaching**, v. 13, n. 2, p. 159-170, 1991.

SALTIEL, E.; VIENNOT, L. Que aprendemos de las semejanzas entre las ideas históricas y el razonamiento espontaneo de los estudiantes? **Enseñanza de las Ciencias**, v. 3, n. 2, p. 137-145, 1985.

SEARS, F. W.; SELINGER, G. L. **Thermodynamics, Kinetic Theory and Statistical Thermodynamics**. London: Addison-Wesley Pub. Co., 1986. p. 3.

THOMAZ, M. F.; MALAQUIAS, I. M.; VALENTE, M. C. In attempt to overcome alternative conceptions related to heat and temperature. **Physics Education**, v. 30, n. 1, p. 19-26, 1995.

TRIPP, T. B. The definition of heat. **Journal of Chemical Education**, v. 53, n. 12, p. 782-784, 1976.

VAZQUEZ DIAZ, J. Algunos aspectos a considerar en la didáctica del calor. **Enseñanza de las Ciencias**, v. 5, n. 3, p. 235-238, 1987.

WARREN, J. W. The teaching of the concept of heat. **Physics Education**, v. 7, n. 1, p. 41-44, 1972.

ZEMANSKY, M. W. The use and misuse of the word "Heat" in Physics Teaching. **The Physics Teacher**, n. 8, p. 295-300, 1970.