

A ASCENÇÃO E QUEDA DA TEORIA DO CALÓRICO⁺*

Luciano Carvalhais Gomes

Departamento de Física – Universidade Estadual de Maringá
Maringá – PR

Resumo

Este artigo tem como objetivo fazer uma análise histórica do surgimento da teoria do calórico, de seu poder explicativo e de seu declínio. Ao contrário do que muitos textos divulgam, mostraremos que Joseph Black não foi o primeiro a pesquisar o calor como substância e que os experimentos de Benjamin Thompson (Conde Rumford) não foram cruciais para o abandono dessa teoria. O poder explicativo do calórico será evidenciado por análises de trechos do livro de divulgação da ciência de autoria de Janet Marcet. Acreditamos que o conhecimento desses fatos ajudará a compreender melhor a origem de muitos termos que utilizamos no estudo da calorimetria, além de alertar professores e alunos quanto aos erros de afirmações históricas presentes nos textos didáticos.

Palavras-chave: *Temperatura. Calor. Calórico. Calor latente e calor específico.*

Abstract

The aim of this paper is to make a historical analysis of the appearance of the caloric theory, its explanatory power and its

⁺ The rise and decline of the caloric theory

^{*} *Recebido: maio de 2012.
Aceito: setembro de 2012.*

decline. Unlike many texts disclose, we will show that Joseph Black was not the first to investigate the heat as a substance and that the experiments of Benjamin Thompson (Count Rumford) were not crucial to the abandonment of this theory. The explanatory power of the caloric will be shown by analysis of extracts from the book of dissemination of Science authored by Janet Marcet. We believe that the knowledge of these facts will help to better understand the origin of many terms that we use in the study of the calorimetry, besides alerting teachers and students of the historical claims errors found in textbooks.

Keywords: *Temperature. Heat. Caloric. Latent heat and specific heat.*

I. Delimitando o espaço e o tempo de análise

O fogo sempre esteve presente na vida do homem, despertando medo, respeito e admiração. Há evidências de sua utilização, de modo voluntário, a partir do “Homem de Neanderthal”, cerca de 300.000 mil anos atrás. Ele era produzido, possivelmente, por atrito entre galhos ou por choque entre pedras cujas faíscas provocadas incendiavam palhas secas. A partir dessa época, não se conhece nenhuma sociedade que tenha vivido sem a capacidade de manuseá-lo. Ao contrário da linguagem e do uso de ferramentas em que há sinais rudimentares de sua presença em outros animais, a habilidade para produzir e manusear o fogo é uma exclusividade de nossa espécie. Essa aquisição modificou os nossos hábitos alimentares, além de ter possibilitado uma emigração da África para as zonas mais frias, como a Europa e a Ásia. Sem o domínio sobre o fogo, o homem não teria fundido o cobre e o estanho, criando a liga de bronze. Dessa forma, não teria conseguido confeccionar diversos tipos de ferramentas, armaduras, armas brancas e instrumentos agrícolas. Ou seja, o desenvolvimento da tecnologia – e consequentemente das cidades – não teria acontecido se o homem não tivesse controlado o fogo. A civilização moderna não existiria do modo que a conhecemos (HAWKES, 1963). O homem sempre colocou o fogo em lugar de destaque em suas representações sobre a natureza. Em várias culturas encontramos lendas e mitos em que ele está presente. No entanto:

[...] Parece que foram os gregos antigos os primeiros a se preocuparem com sua explicação. Assim é que, o filósofo Platão (c.428-c.348) em seu li-

vro Timaeus acreditava que o fogo heraclitano tinha a forma tetraédrica. Já os filósofos atomistas Demócrito de Abdera (c.470-c.380) e Leucipo de Mileto (c.460-c.370) admitiam que o átomo de fogo era esférico. Contudo, para o filósofo Aristóteles de Estagira (384-322), os elementos essenciais do Universo seriam: frio (tò psychrón), quente (tò thermón), úmido (tò hydrón) e seco (tò xerón), sendo o fogo resultado da mistura entre o quente e o seco (BASSALO, 1992, p. 910).

Além dessas considerações filosóficas, pode-se estudar o fogo sobre vários aspectos, pois ele participa de muitos fenômenos físicos e químicos. Por exemplo, a sua presença, ou ausência, muito mais do que a do Sol, fez o homem pensar sobre os processos de aquecimento e de resfriamento. O nosso interesse nesta seção é entender alguns detalhes sobre o desenvolvimento científico da compreensão desses processos, bem como dos acontecimentos relacionados a eles. Apesar de a primeira utilização consciente do fogo ter ocorrido em tempos remotos, a nossa análise terá início a partir do momento que os conceitos de calor e temperatura começaram a ser diferenciados e os primeiros estudos quantitativos sobre as ocorrências que envolvem aquecimento e resfriamento foram realizados, no período que vai de 1600 a 1900. Desse modo, conseguiremos abordar tanto a primeira teoria científica mais elaborada sobre o conceito de calor quanto os primórdios da teoria aceita atualmente.

II. A ascensão da teoria do calórico: algumas contribuições de Joseph Black

Estudos quantitativos sobre os fenômenos relacionados com o aquecimento e o resfriamento dos materiais somente foram possíveis depois da invenção do termômetro. Antes, foram construídos vários dispositivos de característica lúdica, conhecidos como “termoscópios”, que mostravam a relação existente entre o aquecimento e a expansão de um fluido – geralmente o ar ou a água –, mas sem ainda uma escala de medida. Segundo Bassalo (1992, p. 852):

Muito embora alguns médicos dos primeiros séculos de nossa Era Cristã hajam tentado representar numericamente os diversos graus de temperatura entre o quente e o frio, foi somente na Idade Moderna (1453-1789) que foram construídos aparelhos cada vez mais precisos, objetivando medir esses graus de temperatura. Com efeito, o primeiro deles foi construído pelo físico italiano Galileu Galilei (1564-1642), em 1592. Era um tubo de vidro, com uma extremidade esférica, na qual era depositada água colorida (ou

espírito de vinho) até sua metade, e o bulbo colocado para cima, em um recipiente contendo a mesma água colorida. Dessa forma, a coluna de água no tubo se moveria para cima e para baixo, em consequência da expansão térmica do ar contido no tubo. No entanto, esse dispositivo apresentava duas limitações. Como ele estava em contato com o ar, a pressão atmosférica, até então desconhecida, alterava profundamente os resultados. Por outro lado, como Galileu não utilizou nenhuma escala termométrica, o seu aparelho era simplesmente um termoscópio.

A partir desse ressurgimento do termoscópio com Galileu, novos aperfeiçoamentos foram introduzidos. O médico italiano Santorio Santorio (1561-1636), que era professor de medicina na Universidade de Pádua e colega de Galileu, aplicou o termoscópio para detectar a febre em seus pacientes. Reconhecendo a necessidade de pontos de medida no aparelho, registrou o nível que a coluna de água do tubo atingia quando em contato com o gelo fundido e com a chama de uma vela; em seguida dividiu o intervalo em 110 partes iguais. O soberano italiano Fernando II de Toscana (1610-1670), por volta de 1644, teve a ideia de construir um termômetro com as extremidades hermeticamente fechadas. Evitando, desse modo, a influência da pressão atmosférica nas medidas. Além disso, ele utilizou o álcool como substância termométrica, pois o seu ponto de congelamento é mais baixo do que o da água (BASSALO, 1992; ROLLER, 1950). Com a popularidade crescente do uso dos termômetros, a escolha de novas escalas:

*[...] bem como a construção de novos tipos de termômetros continuaram no século XVIII. Por exemplo, em 1772, o suíço Jean-André Deluc (1727-1817), registrou em seu livro *Recherches sur lês Modifications de atmosphère*, cerca de 60 escalas; porém, dessas, somente as escalas Fahrenheit, Réamur e Celsius sobreviveram até o nosso século [...] (BASSALO, 1992, p. 856).*

O aperfeiçoamento do termômetro possibilitou a diferenciação entre os conceitos de temperatura e calor por Joseph Black (1728-1799). Black iniciou o curso de medicina na Universidade de Glasgow, mas depois se transferiu para a Universidade de Edinburgh, pois ela tinha mais prestígio nessa área, formando-se em 1754. Em 1756, ele retornou à Glasgow como professor, fazendo as suas principais descobertas sobre a natureza do calor entre os anos de 1759 e 1762. De acordo com Roller (1950, p. 17-18, tradução nossa):

Até Black fazer suas descobertas, não havia distinção clara na mente das pessoas entre os conceitos de "quantidade de calor" e "grau de aquecimen-

to", ou "temperatura". A ideia qualitativa de "calor" como "alguma coisa" relacionada com fenômenos térmicos, é claro que há muito tempo existia. O simples fato de que um objeto perto do fogo aquece, o que certamente era conhecido desde o tempo quando o homem descobriu o fogo, deve ter sugerido que algo passa do fogo para o objeto. Mas, para essas primeiras pessoas, esse algo que passa bem que poderia ter sido pensado como sendo a temperatura, ou o grau de aquecimento, em si mesmo; ou, novamente, poderia ser alguma coisa separada, chamada de "calor", o calor e o consequente aumento no aquecimento do objeto parecem desempenhar os respectivos papéis de causa e efeito.

Francis Bacon, em 1620, e os membros da Academia Florentina, por volta de 1650, mostraram evidências para distinguir entre temperatura e calor. Mas foi Black que fez a distinção clara, concebendo o calor como uma quantidade física mensurável, diferenciando-o da quantidade indicada por um termômetro, embora houvesse uma relação entre elas. Ele nunca publicou suas descobertas, apesar de discuti-las em suas conferências acadêmicas. Seus manuscritos foram reunidos e publicados, após sua morte, por John Robison, um de seus estudantes e assistente, em 1803, com o título "Lectures on the elements of chemistry". A parte relacionada ao estudo do calor ocupa 225 páginas, mas Roller (1950) traz algumas passagens em que Black apresenta as suas principais ideias a esse respeito. A certa altura do texto, Black afirma que, mesmo sem a ajuda de termômetros, não é difícil de perceber que o calor se difunde do corpo mais quente para o mais frio, até ser distribuído de tal forma que se atinja um estado de equilíbrio.

Esse equilíbrio é um tanto curioso. Descobrimos que, quando toda a ação mútua é terminada, um termômetro aplicado a qualquer um dos corpos sofre o mesmo grau de expansão. Portanto, a temperatura de todos eles é a mesma. Nenhum conhecimento anterior, da peculiar relação de cada corpo ao calor, poderia ter nos garantido isso, e devemos a descoberta inteiramente ao termômetro. Desse modo, devemos adotar como uma das leis mais gerais do calor, o princípio de que todos os corpos comunicando-se livremente com outro, e expostos a nenhuma desigualdade de ação externa, adquirem a mesma temperatura, como indicado por um termômetro. Todos adquirem a temperatura do meio circundante (BLACK, 1803 apud ROLLER, 1950, p. 20, tradução nossa).

O autor prossegue dizendo que ao se dispor vários objetos de diferentes temperaturas, tamanhos e materiais em uma sala, sem a presença do fogo ou do

Sol, o calor será comunicado a partir do mais quente para o mais frio. Após esperar o tempo necessário, todos indicarão a mesma leitura em um termômetro. O que para muitos, nesse caso, indica uma “igualdade de calor entre corpos diferentes”, para ele representa apenas um “equilíbrio de calor”. Nesse ponto, Black (1803 apud Roller, 1950, p. 21, grifo nosso, tradução nossa) introduz a sua interpretação original para o fenômeno:

A natureza desse equilíbrio não foi bem compreendida, até indiquei um método de investigá-la. Dr. Boerhaave¹ imaginou que quando ele é alcançado, há uma quantidade igual de calor em cada igual volume de espaço, porém cheio de diferentes corpos; e Professor Musschenbroeck², em sua Physica, expressou sua opinião para o mesmo propósito: “Est enim ignis aequaliter per omnia, non admodum magna, distributus, ita ut in pede cubico auri et aëris et plumarum, par ignis sit quantitas.” [“O calor é distribuído por todos (os corpos), não proporcional ao seu (peso), de modo que um pé cúbico de ouro, de ar e de penas, terá a mesma quantidade de calor.”] A razão que eles dão para essa opinião é que, ao ser aplicado em qualquer desses corpos, o termômetro dá a mesma leitura.

Mas essa é uma visão muito precipitada do assunto. Está se confundindo a quantidade de calor em diferentes corpos com suas intensidades [temperatura], embora seja claro que essas são duas coisas diferentes, e devem sempre ser distinguidas, quando estamos a pensar na distribuição de calor...

Black também era contrário à suposição de que a quantidade de calor necessária para aumentar de um mesmo valor a temperatura de objetos feitos com materiais diferentes é diretamente proporcional às suas quantidades de matéria, ou aos seus pesos, ou, caso os volumes sejam iguais, às suas densidades. Segundo o autor:

¹ “[...] Hermann Boerhaave foi um contemporâneo do Newton. Ele foi professor de Medicina em Leyden, na Holanda, tendo publicado, em 1732, um dos primeiros livros-texto de química que tratava sobre a coisa do calor [...]” (MEDEIROS, 2009, p. 08-09).

² “[...] Pieter van Musschenbroek foi professor de filosofia natural - como era chamada a física naquela época - também em Leyden e escreveu extensamente sobre física, no século XVIII. Ele foi um dos pioneiros tanto no ensino da física experimental, quanto também como autor dos primeiros livros didáticos de física de que se tem notícia” (MEDEIROS, 2009, p. 09).

Essa opinião foi me sugerida por um experimento descrito pelo Dr. Boerhaave em seu Elementa Chemice [1732]. Após relatar uma experiência com a mistura de água quente e fria que Fahrenheit fez conforme o seu desejo, Boerhaave também nos diz que Fahrenheit agitou juntos mercúrio e água, de temperaturas iniciais diferentes³. Dos cálculos do Médico, é bastante claro que o mercúrio, embora tenha mais de 13 vezes a densidade da água, tinha menos efeito no aquecimento ou esfriamento da água, com a qual ele foi misturado, do que teria sido produzido por igual volume de água. Ele diz expressamente que o mercúrio, ao ser aplicado quente na água fria, ou frio na água quente, nunca produziu mais efeito no aquecimento ou resfriamento do que teria sido produzido por um volume igual de água misturado com água da mesma temperatura inicial do mercúrio, mas com apenas dois terços de seu volume. Acrescenta que é necessário misturar três volumes de mercúrio com dois de água a fim de produzir a mesma temperatura média que é produzida pela mistura de iguais volumes água quente e fria (BLACK, 1803 apud ROLLER, 1950, p. 23, tradução nossa).

Ilustrando o que disse, Black imagina alguns exemplos numéricos. Primeiro supõe uma mistura de certo volume de água a 100 °F com um mesmo volume de mercúrio a 150 °F. Nesse caso, a temperatura de equilíbrio não será 125 °F, como muitos pensam, e sim 120 °F. Rematando o seu raciocínio, ele afirma que embora a água tenha variado a sua temperatura em 20 °F e o mercúrio em 30 °F, a quantidade de calor que o mercúrio perdeu é a mesma que água ganhou⁴. Isso mostra que a mesma quantidade de calor tem mais efeito para aquecer o mercúrio do que igual volume de água. Assim, uma pequena quantidade é suficiente para aumentar a temperatura do mercúrio num mesmo número de graus do que da água. O que o leva a concluir que “[...] Mercúrio, portanto, tem menos capacidade para calor (se me é permitido usar essa expressão) que tem a água; uma menor quantidade de calor é necessária para elevar sua temperatura no mesmo número de graus” (BLACK, 1803 apud ROLLER, p. 24, tradução nossa). Percebe-se, em sua análise,

³ De acordo com Roller (1950, p. 24), Fahrenheit, aparentemente, nunca publicou um relato dessas experiências de mistura que Boerhaave lhe atribuiu.

⁴ Segundo Roller (1950, p. 24), o mesmo resultado foi obtido por Brook Taylor, em 1723, ao misturar, em experiências semelhantes, volumes desiguais de água fria e quente. Ele concluiu que a temperatura da mistura pode ser prevista com sucesso supondo-se que o calor ganho pelo líquido frio é igual ao perdido pelo líquido quente.

a utilização de duas hipóteses que estarão presentes em todas as suas explicações posteriores sobre os experimentos que envolvam misturas de líquidos, a saber:

[...] (i) **que o calor não é nem criado nem destruído durante a mistura e (i-i) que deve-se levar em conta qualquer calor perdido ou ganho do ar ou de outros corpos em contato com a mistura. A primeira dessas hipóteses é chamada de "princípio da conservação do calor."** Como veremos, no devido tempo, na época de Black, esse princípio parecia ser plausível, havendo a crença geral que o **calor era uma substância material**, tendo muitas das propriedades da matéria ordinária, e, desde o tempo dos gregos, a ideia de **que a matéria era incriável e indestrutível persistiu** [...] (ROLLER, 1950, p. 25, grifo nosso, tradução nossa).

A concepção do calor como uma substância estava em consonância com o conceito filosófico de conservação da matéria aceito na época. Nos experimentos com misturas, o calor não poderia ser criado nem destruído, a quantidade de calor permaneceria constante. A mesma suposição a respeito do “princípio de conservação do calor” já havia sido feita por Brook Taylor (1685-1731) em seus experimentos que envolviam misturas de volumes desiguais de água quente e fria. O complemento de Black foi generalizar a ideia para quaisquer misturas de diferentes líquidos e volumes. Desse modo, ele mostrou que, apenas para misturas de um mesmo líquido, a quantidade de calor necessária para aumentar ou diminuir de um mesmo valor a temperatura das substâncias envolvidas é diretamente proporcional às suas quantidades de matéria, ou aos seus pesos, ou, sendo os volumes iguais, às suas densidades.

Caso os corpos sejam de materiais diferentes, para uma mesma quantidade de calor recebida ou cedida, quem tiver a menor “*capacity for heat*” irá variar mais a sua temperatura. De acordo com Roller (1950, p. 27-28), Black não deixou em seus escritos a descrição de como encontrou a “*capacity for heat*” de algumas substâncias. Mas Robinson declara nas “*Notes and Observations by the Editor*” que esses experimentos foram realizados antes de 1765 junto com William Irvine (1743-1787), também seu antigo aluno e assistente. Antes da escolha do termo “*capacity for heat*”, eles utilizaram as expressões “*affinity for heat*”, “*faculty for receiving heat*” e “*appetite for heat*”. Todavia, vários outros nomes foram dados por outros cientistas até que o físico sueco Johann Carl Wilcke (1732-1796) o

designou por “*specific heat*”⁵, sendo o termo mais amplamente utilizado hoje em dia (ROLLER, 1950).

Outros estudos realizados por Black versaram sobre a mudança do estado físico de uma substância. Os seus resultados permitiram criticar, por exemplo, a crença difundida na época de que quando um corpo sólido se encontrava em sua temperatura de fusão uma pequena quantidade calor era suficiente para derretê-lo completamente, sendo necessário para o processo inverso apenas uma pequena diminuição da quantidade de calor. Se isso fosse verdade, seria observado, entre o inverno e o verão, um derretimento repentino nos países em que há gelo e neve nas montanhas, ocasionando grandes inundações. Mas isso não ocorre, as grandes massas de gelo e de neve levam um longo tempo para derreterem completamente. Em alguns países, nem toda a estação do verão é suficiente para que isso aconteça. Em suas palavras:

É evidente, portanto, que o gelo fundente recebe calor muito rápido, mas o único efeito desse calor é mudá-lo em água, que não é sensivelmente mais quente do que o gelo era antes. Um termômetro aplicado às gotas de água, imediatamente, como elas vêm do gelo fundente, irá indicar a mesma temperatura [32° F] como quando é aplicado ao gelo em si, ou, se houver alguma diferença, é muito pequena para merecer ser mencionada. Portanto, uma grande quantidade de calor que entra no gelo fundente não produz nenhum efeito diferente para dar-lhe a liquidez, sem aumentar o seu calor sensível, ela parece ser absorvida e escondida dentro da água, de modo a não produzir qualquer efeito detectável pela aplicação de um termômetro (BLACK, 1803 apud ROLLER, 1950, p. 33, grifo nosso, tradução nossa).

A fim de entender melhor essa absorção de calor pelo derretimento do gelo, ele fez o seguinte experimento. Utilizando dois recipientes idênticos, colocou no primeiro certa massa de gelo igual à de água que estava no segundo. O gelo estava na temperatura de 32 °F e a água na de 33 °F. Em seguida, por meio de um suporte, suspendeu os dois em uma grande sala vazia, permanecendo a temperatura do ambiente constante em 47 °F. Após meia hora, a temperatura da água subiu 7 °F, atingindo o valor de 40 °F. Entretanto, a massa de gelo precisou de 5 horas para se derreter quase toda, permanecendo a sua temperatura praticamente invariável.

⁵ Para Fox (1971) e Morris (1972) quem utilizou primeiro essa expressão, só que em francês, “*chaleur spécifique*”, foi o cientista português João Jacinto de Magalhães (1722-1790). Mais conhecido em seus escritos por Jean Hyacinthe de Magellan.

Somente depois de 10 horas e meia, toda a água proveniente da fusão alcançou a mesma temperatura final da água do outro recipiente, sofrendo uma variação de 8 °F. Desse modo, apesar de a massa de gelo receber 21 vezes mais quantidade de calor do que a de água, a sua temperatura aumentou de apenas 8 graus, em vez de $(40 - 33) \times 21$, ou 7×21 , ou 147 graus. A diferença de 139 graus “[...] tinha sido absorvida pelo gelo derretido e estava **escondida** na água em que foi mudado [...]” (BLACK, 1803 apud ROLLER, 1950, p. 34, grifo nosso, tradução nossa).

Black fez mais um experimento para justificar o seu argumento, dessa vez misturou em um copo de vidro certa massa de gelo a 32 °F com uma quantidade de massa de água, quase de mesmo valor, a 190 °F. Ele verificou que a temperatura final de equilíbrio foi de 53 °F. Se apenas uma pequena quantidade de calor tivesse sido utilizada para o derretimento do gelo, como muitos acreditavam, esperar-se-ia uma temperatura próxima de 111 °F. A temperatura encontrada foi muito abaixo, o que reforçava a sua hipótese de ser necessária uma grande quantidade de calor para fundir o gelo⁶. Assim ele conclui que:

*No processo normal de congelamento da água, a liberação e o aparecimento do **calor latente**, se me é permitido usar esses termos, é realizado a cada minuto, ou melhor, com tal progresso suave, que muitos podem encontrar dificuldade em percebê-lo [...] (BLACK, 1803 apud ROLLER, 1950, p. 37, grifo nosso, tradução nossa).*

Além dessas medidas do calor absorvido na fusão, ele realizou muitos outros experimentos de solidificação, vaporização e condensação. Os resultados confirmaram a sua conjectura de que nesses processos, além do “calor sensível”, uma grande quantidade de “calor latente” está envolvida, devendo ser considerada na análise dos fenômenos em que o “princípio da conservação de calor” fosse aplicado. Ao contrário do que muitos livros didáticos de Física divulgam (CABRAL; LAGO, 2002; GASPAR, 2000; MÁXIMO; ALVARENGA, 2000; RAMALHO JUNIOR, FERRARO; SOARES, 2007), Joseph Black não foi o primeiro a pesquisar o calor como substância. Roller (1950) apresenta alguns trechos em que Black faz algumas considerações sobre as teorias de calor existentes. Após iniciar afirmando que ainda não há um consenso sobre a natureza do calor, muito menos das

⁶ De acordo com Roller (1950, p. 37), nessa experiência, Black levou em consideração a capacidade de calor do recipiente contendo a mistura. Isso não foi feito por Brook Taylor, Fahrenheit, ou por qualquer outro experimentador anterior.

explicações dos fenômenos em que está presente, ele atribui a primeira tentativa de elucidação desse assunto a:

[...] Lorde Verulam [Francis Bacon, em 1620]; logo depois dele, o Sr. Boyle [Robert Boyle, em 1665 e 1673] fez várias dissertações sobre o calor, e Dr. Boerhaave, em suas palestras sobre a química [1732], esforçou-se para analisar o tema ainda mais, e para melhorar os dois autores anteriores.

A tentativa de Lorde Verulam pode ser vista em seu tratado De forma Calidi [1620], que ofereceu ao público um modelo da forma adequada de processar investigações em filosofia natural. Nesse tratado, ele enumerou todos os principais fatos então conhecidos sobre o calor e sua produção, e esforçou-se, depois de uma consideração cautelosa e madura desses, para formar uma opinião bem fundamentada de sua causa.

A única conclusão, no entanto, que ele foi capaz de tirar de todos os seus fatos é muito geral, ou seja, que calor é movimento. Essa conclusão foi baseada principalmente sobre a consideração dos vários meios pelos quais o calor é produzido, ou feito aparecer nos corpos, tais como a percussão com o ferro, o atrito de corpos sólidos, a colisão de pedra e aço (BLACK, 1803 apud ROLLER, 1950, p. 43, tradução nossa).

Em todos os exemplos citados por Bacon, o aumento da temperatura tinha como única fonte um impacto mecânico. Portanto, uma conclusão plausível era de que a força mecânica produziu no objeto um movimento que seria a causa de seu aquecimento. Black esclarece que esse eminente filósofo conseguiu um grande número de seguidores sobre esse assunto, contudo, seu parecer foi aprovado com duas diferentes modificações. A maioria dos filósofos ingleses entendeu esse movimento como sendo das pequenas partículas que compunham o corpo, mas:

*[...] a maioria dos filósofos franceses e alemães, e Dr. Boerhaave, sustentaram que o movimento que eles supõem compor o calor não é um tremor ou vibração das partículas do corpo quente em si, mas das **partículas de um sutil, altamente elástico, e penetrante fluido material, que está contido nos poros dos corpos quentes, ou interposto entre suas partículas, uma matéria que eles imaginam ser difundida por todo o universo, penetrando com facilidade os corpos mais densos**⁷. Alguns supõem que essa matéria, quando*

⁷ Morris (1972, p. 33) nos informa que a característica de movimento estava ausente nas teorias materiais de calor discutidas durante essa época. Isso resultou em um enfraqueci-

modificada de maneiras diferentes, produz luz e os fenômenos de eletrificação (BLACK, 1803 apud ROLLER, 1950, p. 44, grifo nosso, tradução nossa).

Essa concepção do calor como um “fluido sutil”, comum para muitos pensadores daquele tempo, havia sido aprimorada por William Cleghorn (1718-1754) em sua tese de doutorado apresentada na Universidade de Edinburgh, em 1779. De acordo com Black (1803 apud Roller, 1950, p. 44), ele concordava que o calor dependia da abundância desse “fluido sutil” elástico que se imaginava antes por outros filósofos a estar presente em todas as partes do universo e de ser a causa do calor. Mas esses outros filósofos tinham assumido, ou suposto, que o calor poderia ser explicado utilizando-se apenas das características pertencentes a essa matéria sutil, a saber: a sua grande elasticidade e a forte repulsão das partículas que a compõem. Cleghorn imaginou outra propriedade, uma forte atração entre as partículas dos outros tipos de matéria na natureza e as do “fluido sutil”. Assim:

[...] Ele supõe que os tipos normais de matéria consistem de partículas tendo uma forte atração, tanto uma para com a outra quanto para o calor, e que a matéria elástica sutil de calor é autorrepelente, as suas partículas possuem uma forte repulsão uma para com a outra, enquanto elas são atraídas pelos outros tipos de matéria, com diferentes graus de força [...].

Tal ideia da natureza do calor é a mais provável do que qualquer outra que eu conheço, e uma tentativa engenhosa de fazer uso dela foi publicada pelo Dr. Higgins, em seu livro sobre o ácido vegetal [qualquer ácido orgânico] e outros assuntos. É, no entanto, completamente uma suposição (BLACK, 1803 apud ROLLER, 1950, p. 44-45, tradução nossa).

O leitor deve ter percebido que até o momento essa substância não recebeu nenhum nome específico. Atribui-se ao famoso químico francês, Lavoisier, esse fato.

mento nas explicações de produção mecânica do calor, uma fragilidade que não estava presente nas teorias materiais de calor anteriores e que Conde Rumford explorou em sua tentativa fracassada de reviver uma teoria vibratória, em 1798. A maioria dos escritores simplesmente ignorou a questão do movimento do calor. Os poucos que argumentaram contra disseram apenas que pelo fato do calor ser matéria, não deve possuir uma propriedade que não é característica da matéria em geral.

III. A ascensão da teoria do calórico: algumas contribuições de Lavoisier

Antoine-Laurent de Lavoisier (1743-1794) foi filho de um advogado e rico negociante, teve uma excelente educação, estudando nas melhores escolas de Paris. Apesar de graduar-se em direito, em 1764, nunca exerceu a profissão, pois sempre foi um entusiasta das ciências, principalmente da química, preferindo dedicar-se aos experimentos nessa área (BELL, 2007; KOERTGE 2008). O que vai nos interessar, particularmente, são os seus estudos em que a natureza do calor está envolvida. De acordo com Morris (1972, p. 05), o primeiro artigo em que Lavoisier apresenta uma discussão detalhada de sua teoria de calor foi enviado à “*Académie Royale des Sciences*” francesa em setembro de 1777, e lido em julho de 1778, com o seguinte título: “*De la combinaison de la matière du feu avec les fluides évaporables, et de la formation des fluides élastiques aëriiformes*”⁸. Logo no início ele afirma:

Assumirei neste ensaio, e naqueles que o seguem, que o mundo que habitamos está cercado por todos os lados de um fluido muito sutil, que penetra, ao que parece, sem exceção, todos os corpos que o compõem; que esse fluido, que chamarei fluido ígneo, matéria do fogo, calor e luz, tende a atingir o equilíbrio em todos os corpos, mas não penetra todos com igual facilidade; finalmente, que esse fluido existe ora em um estado de liberdade, ora sobre forma fixa, e combinado com os corpos.

Essa opinião sobre a existência de um fluido ígneo, longe de ser nova, é, ao contrário, a da maioria dos antigos físicos, portanto, creio que se pode dispensar de relatar os fatos sobre os quais ela é baseada; a sequência do ensaio, aliás, lhe servirá de prova; pois, se eu notar que em todos os lugares ela concorda com os fenômenos, que em toda parte, ela explica tudo o que acontece nas experiências físicas e químicas, isso é quase uma demonstração (LAVOISIER, 1777, p. 420, tradução nossa).

Fica evidente, por essa passagem, que nessa época Lavoisier era indiferente à terminologia usada para designar o “fluido sutil”. Porém, em 1787, no “*Méthode de nomenclature chimique*”, em que ele foi um dos autores juntamente com Louis Bernard Guyton de Morveau (1737-1816), Jean-Henri Hassenfratz (1755-

⁸ Todas as obras completas de Lavoisier podem ser encontradas nos seguintes endereços: <<http://www.lavoisier.cnrs.fr/>> e <<http://moro.imss.fi.it/lavoisier/>>.

1827), Antoine-François Fourcroy (1755-1809), Pierre-Auguste Adet (1767-1848) e Claude Louis Berthollet (1748-1822), aparece a palavra “*calorique*”⁹ para representá-lo. A justificativa de sua criação, segundo os autores, é para distinguir o termo “*chaleur*”, como entendido ordinariamente, do princípio material que o causa (MORVEAU, 1787, p. 31). A concepção de Lavoisier sobre a natureza do calórico não foi a mesma do começo ao fim de suas pesquisas, conforme corrobora a seguinte afirmação de Morris (1972, p. 25, tradução nossa):

[...] Modificando suas declarações anteriores de que o calórico existia em dois estados, livre e combinado, ele concluiu que o calórico pode existir livre, aderente, ou combinado "molécula a molécula" com os constituintes elementares de outras substâncias. No entanto, é facilmente visto que o calórico é sempre mais ou menos aderente às substâncias, e 'que ele deve, portanto, existir em variadas degradações e estados intermediários, entre o estado de calórico perfeitamente livre e o combinado'. Combinado e livre, assim, marcam os limites de um continuum de relações possíveis.

Em seu discurso, ele considerava que as partículas da matéria ordinária são constantemente expostas a duas forças contrárias. A repulsão originária do fluido calórico e a atração proveniente da força gravitacional. A introdução ou a retirada do calórico altera o equilíbrio entre essas forças, tanto por alterar a quantidade de calórico como por separar mais as partículas, sendo essa a explicação de diversos fenômenos físicos e químicos. Segundo Morris (1972, p. 15, tradução nossa), Lavoisier acreditava que:

O equilíbrio entre as forças opostas do calor e da atração oferece um meio preciso para determinar a força dessa última, e espero que um conhecimento completo da atração permita um dia ao matemático calcular os fenômenos químicos da mesma maneira que agora calcula o movimento dos corpos celestes.

Por não ter sido capaz de fornecer uma demonstração da existência do calórico, Lavoisier admitiu, sob a pressão de seus críticos (e talvez de alguns partidários, como Laplace), que esse fluido sutil era apenas uma hipótese. Contudo, podia

⁹ Segundo Fox (1971, p. 6), há evidências de que o termo *calorique* era corrente no círculo de Lavoisier em 1784. A forma inglesa *caloric* apareceu na tradução que James St. John fez dessa obra, publicada em Londres em 1788. Após essa data, o termo rapidamente entrou em uso comum, embora algumas autoridades, como o matemático escocês e filósofo natural John Leslie, o rejeitaram.

ser considerado como uma verdade em muitos fenômenos, pela facilidade com que o conceito explicava os resultados dos experimentos (MORRIS, 1972, p. 31). Em linhas gerais:

[...] A teoria de Lavoisier do calor forma um razoável, facilmente visualizado, todo coerente. Um único quadro teórico abrange uma vasta gama de fenômenos de calor incluindo a expansão e a contração, mudanças de estado ou forma, o papel do calor como agente na promoção de novas combinações químicas, e mudanças de temperatura em reações químicas, especialmente a combustão e a respiração. Embora as características gerais da teoria de Lavoisier do calor persistissem praticamente inalteradas ao longo de quase todo o período da sua escrita química, houve uma sequência de desenvolvimento conceitual (MORRIS, 1972, p. 34-35, tradução nossa).

IV. Os postulados e o poder explicativo da teoria

A concepção sobre a natureza do calórico variava de cientista para cientista, mas o ponto de vista de Lavoisier não se diferenciava, em muitos aspectos, das teorias de outros reconhecidos caloristas como Herman Boerhaave (1668-1738), Pieter van Musschenbroek (1692-1761), Joseph Black (1728-1799), William Cleghorn (1718-1754), William Irvine (1743-1787) e Adair Crawford (1748-1795). De acordo com Fox (1971), Medeiros (2009) e Roller (1950), no conjunto, esses investigadores postularam as seguintes propriedades ao calórico:

- a) é uma substância material, um fluido elástico, constituído por partículas que se repelem fortemente;
- b) suas partículas são atraídas pelas partículas da matéria comum com intensidade diferente para cada substância e estado de agregação;
- c) pode ser sensível, espalhando-se pelos espaços vazios das substâncias até formar, por meio da atração que existe entre suas partículas e as da matéria ordinária, uma espécie de “atmosfera” ao redor dessas últimas. A temperatura de um corpo é diretamente proporcional à quantidade de calórico sensível que possui;
- d) pode ser latente, combinando-se com as partículas da matéria comum de forma semelhante ao que ocorre com as combinações químicas, ao contrário da justaposição que acontece com o calórico sensível;
- e) não pode ser criado ou destruído¹⁰;

¹⁰ De acordo com Roller (1950, p. 47), esse princípio da “conservação do calor” foi desde o início considerado como plausível. Entre os antigos gregos, já existia a ideia de que a maté-

f) têm um peso desprezível.

É muito importante, para a compreensão da teoria, verificar o seu poder explicativo em ação. Ponderamos não ser necessária uma análise pormenorizada das diversas explicações que cada “calorista” dava sobre os fenômenos físicos em que o calórico se fazia presente. Pois, apesar de não haver uma homogeneidade de pensamento, há uma concordância nos principais pontos. Assim, consideramos essencial apenas uma síntese das ideias mais importantes. Nesse caso, optamos por apresentar como esse assunto era tratado por alguma obra de divulgação científica de renome da época. O livro escolhido foi o “*Conversations on chemistry: in which the elements of that science are familiarly explained and illustrated by experiments*”, de Jane Marcet. Segundo Pulido e Silva (2011) e Baldinato (2009), ele foi considerado um dos textos de divulgação da ciência de maior credibilidade e mais lido do século XIX.

Jane Haldimand (1769-1858), conhecida como Jane Marcet, seu nome de casada, nasceu em Londres, mas o seu pai era um rico comerciante e banqueiro suíço. Em 1799, casou-se com Alexander Marcet (1770-1822), um químico e médico genebrês que fez a sua carreira científica na capital inglesa, destacando-se nos estudos da química aplicada à medicina, principalmente nas análises que permitiam a detecção de cálculos urinários e compostos presentes no sangue de diabéticos. De acordo com Baldinato e Porto (2009, p. 04):

Influenciada pelos interesses do marido e também pelo seu novo círculo de amigas, Jane tomou contato com as palestras de Humphry Davy, William Wollaston e vários outros divulgadores da ciência do período, e se encantou com as maravilhas daquelas ciências. Obviamente, acompanhar as argumentações lançadas em tais palestras não era tarefa fácil, mas Jane Marcet teve a iniciativa de procurar auxílio e, é claro, contava com a facilidade de encontrar bons mestres em seu convívio familiar, incluindo seu marido e amigos, com os quais obtinha as explicações que precisava. Ao reconhecer o interesse e a importância de tantos conceitos desconhecidos do público, Jane Marcet se sentiu impelida pelo desejo de divulgar essa instrução a outras pessoas, e foi incentivada pelo marido a escrever [...]

A sua carreira oficial como escritora começou em 1805 com a primeira edição do “*Conversations on Chemistry*”. O livro fez tanto sucesso que teve dez-

ria era indestrutível, desse modo, se o calor for matéria, deve ser indestrutível também. Mas, com o desenvolvimento do método de misturas e do conceito de calor latente, esse postulado tornou-se uma parte indispensável da teoria do calórico.

seis edições publicadas na Inglaterra, quatorze edições norteamericanas e duas traduções para o francês, uma destinada ao público francês e outra ao suíço (BALDINATO; PORTO, 2009, p. 05). O texto destinava-se à aproximação entre o público feminino e as ciências químicas, apesar disso, o seu mais célebre leitor foi o jovem Michael Faraday (1791-1867), no tempo em que ainda trabalhava como aprendiz de encadernador. O que pode ser comprovado pela citação abaixo:

[...] A Sra. Marcet foi uma amável amiga para mim, assim como deve ter sido para muitos dentre a raça humana. Eu fui acolhido na loja de um vendedor de livros e encadernador quando contava treze anos, em 1804, permaneci lá por oito anos, e durante a maior parte do tempo encadernava livros. Foi justamente nesses livros, nas horas após o trabalho, que encontrei os princípios da minha filosofia. Há dois em especial que me ajudaram; a Enciclopédia Britânica, pela qual adquiri minhas primeiras noções sobre eletricidade; e Conversations on Chemistry, da Sra. Marcet, que me proporcionou meus fundamentos naquela ciência. Acredito que eu tenha lido sobre o flogisto na Enciclopédia, mas o seu livro surgiu como uma luz em minha mente (FARADAY, 1858 apud BALDINATO; PORTO, 2009, p. 11).

A autora escreveu o livro sob a forma de diálogos entre três personagens: a professora, “Sra. B.”, e suas alunas, “Emily” e “Caroline”. Ao longo de dois volumes¹¹, as conversações abrangem diversos temas relacionados à química. Há tópicos específicos de discussões sobre a natureza do calórico, mas ele também aparece em outros momentos como parte integrante da racionalização de alguns fenômenos. Vamos principiar a nossa análise com a “*Conversation II: on light and heat or caloric*”. A certa altura do texto, a “Sra. B.” afirma que o calórico pode ser encontrado em uma variedade de formas ou modificações, mas as duas principais são o “calórico livre”, ou radiante, e o “calórico combinado”. Mais adiante, a “Sra. B.” realça o cuidado que se deve ter na utilização dos termos calor e calórico:

Sra. B.

Nenhuma das modificações do calórico deve ser corretamente chamada de calor, - o calor, estritamente falando, é a sensação produzida pelo calórico em corpos animados; essa palavra, portanto, na linguagem precisa da ciência, deve ser limitada a expressar a sensação. Mas o costume o tem adaptado, do mesmo modo, à matéria inanimada, e dizemos o calor de um forno,

¹¹ Nesse artigo, foi usada a 5ª edição, de 1817.

o calor do Sol, sem qualquer referência à sensação que eles são capazes de excitar.

*Foi para evitar a confusão que surgiu a partir da mistura de causa e efeito, que os químicos modernos adotaram a nova palavra **calórico para designar o princípio que produz calor**, limitam a palavra calor para a expressão da sensação, ainda que eles nem sempre estejam em conformidade com sua própria linguagem, uma vez que ainda, frequentemente, a empregam em referência às outras modificações do calórico que são bastante independentes da sensação (MARCET, 1817, p. 34, grifo nosso, tradução nossa).*

A dilatação dos corpos é o primeiro fenômeno físico explicado por “Sra. B.” utilizando-se da teoria do calórico. Em sua argumentação, esse fato é uma consequência da extrema sutileza do “calórico livre” que o permite permear quaisquer corpos, impondo um afastamento às suas partículas que ocupará um espaço maior do que antes. Assim:

Sra. B.

[...] Há uma luta contínua entre a atração da agregação e o poder expansivo do calórico, da ação dessas duas forças opostas, resultam todas as várias formas da matéria, ou graus de consistência, desde o sólido, o líquido e o estado aeriforme. E, conseqüentemente, descobrimos que a maioria dos corpos são capazes de passar de uma dessas formas para a outra, meramente em consequência de receberem quantidades diferentes de calórico (MARCET, 1817, p. 35, tradução nossa).

De acordo com esse raciocínio, as variadas capacidades de dilatação dos corpos, ou de um mesmo corpo em estados físicos desiguais, são atribuídas a não igualdade entre as densidades, que ocasiona resistências diferentes à ação do “calórico livre”. Para explicar como se dá o aquecimento e o resfriamento dos corpos, “Sra. B.” diz que:

Sra. B.

[...] Calórico livre sempre tende a difundir-se da mesma maneira, isto é, quando dois corpos são de diferentes temperaturas, o mais quente gradualmente divide o seu calor com o mais frio, até que ambos são trazidos à mesma temperatura. Assim, quando um termômetro é aplicado a um corpo quente, ele recebe calórico; quando a um frio, ele comunica parte do seu próprio calórico, e essa comunicação continua até que o termômetro e o

corpo atinjam a mesma temperatura (MARCET, 1817, p. 50, tradução nossa).

O leitor, assim como fez a personagem “Caroline”, pode se questionar como o calórico, que é um fluido sem peso, se equilibra entre corpos de diferentes temperaturas. A “Sra. B.” deu-lhe a seguinte resposta:

Sra. B.

[...] Este assunto é explicado melhor por uma teoria sugerida pelo Professor Prevost de Genebra, que agora é, creio, geralmente adotada. De acordo com essa teoria, calórico é composto de partículas perfeitamente separadas umas das outras, cada uma das quais se move a uma velocidade rápida num determinado sentido. Essas direções variam tanto quanto a imaginação pode conceber, cujo resultado é que há raios ou linhas dessas partículas que se deslocam com velocidades imensas em todas as direções possíveis. Calórico é, assim, universalmente difundido, de modo que quando qualquer parte do espaço está na vizinhança de outra que contém mais calórico, a parte mais fria recebe uma quantidade de raios caloríficos dessa última, suficiente para restaurar o equilíbrio da temperatura. Essa radiação não só pode ter lugar no espaço livre, mas se estende também aos corpos de todos os tipos. Assim, você pode supor que todos os corpos, de qualquer tipo, irradiam constantemente calórico: aqueles que são da mesma temperatura dão e absorvem quantidades iguais, de modo que nenhuma variação de temperatura é produzida neles, mas quando um corpo contém mais calórico livre do que o outro, a troca é sempre a favor do corpo mais frio, até que um equilíbrio seja alcançado [...] (MARCET, 1817, p. 52-53, tradução nossa).

Muitos cientistas, na primeira metade do século XIX, sustentavam o pensamento de que a luz e o calor eram entidades muito semelhantes. A consequência dessa concepção foi a realização de diversos experimentos independentes por William Herschel (1738-1822), Macedonio Melloni (1798- 1854), James David Forbes (1809-1868) – entre outros –, na tentativa de mostrar que o calor, assim como a luz, possuía as propriedades de reflexão, refração e polarização (BASSALO, 1992). Uma experiência sobre esse assunto, que chamou a atenção dos cientistas, foi a reflexão do “frio”, realizada por Marc-Auguste Pictet (1752-1825). O experimento consistiu em dispor dois espelhos esféricos de frente um para outro, separados por certa distância, de tal modo que os seus vértices e focos pertencessem a uma mesma reta. Em um dos focos foi colocado um bulbo de vidro cheio de gelo,

observando-se uma queda brusca na temperatura indicada por um termômetro quando o mesmo se posicionava sobre o outro foco.

A teoria de Pierre Prévost (1751-1839), apresentada por Marcet, foi concebida para explicar esse fenômeno, sendo depois generalizada para outras situações (EVANS; POPP, 1985). A “Sra. B.”, após essas considerações, não perdeu a oportunidade de sugerir as suas alunas que comprovassem esses resultados por elas mesmas, repetindo o experimento realizado pelo Professor Pictet. No restante da “*Conversation II: on light and heat or caloric*”, as personagens continuam fazendo divagações sobre a radiação e a reflexão do calórico, sem muito acrescentar ao que já foi dito anteriormente. Na “*Conversation III: continuation of the subject*”, começa um diálogo interessante sobre a condução de calor nos corpos. Para explicar a indagação de “Caroline” do motivo pelo qual um objeto aparenta ser mais frio do que outro a mesma temperatura, a “Sra. B.” responde que isso se deve a maior rapidez que o calórico é transmitido do seu corpo para o objeto. Pelo fato dos materiais possuírem diferentes resistências a passagem do calórico. Mas por que alguns corpos são melhores condutores de calor do que outros? Questionou “Emily”. Segundo a “Sra. B.”:

Sra. B.

Esse é um ponto não muito bem determinado. Especula-se que certa união ou aderência ocorre entre o calórico e as partículas do corpo por meio do qual ele passa. Se essa adesão for forte, o corpo retarda o calor, e o reparte com relutância e lentamente; se for leve, ele se propaga livremente e rapidamente. O poder condutor de um corpo é, portanto, inversamente com a sua tendência para se unir com o calórico (MARCET, 1817, p. 72).

Na sequência, as personagens discutem situações do cotidiano relacionadas à existência de bons e maus condutores de calor. Por exemplo, não é correto dizer que a roupa de lã nos aquece em um dia frio. Ela simplesmente impede que o calórico de nosso corpo escape de modo rápido, como faria normalmente. A conversa segue com algumas reflexões em torno das trocas de calor que ocorrem no meio ambiente, incluindo explicações do porquê um lago se congela apenas na superfície; do porquê a Terra, apesar de receber incessantemente calórico proveniente do Sol, possuir um clima agradável para se viver; do motivo da neve de montanhas muito altas não se derreter; e mais outros exemplos. Não entraremos em detalhes, pelo fato dessas explicações enfatizarem mais a densidade dos fluidos do que as propriedades do calórico.

Contudo, é digna de registro a observação feita pela “Sra. B.” de que há líquidos que contêm tão grande quantidade de calórico – consequentemente, as

suas partículas têm uma fraca atração de coesão – que são convertidos rapidamente em vapor, sem qualquer aquecimento, apenas aliviando-se a pressão sobre eles. Para corroborar essa afirmação, ela elaborou um experimento em que um frasco de éter aberto foi colocado em um recipiente de vidro, de tal modo que apenas um pequeno espaço foi deixado entre eles. Esse espaço foi preenchido com água, na mesma temperatura do éter, o recipiente foi fechado e o ar internamente sugado por meio de um dispositivo. Como resultado, para o espanto de “Caroline” e “Emily”, observou-se o éter entrar em ebulição e a água congelar. “Caroline” conseguiu perceber que a ebulição do éter deveu-se ao ganho de calórico da água que, por sua vez, congelou em consequência dessa perda. Mas “Emily” levantou o seguinte questionamento:

Emily.

Isso eu agora compreendo muito bem; mas se a água congela em consequência de ceder seu calórico para o éter, o equilíbrio de calor deve, nesse caso, ser totalmente destruído. No entanto, você nos disse que a troca de calórico entre dois corpos de mesma temperatura sempre é igual; como, então, é que a água, que era originalmente da mesma temperatura que o éter, cede calórico para que ela se congele e o éter ferva? (MARCET, 1817, p. 115, tradução nossa).

A pergunta foi muito perspicaz, pois se dois corpos estão na mesma temperatura, eles possuem idênticas quantidades de calórico livre. Logo, de acordo com a teoria do Professor Prévost, haveria um equilíbrio nas trocas de calórico, de tal maneira que as suas temperaturas não se modificariam. Mas, para a “Emily”, se a água congelou, a sua temperatura diminuiu, e se o éter entrou em ebulição, a sua temperatura aumentou. Contrariando o equilíbrio previsto. Para esclarecer essa dúvida, a “Sra. B.” repetiu o experimento, colocando um termômetro na água e outro no éter. Novamente, para a surpresa de suas alunas, o inesperado aconteceu. A indicação da temperatura nos termômetros diminuiu no mesmo ritmo, marcando, ao final do processo, valores iguais. Após ser questionada sobre o que aconteceu, eis a resposta da “Sr. B.”:

Sra. B.

Eu não posso satisfazer a sua curiosidade no momento, pois antes que possamos tentar explicar esse aparente paradoxo, é necessário se familiarizar com o assunto de CALOR LATENTE: assim, temos de adiar até a nossa próxima conversa (MARCET, 1817, p. 115-116, tradução nossa).

Finalizando essa conversação, a “Sra. B.” ainda responde a uma pergunta de “Emily”. Se a água, assim como o éter, poderia ferver sem precisar ser aquecida. A sua explicação é esclarecedora:

Sra. B.

Sem dúvida. Você deve lembrar que sempre há duas forças para superar, a fim de fazer um líquido ferver ou evaporar; a atração de agregação e o peso da atmosfera. No cume de uma montanha alta (como o Sr. De Saussure averiguou no Monte Blanc) muito menos calor é necessário para fazer ferver a água, do que na planície, onde o peso da atmosfera é maior. De fato, se o peso da atmosfera for inteiramente removido, por meio de uma boa bomba de ar, e se a água for colocada no receptor esvaziado, ela irá evaporar tão rápida, por mais frio que possa estar, dando-lhe uma aparência de ebulição em sua superfície [...] (MARCET, 1817, p. 116-117, tradução nossa).

A próxima conversa tem o título “*Conversation IV: on combined caloric, comprehending specific and latent heat*”. Inicialmente, a “Sra. B.” discute com as suas alunas a respeito da capacidade dos corpos em armazenar calórico. Sem mencionar o nome de Black, ela faz reflexões similares ao que ele fez, induzindo “Caroline” e “Emily” a chegarem à conclusão de que corpos feitos com materiais diferentes, ainda que tenham massas idênticas, não apresentam igual capacidade para acumular o calórico. Da mesma forma que um recipiente cheio de bolinhas de gude não tem a mesma capacidade de ser preenchido com areia do que outro idêntico, mas cheio com pedras de vários formatos. Todavia, aqui surge uma aparente contradição, percebida por “Emily”.

De acordo com o raciocínio empreendido pela “Sra. B.”, dois corpos de mesma massa, mas com diferentes capacidades para reter o calórico, devem requerer quantidades diferentes desse fluido para aumentarem as suas temperaturas de igual valor. Se os corpos tiverem em equilíbrio térmico, eles possuem quantidades idênticas de “calórico livre”. Nesse caso, como a temperatura final será a mesma, se a quantidade recebida de calórico foi diferente? O corpo que acolheu mais calórico deveria ter a sua temperatura elevada de maior grau. A “Sra. B.” elucida essa contestação com o seguinte argumento:

Sra. B.

O calórico que é empregado no preenchimento da capacidade de um corpo não é calórico livre, mas é aprisionado no corpo, sendo, portanto, imperceptível: podemos sentir apenas o calórico que o corpo divide, não aquele que ele retém (MARCET, 1817, p. 125, tradução nossa).

Em outras palavras, nem todo o calórico recebido por um corpo fica na forma “livre”, parte dele é “combinado” com as suas partículas. Ao colocarmos a nossa mão sobre um corpo quente, sentimos apenas o “calórico livre” que é transferido, o mesmo acontece com o termômetro. Deixemos as personagens completarem o raciocínio:

Caroline.

Eu começo a entender: mas confesso que a ideia de calor insensível é tão nova e estranha para mim, que requer algum tempo para torná-la familiar.

Sra. B.

Chame-a calórico insensível, e a dificuldade aparecerá muito menos formidável. Na verdade, é uma espécie de contradição chamá-lo de calor, pois quando assim situado ele é incapaz de produzir essa sensação. No entanto, essa modificação do calórico é comumente chamada de CALOR ESPECÍFICO.

Caroline.

Mas certamente teria sido mais correto tê-lo chamado de calórico específico.

Emily.

Eu não entendo como o termo específico aplica-se a essa modificação do calórico?

Sra. B.

Ele expressa a quantidade relativa de calórico que diferentes espécies de corpos, de mesmo peso e temperatura, são capazes de conter. Essa modificação também é frequentemente chamada de capacidade de calor, um termo talvez preferível, pois explica melhor o seu próprio significado [...] (MARCET, 1817, p. 126-127, tradução nossa).

Imagine o leitor dois corpos de igual massa e temperatura, mas feitos com materiais diferentes. Nesse caso, como a temperatura é idêntica, ambos possuem certa quantidade “Y” de “calórico livre”. Vamos supor que um deles, após receber uma quantidade “5X” de calórico, teve a mesma variação de temperatura do que o outro que recebeu uma quantidade “7X”. Ao final do processo, eles não podem ter ficado, respectivamente, com “Y + 5X” e “Y + 7X” de “calórico livre”, pois eles continuam em equilíbrio térmico. Assim, ambos possuem “Y + Z” de “calórico livre”. A diferença “5X – Z”, para o primeiro corpo, e “7X – Z”, para o segundo, é

o que “Caroline” denominou de “*specific caloric*”. Vejamos, agora, a definição que a “Sra. B.” dá para o “calor latente”:

Sra. B.

Ele é outra modificação do calórico combinado, que é tão análogo ao calor específico, que a maioria dos químicos não fazem distinção entre eles; mas o Sr. Pictet, em seu Ensaio sobre o Fogo, tão claramente os discriminou, que estou induzida a adotar seu ponto de vista sobre o assunto. Portanto, chamamos de calor latente a porção do calórico insensível que é empregue na mudança de estado dos corpos; isto é, na conversão de sólidos em líquidos, ou líquidos em vapor. Quando um corpo altera o seu estado de sólido para líquido, ou de líquido para vapor, a sua expansão ocasiona um aumento súbito e considerável da capacidade de calor, em consequência, ele absorve imediatamente uma quantidade de calórico, o qual se torna fixada no corpo que é transformado; e, como é perfeitamente escondido dos nossos sentidos, obteve o nome de calor latente (MARCET, 1817, p. 133-134, tradução nossa).

“Caroline” sugere mudar o termo “*latent heat*” para “*latent caloric*”, pois a expressão “*heat*” se refere à sensação corporal devida à transferência de “calórico livre” para o nosso corpo. Mas, de acordo com a “Sra. B.”:

Sra. B.

Essa modificação do calor foi descoberta e nomeada por Dr. Black, muito antes que os químicos franceses introduzissem o termo calórico, e não devemos presumir alterá-la, pois ela ainda é utilizada por químicos muito melhores do que nós mesmos. E, além disso, você não supõe que a natureza do calor é alterada pelas diversas vezes que está sendo modificado: se calor latente e calor específico não excitam as mesmas sensações que o calórico livre, é devido a estarem em um estado de confinamento, que os impedem de agirem sobre os nossos órgãos, e, conseqüentemente, tão logo eles estejam livres do corpo em que estavam aprisionados, eles retornam ao seu estado de calórico livre (MARCET, 1817, p. 134, tradução nossa).

Pela última fala da “Sra. B.”, fica claro que o calórico é apenas um, podendo estar no corpo de modo “combinado” – específico/latente – ou “livre”. No entanto, é possível o “calórico combinado” tornar-se “livre”, e vice-versa. Para elucidar a diferença que existe entre o “calor específico” e o “latente”, a “Sra. B.” fez um experimento em que uma lâmpada aquecia certa quantidade de neve até vaporizá-la. Com o auxílio de um termômetro, as alunas observaram que, quando a

neve estava derretendo, a temperatura não variava. A “Sra. B.” explicou que isso aconteceu por que à medida que o gelo derrete, o calórico torna-se latente no líquido recém-formado, portanto, não pode aumentar a sua temperatura. Após estar tudo derretido, o termômetro voltou a subir, mas num ritmo menor, embora a lâmpada continuasse aquecendo do mesmo modo. Segundo a “Sra. B.”, pelo fato do “calor específico” da água ser maior do que do gelo, uma parte maior do calórico recebido fica armazenada na forma “combinada”. Nesse caso, é necessário fornecer mais calor – mais tempo de aquecimento – para elevar a sua temperatura de um mesmo valor do que antes, portanto, o termômetro sobe mais lento. Esse fato mostra que um corpo sólido aumenta a sua capacidade para o calor ao se transformar em um fluido. O experimento prosseguiu e novamente a temperatura fica estacionária na passagem da água líquida para vapor. Dessa vez, não há dificuldade por parte das alunas em utilizar o conceito de “calor latente” para explicar o ocorrido. A “Sra. B.” afirma que ao reverter o processo, condensar o vapor em água e, em seguida, convertê-la em gelo, o “calor latente” reaparecerá, por completo, na forma de “calórico livre”. Com a finalidade de mostrar isso, ela conduziu o vapor, por meio de um tubo, a um recipiente com água fria. “Emily” notou que o vapor aquecia a água com grande rapidez. A “Sra. B.” prontamente replicou:

Sra. B.

Isso é porque ele não se limita a transmitir o seu calórico livre à água, mas também seu calor latente. Esse método de aquecimento de líquidos tornou-se vantajoso em vários estabelecimentos econômicos. As cozinhas a vapor, que estão se popularizando, utilizam do mesmo princípio. O vapor é conduzido de modo semelhante, por meio de um tubo, a vários recipientes que contêm os mantimentos a serem cozidos, onde ele comunica a eles seu calórico latente e retorna ao estado de água [...] (MARCET, 1817, p. 140, tradução nossa).

Continuando com a experiência, a “Sra. B.” preparou uma mistura de sal e neve para congelar a água. Ao entrar em contato com o sal, a neve começou a derreter rapidamente. Mesmo antes de estar totalmente líquida, “Caroline” verificou que a mistura apresentava uma sensação térmica mais fria do que a do gelo. Vejamos como a “Sra. B.” explicou esse intrigante fenômeno:

Sra. B.

A causa do frio intenso da mistura pode ser atribuída à mudança do estado sólido para um estado fluido. A união da neve e do sal produz um novo arranjo de suas partículas, por consequência, elas se tornam líquidas; a quantidade de calórico necessária para efetuar essa alteração é pega pela mistu-

ra em qualquer lugar que puder ser obtida. Essa avidéz da mistura para o calórico, durante sua liquefação, é tal, que converte parte de seu próprio calórico livre em calor latente, e é assim que a sua temperatura é reduzida (MARCET, 1817, p. 143, tradução nossa).

Na sequência, ao imergir um copo de vidro com água na mistura de sal e neve, a indicação da temperatura no termômetro, que estava dentro do copo, decresceu até ficar abaixo do ponto de congelamento da água, e ainda assim ela não se solidificou. Provocando um novo frenesi entre as alunas. Pacientemente, a “Sra. B.” esclareceu que isso sempre acontece quando a água é congelada de modo lento, sem ser agitada. Mas, logo em seguida, a temperatura subiu ao ponto de congelamento. Não foi difícil para “Caroline” compreender que essa ascensão teve a sua origem na transformação do “calor latente” da água em “calórico livre”. Todavia, ela foi temporária, durou apenas o tempo necessário para a retirada do “calor latente”. Depois a temperatura diminuiu novamente até se igualar com a temperatura da mistura de sal e neve. Nesse ponto, “Emily” se sente encorajada para explicar o experimento em que o éter ferveu e a água congelou, com a temperatura de ambos decaindo no mesmo ritmo. A seu ver, o “calor latente”, que a água cedeu no congelamento, foi imediatamente absorvido pelo éter, durante a sua conversão em vapor. Entretanto, o seu raciocínio foi corrigido pela “Sra. B.”:

Sra. B.

Mas isso só conta parcialmente para o resultado da experiência, que continua a ser explicada por que a temperatura do éter, enquanto no estado de ebulição, é trazida para baixo da temperatura de congelamento da água. É por causa do éter, durante a sua evaporação, reduzir a sua própria temperatura, na mesma proporção que a da água, por meio da conversão de seu calórico livre em calor latente: de modo que, embora um líquido ferva e o outro congele, as suas temperaturas permanecem em um estado de equilíbrio (MARCET, 1817, p. 149-150, tradução nossa).

Podemos encerrar por aqui o exame dessa memorável obra, pois conseguimos abranger os fenômenos térmicos mais discutidos pelas pesquisas na área de ensino de Física que têm como temática o conceito de calor, a saber: a natureza do calor; a relação entre o calor e a temperatura; a dilatação dos corpos; a propagação do calor; a mudança de estado físico; o “calor sensível” e o “calor latente”. Procuramos, na medida do possível, não fazer juízo de valor sobre o que estava sendo discutido. A nossa intenção foi compreender, com mais profundidade, a lógica dos argumentos que garantem à teoria do calórico um poder explicativo mais refinado.

No entanto, ela não passou incólume pelo período de 1760 a 1850. Além de algumas divergências entre os próprios caloristas, ela sofreu ataques dos defensores da teoria dinâmica do calor, que, assim como a sua adversária, teve várias versões (FOX, 1971; ROLLER, 1950). Nessa época, entre os principais opositores ao conceito de calor como substância, sem dúvida nenhuma, o nome mais lembrado é o do Conde Rumford (BROWN, 1949; FOX, 1971; MEDEIROS, 2009; MULLER, 2007; ROLLER, 1950). Desse modo, ele será o representante dessa vertente teórica em nossa análise. Objetivamos exemplificar quais foram as suas principais críticas direcionadas à teoria do calórico, bem como mostrar como elas foram respondidas.

V. Críticas à teoria do calórico: o caso do Conde Rumford

Benjamin Thompson (1753-1814) nasceu em Massachusetts, nos Estados Unidos. Aos dezenove anos casou-se com uma viúva rica, indo morar em sua casa na cidade de Rumford. Na “Guerra da Independência dos Estados Unidos da América”, foi espião dos ingleses. Quando as tropas britânicas foram forçadas a abandonar Boston, ele saiu junto com os soldados, deixando para trás a esposa e uma filha. Passou a servir nas tropas inglesas como tenente coronel, sua função na prática era de um excelente engenheiro. Dentre as muitas coisas que ajudou a planejar, estavam a construção e o aperfeiçoamento das armas de fogo. Mas a sua estadia na Inglaterra não durou muito tempo. Acusado de vender segredos de guerra para a França, foi aconselhado pelo Rei George III, de quem era amigo, a ir para o continente. Desse modo, ele se estabeleceu em Munique, ficando a serviço de Karl Theodor, o Eleitor da Baviera. As suas contribuições à Física nasceram todas da preocupação com o calor e com os fenômenos a ele relacionados, frutos da preocupação com a produção de armamentos. Na Baviera atuou como um eficiente engenheiro militar e administrador, recebendo o título de Conde. Escolheu o nome de Rumford em homenagem à cidade onde a sua primeira esposa nasceu. A sua segunda esposa foi a viúva de Lavoisier, morto na guilhotina durante a Revolução Francesa, mas o casamento não durou muito, devido às brigas do casal (MEDEIROS, 2009).

Ao trabalhar na perfuração de canhões na Baviera, Conde Rumford teve a intuição sobre a natureza dinâmica do calor, a sua mais famosa contribuição à ciência. Diferente do que se divulgam nos livros didáticos, seus experimentos não foram decisivos para provar que o calórico não existia. Ele foi durante algum tempo um fiel adepto dessa teoria substancialista, contribuindo, inclusive, para o seu desenvolvimento. Os seus trabalhos apenas lançaram, com bastante vigor, a conjectura de que o calor deveria ser uma forma de movimento, fornecendo vários

indícios que nortearam o caminho daqueles que o seguiram nesse pensamento (MEDEIROS, 2009). Encontramos em Roller (1950) uma boa fonte de consulta de suas principais ideias, com excertos originais de algumas de suas obras. O primeiro texto analisado é um artigo publicado no “*Philosophical Transactions of the Royal Society*”, em 1799, com o título “*An inquiry concerning the weight ascribed to heat*”. No parágrafo inicial do artigo, ele afirma que as diversas experiências que foram feitas, até aquele momento, com o objetivo de determinar o peso do calórico, estão sujeitas a muitos erros. Não apenas por causa das imperfeições dos instrumentos utilizados, mas também por causa dos efeitos das correntes de ar causadas pelo calor ou pelo frio do corpo que é colocado na balança. Assim, ele relata que:

É um tempo considerável desde que eu comecei a meditar sobre esse assunto, fiz muitas experiências com vista à sua investigação; nesses experimentos, tomei todas as precauções para evitar erros dos quais conheço as suas diversas fontes, um desejo sincero de averiguar um fato que eu julguei ser importante de ser conhecido me inspirou; mas, apesar de todas as minhas pesquisas, convenço-me, mais e mais, que um corpo não adquire peso adicional ao ser aquecido, ou melhor, que o calor não tem qualquer efeito sobre os pesos dos corpos, tenho sido tão sensível à delicadeza da averiguação que estou há muito tempo com receio de formar uma opinião definitiva sobre o assunto (THOMPSON, 1799 apud ROLLER, 1950, p. 50, tradução nossa).

A intenção de Rumford, por essa época, era investir contra a teoria do calórico em seus pontos mais frágeis. Nesse caso, ele entrou no debate sobre a questão do peso dessa substância. Muitos experimentos confirmaram uma alteração no peso dos corpos quando eram aquecidos ou resfriados. Outros mostraram nenhuma modificação. Dúvidas pairavam, de ambos os lados, sobre a qualidade das medidas efetuadas. Desse modo, ele apresenta, ao longo do artigo, todas as precauções que tomou para obter os resultados mais precisos, chegando a seguinte conclusão:

Creio que podemos concluir com segurança que TODAS AS TENTATIVAS PARA DESCOBRIR QUALQUER EFEITO DO CALOR SOBRE OS PESOS APARENTES DOS CORPOS SERÃO INFRUTÍFERAS (THOMPSON, 1799 apud ROLLER, 1950, p. 59, tradução nossa).

Contudo, para muitos outros cientistas e filósofos do século XVIII, essa não era considerada uma grave objeção à teoria. Havia uma convicção de que uma pequena classe de "substâncias imponderáveis", que além do calórico incluía a eletricidade, a luz e o magnetismo, não estava sujeita a atração gravitacional, pelo menos não era perceptível, ao contrário da matéria comum. Mas, segundo Roller (1950, p. 61, tradução nossa):

Embora os experimentos de Rumford sobre o peso do calor não pudessem ter sido completamente conclusivos, sem dúvida foram os melhores de todos os experimentos realizados sobre esse assunto. Na verdade, o presente artigo tem como característica a descrição de uma técnica experimental magnífica, sendo um exemplo clássico do que a investigação científica tem de melhor.

Apesar de esse elogio, os experimentos mais comentados realizados pelo Conde Rumford foram sobre o aquecimento dos canhões quando perfurados. Ele relatou os seus achados em um artigo intitulado "*An inquiry concerning the source of heat which is excited by friction*", que foi lido em uma reunião da *Royal Society*, em janeiro de 1798, e posteriormente publicado no *Philosophical Transactions*, no mesmo ano. As circunstâncias que o inspiraram a executar esses experimentos foram assim descritas por ele:

Foi por acaso que fui levado a fazer as experiências que estou prestes a dar contas, embora não sejam talvez de importância suficiente para merecer uma introdução tão formal, não posso deixar de me elogiar, pois elas são curiosas de ser pensadas em vários aspectos, dignas da honra de serem dadas a conhecer à Royal Society.

Estava envolvido recentemente na superintendência da perfuração de canhões nas oficinas do arsenal militar de Munique, fiquei impressionado com o grau muito considerável de calor [temperatura] que uma arma de bronze adquire em um curto espaço de tempo em que está sendo perfurada, e ainda com a temperatura maior (muito mais elevada do que a da água em ebulição, como encontrada por experiência) das lascas metálicas separadas do canhão pela broca.

Quanto mais eu meditava sobre esses fenômenos, mais eles me pareciam ser curiosos e interessantes. Uma investigação completa deles parecia prometer dar uma compreensão mais avançada sobre a natureza oculta do calor, permitindo-nos formar algumas conjecturas razoáveis a respeito da existên-

*cia, ou inexistência, de um fluido ígneo*¹² – um assunto sobre o qual as opiniões dos filósofos de todas as épocas têm sido muito divididas (THOMPSON, 1798 apud ROLLER, 1950, p. 63, tradução nossa).

O fato de o calor poder ser produzido por atrito era conhecido desde os tempos mais remotos. A contribuição de Rumford foi perceber que um estudo mais profundo sobre o motivo de uma grande quantidade de calor ser causada pela perfuração dos canhões poderia lançar uma nova luz sobre a sua natureza oculta. As suas reflexões tinham como objetivo descobrir qual era a origem dessa imensa quantidade de calor. Em sua primeira ação de trabalho, ele pesquisou se o calor produzido durante a perfuração do canhão, deriva ou não das lascas do metal, pois essa era a resposta dada por alguns caloristas (BROWN, 1949; FOX, 1971; ROLLER, 1950). Esses adeptos da teoria substancialista do calor afirmavam que parte do “calor latente” do material era liberada durante a abrasão, juntamente com as lascas metálicas. De tal forma que a “capacidade para o calor” – ou o “calor específico” – das lascas metálicas tornava-se menor. Segundo Roller (1950, p. 64), aparentemente, ninguém tinha feito experimentos para verificar se essa diferença nos calores específicos realmente existia. Após descrever em detalhes os procedimentos adotados, Rumford concluiu que não houve uma alteração significativa nos calores específicos. No entanto:

Estritamente falando, a demonstração de Rumford de que as lascas metálicas e a parte maior têm o mesmo calor específico, à mesma temperatura, não constituía uma refutação completa da explicação dos caloristas de como o calor era desenvolvido por atrito. Mostrar que os dois calores específicos são iguais pode ter sido necessário, mas não foi suficiente [...] (ROLLER, 1950, p. 66, tradução nossa).

Isso por que a hipótese de que os calores específicos eram diferentes – proposta por William Irvine e admitida pelos seus seguidores – não implicava, de modo conclusivo, na diferença entre os calores latentes. De outro modo, ainda poderia ser dito que, embora as lascas metálicas e o metal do objeto de onde elas vieram possuíssem os mesmos calores específicos à mesma temperatura, o metal do objeto continha mais “calor latente” do que as lascas. Desse modo, a diferença teria sido liberada na forma de “calórico livre” durante a abrasão (FOX, 1971;

¹² Segundo Roller (1950, p. 63), na literatura da época de Rumford, os termos “fluido ígneo”, “fluido de calor”, “matéria de calor”, “calórico” e “calor” eram usados indistintamente.

ROLLER, 1950). Mas, para Rumford, era evidente que o calor produzido não poderia ser atribuído às lascas metálicas.

Entretanto, não satisfeito com esses estudos, ele elaborou outro experimento. Com a ajuda de dois cavalos, um dispositivo era colocado em rotação forçando um cilindro maciço de metal, com uma massa de 113 lb, a girar pressionado a uma broca sem corte. Para evitar, na medida do possível, a perda de qualquer parte do calor que foi gerada no experimento, o cilindro foi coberto com um revestimento de flanela grossa. No início, a temperatura do ar na sala, como também a do cilindro, era de 60 °F. Depois de 30 minutos, cessado o movimento quando o cilindro tinha realizado 960 voltas sobre seu eixo, um termômetro de mercúrio foi introduzido em um buraco feito na lateral do cilindro, subindo, quase instantaneamente, para 130 °F. A quantidade de calor que fez a temperatura do cilindro variar era suficiente para fazer derreter 6,5 lb de gelo, porém, apenas uma pequena porção de 837 g de pó metálico foi recolhida no final do processo. Considerando que o “calor específico” do pó metálico é igual ao do material do cilindro, como Rumford já havia verificado, para 837 g de pó metálico ter fornecido uma quantidade calor capaz de variar em 70 °F a temperatura de 113 lb do cilindro, a sua temperatura teria que diminuir o valor absurdo de 66.360 °F. Obviamente, isso não foi observado. Em suas palavras:

Encontrando muitas razões para concluir que o calor gerado ou excitado, como eu preferiria escolher para expressá-lo – nesses experimentos, não foi fornecido à custa do calor latente ou calórico combinado do metal, fui em frente com as minhas interrogações e me esforcei para descobrir se o ar contribuía qualquer coisa, ou não, na geração dele (THOMPSON, 1798 apud ROLLER, 1950, p. 73, tradução nossa).

Rumford afirmou não ter visto, ao longo do experimento, nenhum sinal de reação química relacionada com a presença do ar que pudesse ter ocasionado o calor. Mas, para não pairar dúvidas, ele decidiu refazer a experiência de tal maneira que o ar fosse retirado – por meio de um mecanismo com um êmbolo – da superfície de contato entre a broca e o cilindro. O resultado não foi muito diferente do anterior. Não satisfeito, ele encerrou todo o aparato em uma caixa cheia d’água gelada a 60 °F. Para a sua surpresa, depois de duas horas e meia, toda a água havia entrado em ebulição, atingindo a temperatura de 210 °F. Antes de emitir o seu parecer final no artigo, ainda restava mais uma consideração a ser feita, conforme ele esclarece na passagem abaixo:

Resta-me dar conta de mais um experimento que foi feito com esse aparato. Descobri, pelo experimento N^o. 1, quanto calor foi gerado quando o ar teve livre acesso às superfícies metálicas que foram friccionadas juntas. Pelo experimento N^o. 2, verifiquei que a quantidade de calor gerada não foi sensivelmente diminuída quando o ar não teve acesso livre. O experimento N^o. 2 indicou que a geração do calor não foi impedida ou retardada mantendo-se o aparato imerso em água. Mas, nessa última experiência mencionada, a água, embora rodeando o cilindro metálico oco de todos os lados, externamente, não foi permitida de entrar na cavidade da perfuração (sendo impedida pelo pistão) e, conseqüentemente, não entrou em contato com as superfícies metálicas onde o calor foi gerado. Para ver quais os efeitos que seriam produzidos dando a água livre acesso a essas superfícies, fiz agora o próximo experimento (THOMPSON, 1798 apud ROLLER, 1950, p. 78, tradução nossa).

Quanto à produção de calor, não houve nada de novo em relação ao que já foi verificado nos experimentos anteriores. Rumford menciona apenas que ficou surpreendido com a pouca diferença no barulho feito pela broca em atrito com o fundo do cilindro. Esse ruído era insuportável tanto com as superfícies em contato com o ar quanto com a água. Finalizada essa quarta e última experiência, ele chega à seguinte conclusão sobre a origem da imensa quantidade de calor que surge na fricção de duas superfícies metálicas:

No debate sobre esse assunto, não deve ser esquecido de considerar que, em muitas circunstâncias notáveis, a fonte de calor gerado pelo atrito nessas experiências pareceu ser inesgotável.

É desnecessário acrescentar que qualquer coisa que qualquer corpo isolado, ou sistema de corpos, pode continuar a fornecer sem limitação, não pode possivelmente ser uma substância material, parece-me ser extremamente difícil, se não impossível, formar qualquer ideia distinta de qualquer coisa capaz de ser excitada e comunicada na forma em que o calor foi excitado e comunicado nessas experiências, a não ser o MOVIMENTO (THOMPSON, 1798 apud ROLLER, 1950, p. 79-80, tradução nossa).

Sabidamente, Rumford concentrou o seu ataque final no princípio basilar para os caloristas, a saber: o princípio da conservação do calórico. O conjunto dos experimentos mostrou que havia uma fonte inesgotável de calor por atrito. Se o calórico fosse retirado de um objeto por fricção, como alegavam os caloristas, deveria haver um estágio em que todo o calórico seria esgotado. Mas isso não foi

observado. Dessa maneira, se um objeto isolado pode continuar a fornecer calor, indefinidamente, então o calor não pode ser uma substância material. Por consequência, a origem do calor deve ser atribuída ao movimento das partículas dos materiais que se atritavam. No entanto, Rumford deixa claro que não sabe como ou por que meios esse movimento produz e faz o calor se propagar. Em contrapartida, segundo Roller (1950, p. 80), um defensor da teoria do calórico questionou a afirmação de que a fonte de calor nesses experimentos por atrito era inesgotável. Ele argumentou que a quantidade de calor observada foi apenas uma pequena fração da quantidade total de calor que o metal possuía. Além disso, outras explicações foram sugeridas, como exemplifica Roller (1950, p. 67, tradução nossa):

Um defensor da teoria do calórico afirmou, em 1830, que nenhum dos experimentos acima mencionados sobre os calores específicos teve qualquer significado para determinar se o calor deriva ou não durante a perfuração das lascas de metal. Ele sustentou que esse calor poderia ter vindo não das lascas, mas a partir da camada de metal da parte maior em contato com a broca. A enorme força que essa camada foi submetida tenderia a comprimí-la e aumentar a sua densidade; há muito tempo já se sabia que quando qualquer pedaço de metal é comprimido, como ao martelá-lo, calor é desenvolvido. Esse calor, o calorista disse, foi espremido para fora do metal como resultado da compressão. Assim, na perfuração do canhão, sucessivas camadas frescas de metal do canhão foram expostas à compressão como resultado da abrasão, portanto, cada camada em sucessão libertou uma determinada quantidade de calor. Se quaisquer alterações na densidade ou no calor específico ocorreram, estariam, desse modo, limitadas às superfícies das camadas da grande massa de metal, e isso Rumford não testou.

VI. O declínio da teoria do calórico

O leitor deve ter percebido que os argumentos de Rumford não foram suficientes para por fim à teoria do calórico, como apregoam muitos livros didáticos de Física (CABRAL; LAGO, 2002; GASPAR, 2000; MÁXIMO; ALVARENGA, 2000; RAMALHO JUNIOR, FERRARO; SOARES, 2007). A citação de Fox (1971, p. 104, tradução nossa), a seguir, é muito nítida sobre esse ponto:

Na década de 1800-1810, a teoria do calórico foi provavelmente mais amplamente aceita do que em qualquer outro momento de sua história. O questionamento da materialidade do calor, que tinha sido realizado na virada do século, não só por Rumford, mas também, como veremos, por Humphry

Davy e Thomas Young, teve resultado extremamente pequeno, e a visão de que '[calor] é quase universalmente considerado o efeito de um fluido' foi a que a maioria dos homens de ciência considerou aceitável em 1800, em 1810, ou mesmo em 1815, tanto quanto tinha sido em 1797, quando apareceu na terceira edição da Encyclopaedia Britannica, pouco antes de Rumford, Davy, e Young exporem as suas críticas [...].

Outro detalhe, muito bem lembrado por Medeiros (2009), é que a teoria dinâmica do calor também sofria ataques dos caloristas. Por exemplo, a dificuldade que ela tinha em explicar como o calor se propagava no vácuo. Ou seja:

[...] derrubar uma dessas teorias não era nada simples. As pessoas costumavam pensar que bastava colocar um defeito em uma teoria para que ela caísse. Mas isso é ingênuo, porque, no nosso caso, mesmo que uma teoria não explicasse um certo fenômeno, ela explicava bem uma série de outros fenômenos. Cada teoria era complexa como uma estrutura. Você mexia aqui, e ela balançava ali, sacou? E ainda tinha a questão dos contra-ataques (MEDEIROS, 2009, p. 12).

A pergunta sobre quais foram as principais causas que fizeram com que a teoria do calórico fosse abandonada, ainda não foi respondida de forma satisfatória pelos historiadores da ciência. Fox (1971, p. 02), por exemplo, observa que a rejeição, depois de 1815, da abordagem laplaciana para a ciência, baseada em princípios newtonianos e na crença de fluidos imponderáveis, foi uma das mais relevantes causas do descrédito da teoria do calórico. De acordo com Brush (1988, p. 228), os fatores mais importantes foram: a descoberta do princípio da conservação da energia; as evidências de que a pressão de um gás não era causada por forças repulsivas intermoleculares, ideia essa associada ao calórico; e a aceitação generalizada da teoria ondulatória da luz, a qual – combinada com a visão de que calor e luz são qualitativamente o mesmo fenômeno – sugeria que o calor, como a luz, é uma forma de movimento ondulatório em vez de uma substância. Independentemente das razões exatas, Fox (1971, p. 3-4, tradução nossa) resume qual foi a atitude dos cientistas no período final da aceitação da teoria:

[...] o resultado na década de 1820 não foi uma virada brusca para nossa teoria moderna vibracional, mas um período de agnosticismo largamente reconhecido no que diz respeito à natureza do calor, um período que se prolongou até a teoria do calórico ser finalmente abandonada por volta de 1850. Em virtude desse agnosticismo, não é de se surpreender que a teoria do calórico não foi um alvo fácil para os conservacionistas da energia; no

meio do século ainda era tecnicamente a teoria prevalecente do calor, embora convencesse muito pouco.

Apesar de não haver uma unanimidade quanto aos fatores primordiais que abalaram a teoria do calórico, os pesquisadores concordam que o advento da conservação da energia, substituindo a conservação do calórico, deu o golpe final. Outro fator de grande importância pode ter sido o cálculo do equivalente mecânico do calor realizado por Mayer e Joule (BROWN, 1949; BRUSH, 1988; FOX, 1971; MEDEIROS, 2009; MULLER, 2007; ROLLER, 1950). O conceito de energia, que foi se consolidando a partir do fim da década de 1840, finalmente pôde servir como elemento de ligação entre a mecânica e a termodinâmica.

VII. O linguajar calorista dos livros didáticos de Física

De acordo com Garcia Houcarde e Rodrigues de Avila (1985, p. 192, grifo nosso, tradução nossa):

*A explicação física dos fenômenos associados com o <<calor>> passou por três fases: a) O calor é um fluido contido nos corpos e intercambiável. b) O calor é uma forma de energia e c) **O calor é o nome convencional de um processo.***

Assim como o trabalho (W), o calor (Q) é um processo pelo qual é possível variar a energia de um sistema. A diferença é que o trabalho (W) envolve interações macroscópicas em que as forças são mensuráveis, ao contrário do calor (Q) que pode ser interpretado como um conjunto de microtrabalhos, realizados em nível microscópico, que ocorrem como consequência do contato entre objetos de diferentes temperaturas ocasionando a variação da energia interna de ambos (DOMÉNECH, 2000; DOMÉNECH et al., 2003). Compreendendo a energia interna como:

[...] a energia associada aos componentes microscópicos de um sistema – átomos e moléculas – quando vistos a partir de um referencial em repouso em relação ao sistema. Inclui a energia cinética e potencial associada com o movimento aleatório translacional, rotacional e vibratório dos átomos ou das moléculas que compõem o sistema, bem como a energia potencial intermolecular (SERWAY; JEWETT JUNIOR, 2005, p. 589).

No entanto, ao analisarmos os textos de alguns livros didáticos de Física, ainda encontramos expressões que eram corriqueiras nos textos dos antigos adeptos

tos da teoria substancial do calor, tais como: calor “cedido”, “absorvido”, “recebido”, “ganho”, “perdido”, “liberado”, “transferência” e “trocas de calor”. Por exemplo, vejamos abaixo um trecho do livro de Marcet (1817) e um de Máximo e Alvarenga (2000) explicando o motivo pelo qual um objeto, ao ser tocado pela mão que está a uma temperatura maior, aparenta ser mais frio do que outro a mesma temperatura:

*Sentimos a lareira e a mesa mais frios que o tapete ou o livro porque esses últimos não são tão bons **condutores de calor** como os primeiros. Calórico encontra uma passagem mais fácil ao longo do mármore e da madeira do que ao longo do couro e da lã; os dois primeiros, portanto, **absorvem o calor** mais rapidamente de sua mão, e, conseqüentemente, dão-lhe uma forte sensação de frio do que os dois últimos, apesar de estarem todos eles realmente à mesma temperatura (MARCET, 1817, p. 71, grifo nosso, tradução nossa).*

*Quando tocamos em uma peça de metal e em um pedaço de madeira, ambos em um mesmo ambiente, isto é, ambos à mesma temperatura, o metal nos dá a sensação de estar mais frio do que a madeira. Isto ocorre porque, sendo o metal um **condutor** térmico melhor do que a madeira, haverá uma maior **transferência de calor** de nossa mão para a peça metálica do que para o pedaço de madeira (MÁXIMO; ALVARENGA, 2000, p. 120, grifo nosso).*

Quase dois séculos depois, os autores dos livros didáticos de Física utilizam a mesma linguagem do que os primeiros escritores caloristas. Do modo que foi exposto, ao associarem a “transferência mais rápida de calor” de nossa mão com a sensação de uma peça metálica estar mais fria do que um pedaço de madeira, os autores estabelecem uma ligação entre a “quantidade de calor que se tem na mão” e a sua temperatura. Quanto mais rápido se perde essa quantidade de calor, mais rápido a temperatura decresce. Para o leitor se certificar de que isso não é uma conclusão forçada, vamos mostrar algumas expressões que aparecem em alguns livros didáticos analisados, quando os seus autores discorrem sobre o assunto “capacidade calorífica” ou “capacidade térmica” de um corpo:

*Quando dois ou mais corpos **cedem** ou **absorvem** quantidades iguais de **calor**, a **variação de temperatura por eles sofrida** é, em geral, diferente uma da outra [...] (GASPAR, 2000, p. 310, grifo nosso).*

[...] Portanto, **fornecendo** a mesma quantidade de **calor** a corpos diferentes, eles, em geral, apresentam **variações** diferentes em suas **temperaturas** [...] (MÁXIMO; ALVARENGA, 2000, p. 123, grifo nosso).

Se medirmos a **variação de temperatura** ΔT de um determinado corpo ao **fornecermos** uma quantidade Q de **calor**, podemos calcular a razão $Q/\Delta T$ [...] (CABRAL; LAGO, 2002, p. 55, grifo nosso).

O nome dessa grandeza (*capacidade térmica*) vem do seguinte fato: ela pode ser entendida como a medida da **capacidade de receber ou perder calor** que um corpo tem, para uma dada **variação de temperatura** [...] (RAMALHO JUNIOR, FERRARO; SOARES, 2007, p. 50, grifo nosso).

A **capacidade térmica** C de um objeto é a constante de proporcionalidade entre o **calor** Q recebido ou cedido por um objeto e a **variação de temperatura** ΔT do objeto [...] (HALLIDAY, RESNICK; WALKER, 2009, p. 191, grifo nosso).

[...] A **quantidade de calor** Q necessária para **aumentar a temperatura** de uma amostra da substância é proporcional à **variação da temperatura** e à **massa da amostra** [...] (TIPLER; MOSCA, 2009, p. 600, grifo nosso).

[...] Podemos **alterar a temperatura** de um corpo **fornecendo calor** ou **retirando calor** do corpo [...] (SEARS, et al., 2008, p. 113, grifo nosso).

Se tivermos m gramas de uma substância pura de calor específico c , a **quantidade de calor** ΔQ necessária para **eleva sua temperatura** de ΔT [...] (NUSSENZVEIG, 2002, p. 170, grifo nosso).

Agora, vamos ver o que dizem Joseph Black e Jane Marcet quando examinam o mesmo tema:

[...] Mercúrio, portanto, tem menos **capacidade para calor** (se me é permitido usar essa expressão) do que tem a água; uma menor **quantidade de calor** é necessária para **eleva sua temperatura** pelo mesmo número de graus (BLACK, 1803 apud ROLLER, p. 24, grifo nosso, tradução nossa).

[...] Assim, verifica-se que a fim de **eleva a temperatura** de diferentes corpos em o mesmo número de graus, **diferentes quantidades de calórico** são requeridas para cada um deles. Se, por exemplo, você colocar uma libra de chumbo, uma libra de giz e uma libra de leite em um forno quente eles serão gradualmente aquecidos até a temperatura do forno, mas o chumbo vai a-

tingi-la primeiro, o giz depois e o leite por último (MARCET, 1817, p. 123, grifo nosso, tradução nossa).

De novo, não há diferença na maneira de se expressar dos autores dos oito livros e dos antigos caloristas. Poderíamos reproduzir mais inúmeros exemplos, mas achamos desnecessário. Para quem tiver interesse, sugerimos uma leitura na íntegra da obra de Jane Marcet e de outros partidários da teoria do calor como um fluido sutil. Facilmente serão encontradas outras semelhanças. Um aspecto que merece ser destacado é que dos oito livros analisados seis apresentam um breve resumo histórico da evolução do conceito de calor, além de todos alertarem, em poucas palavras, que o calor não pode ser interpretado como algo contido nos corpos. Portanto, apesar de estarem cientes de que o conceito de calor não deve ser associado a um fluido sutil, os autores examinados não deixaram dúvidas, pelo desenvolvimento de suas ideias, de que essa abordagem ainda não é significativa para eles.

Acreditamos que as expressões utilizadas metaforicamente como se o calor fosse algo material que pudesse ser transportado – conduzido de um lugar para outro – dificultam a compreensão dos processos microscópicos envolvidos na variação de energia interna de um sistema, decorrentes de uma diferença de temperatura entre as suas partes, ou entre ele e sua vizinhança. Além disso, a variação da temperatura associada com a “perda” ou “ganho” de “calor” que um corpo sofre induz e/ou reforça a crença de que a temperatura é uma grandeza Física relacionada com a “quantidade de calor que um corpo possui”. Se o corpo “perder calor”, a temperatura diminui. Se ele “ganhar calor”, a temperatura aumenta. Isso é um obstáculo ao entendimento da temperatura como uma grandeza Física relacionada aos diversos tipos de movimento que as partículas de um sistema possuem. Se olharmos sob o ponto de vista dos obstáculos epistemológicos¹³ de Bachelard

¹³ “Na perspectiva de Bachelard o inconsciente do espírito científico é a fonte primordial de contra-pensamentos, mais ou menos disfarçados, baseados em dados sensoriais, que dificultam a emergência de valores racionais. É a estas resistências do pensamento ao pensamento que Bachelard chama **obstáculos epistemológicos**. Eles são, diz, conhecimentos subjectivos, essencialmente do foro afectivo que entram o conhecimento objectivo. São geralmente anquilosantes porque bloqueiam o pensamento. Dizem respeito a aspectos intuitivos, imediatos e sensíveis; a experiências iniciais; a relações imaginárias; a conhecimentos gerais, unitários e pragmáticos; a perspectivas filosóficas empiristas, realistas, substancialistas e animistas; a interesses, hábitos e opiniões de base afectiva, etc. São erros, investidos de tal energia psíquica, que se tornam tenazes e resistentes a toda a mudança [...] Nesta perspectiva, paradoxalmente, **é o próprio saber que entrava o progresso do saber** [...]” (SANTOS, 1991, grifo nosso).

(2005), temos aqui um obstáculo substancialista, em que a principal característica é:

[...] assumir a substância como fundamento da realidade mesma. Este obstáculo, como diz o próprio Bachelard, é essencialmente polimorfo, vago e imensamente tolerante. A substancialização não explica como realmente age o calor. A simples presença da substância é suficiente para que o fenômeno aconteça. A substância exerce uma função que se auto-justifica. Não há necessidade de maiores explicações, pois, por definição, a substância do calor tem a função de aquecer. Todo o processo é explicado pelas qualidades inerentes à substância [...] (SANTOS, 2009, p.120).

Esse obstáculo substancialista do conceito de calor também dificulta a compreensão científica de outros fenômenos físicos que se originaram com o desenvolvimento da teoria do calor como um processo. De acordo com Schenberg (1985, p. 106-107, grifo nosso):

Esta grande revolução, talvez a maior de todas que houve na Física depois da criação da Mecânica no século XVII, foi exatamente a criação da teoria dos quanta. E foram os estudos do calor e da termodinâmica que levaram a essa revolução. [...] Durante o século XIX se desenvolveram, portanto, essas duas teorias: a teoria do calor e a teoria do campo eletromagnético. A teoria do calor conduziu à mecânica estatística e à introdução dos conceitos probabilísticos na Física.

VIII. Considerações finais

Neste artigo, além de alertar professores e alunos quanto aos erros de afirmações históricas presentes nos livros didáticos de Física. No nosso caso, a afirmação de que Joseph Black foi o primeiro a pesquisar o calor como substância e que os experimentos do Conde Rumford foram cruciais para o abandono dessa teoria. Evidenciamos a origem de muitos termos que utilizamos no estudo da calorimetria. De acordo com Mazzotti e Oliveira (1999, p. 07), “[...] a crítica das metáforas impróprias é uma das tarefas de toda e qualquer argumentação filosófica e científica. Esta tarefa não pode ser deixada de lado quando se trata da educação escolar”. Foi o que fizemos. Podemos dizer que as concepções alternativas dos alunos sobre o conceito de calor são reforçadas ou induzidas pelo linguajar utilizado pelos autores dos livros didáticos de Física. Haja vista a semelhança entre o que está escrito nos livros e o que os alunos dizem. Para se certificar, compare o leitor

a lista abaixo apresentada por Garcia Houcarde e Rodrigues de Avila (1985, p. 189, tradução nossa), em que aparece as principais concepções dos alunos sobre esse tema, com os trechos dos textos que analisamos:

- <<O calor pode ser transmitido de uns corpos para outros>>.
- <<Os pneus de um carro que freia ganham calor>>.
- <<Todo o corpo possui calor>>.
- <<É a energia que despreendem as moléculas dos corpos ao porem-se em movimento>>.
- <<A temperatura é a quantidade de energia calorífica que possui um corpo>>.
- <<O frio é a falta de calor>>.
- <<O calor é transmitido através dos corpos com maior ou menor velocidade de acordo com a matéria do corpo>>.
- <<O calor é um aumento de temperatura>>.
- <<O calor é uma das formas em que se transforma a energia>>.
- <<Em nosso corpo guardamos calor, temos uma temperatura>>.
- <<Os agasalhos dão calor>>.
- <<Esta panela mantém bem o calor>>.
- << Todos juntos nos damos calor>>.
- <<As garrafas térmicas são recipientes que armazenam o calor ou o frio>>.
- <<Feche a porta que sairá o calor ou o frio entrará>>.
- <<Suo porque tenho muito calor>>.

É evidente, para nós, que a linguagem utilizada pelos autores dos livros didáticos contribuem, no mínimo, para a manutenção dessas concepções. Algumas pesquisas chegaram à mesma conclusão (ALOMÁ; MALAVER, 2007; AXT; BRUCKMANN, 1989; CINDRA; TEIXEIRA, 2004; GARCIA HOUCARDE; RODRIGUES DE AVILA, 1985; SILVA; LABURÚ; NARDI, 2008; SUMMERS, 1983, entre outras). Esse fato também foi observado por Castiñeiras, Pro Bueno e Fernández (1998, p. 473, grifo nosso, tradução nossa):

Temos que advertir que a existência de ideias alternativas depois de n períodos de instrução, além de ser consequência das características de resistência à mudança que apresentam, é reforçada por algumas expressões, muitas vezes infelizes, que aparecem em livros que utilizam nossos alunos [...].

Complementamos essa reflexão com as palavras de Mazzotti (2005, p. 4):

[...] o livro didático “põe sob os olhos” os conhecimentos considerados válidos, ocultando as polêmicas que os geraram e geram, dando a impressão de que se está frente a algo definitivo e inquestionável. No ensino das ciências esta atitude é extremamente prejudicial, pois afasta, de imediato, o exercício da razão, uma vez que não se pode pôr em questão os conhecimentos compendiados. O saber escolarizado torna-se, assim, uma expressão de lições fechadas ou dogmas, no sentido moderno, o oposto da atitude científica.

Desse modo, o que foi apresentado neste artigo serve como um alerta aos professores que utilizam os livros didáticos de Física como um referencial teórico para explicarem o conceito de calor. Se não é possível, em curto prazo, modificar os livros didáticos, faz-se necessário que os professores se posicionem de modo crítico frente a eles, não os considerando como uma partitura que deve ser seguida à risca.

Referências

ALOMÁ, E.; MALAVER, M. Análisis de los conceptos de energía, calor, trabajo y el Teorema de Carnot en textos universitarios de termodinámica. **Enseñanza de las Ciencias**, v. 25, n. 3, p. 387-400, 2007.

AXT, R.; BRÜCKMANN, M. E. O conceito de calor nos livros de ciências. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, v. 6, n. 2, p. 128-142, 1989.

BACHELARD, G. **A formação do espírito científico**. Rio de Janeiro: Contraponto, 2005.

BALDINATO, J. O. **A química segundo Michael Faraday: um caso de divulgação científica no século XIX**. 2009. 139 f. Dissertação (Mestrado Interunidades em Ensino de Ciências) - Instituto de Física, Instituto de Química, Instituto de Biociências, Faculdade de Educação, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

BALDINATO, J. O.; PORTO, P. A. Jane Marcet e Conversations on Chemistry: divulgando a química no início do século XIX. In: ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA EM EDUCAÇÃO EM CIÊNCIAS, 6., 2009, Florianópolis. **Anais...** Belo Horizonte: ABRAPEC, p. 1-12, 2009.

BASSALO, J. M. A crônica do calor. In: BASSALO, J. M. **Crônicas da Física**: tomo 3. Belém: Universitária UFPA, p. 849-933, 1992.

BELL, M. S. **Lavoisier no ano um**: o nascimento de uma nova ciência numa era de revolução. Tradução: Ivo Korytowski. São Paulo: Companhia das Letras, 2007.

BROWN, S. C. Count Rumford and the caloric theory of heat. **Proceedings of the American Philosophical Society**, v. 93, p. 316-325, 1949.

BRUSH, S. G. **The history of Modern Science**: a guide to the second revolution, 1800-1950. Ames: Iowa University Press, 1988.

CABRAL, F.; LAGO, A. **Física 2**. 1. ed. São Paulo: Harbra, 2002. v. 2.

CASTIÑEIRAS, J. M. D.; PRO BUENO, A.; FERNÁNDEZ, E. G. R. Las partículas de la materia y su utilización en el campo conceptual de calor y temperatura: un estudio transversal. **Enseñanza de las Ciencias**, v. 16, n. 3, p. 461-475, 1998.

CINDRA, J. L.; TEIXEIRA, O. P. B. Uma discussão conceitual para o equilíbrio térmico. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 21, n. 2, p. 176-193, 2004.

DOMÉNECH, J. L. **L'ensenyament de l'energia en l'edució secundària: anàlisi de les dificultats i una proposta de millora**. 2000. 317 f. Tese (Doutorado) - Departament de Didàctica de Les Ciències Experimentals i Socials, Universitat de València, València, 2000.

DOMÉNECH, J. L.; et al. La enseñanza de la energía: una propuesta de debate para un replanteamiento global. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 20, n. 3, p. 285-311, 2003.

EVANS, J.; POPP, B. Pictet's experiment: the apparent radiation and reflection of cold. **American Journal of Physics**, v. 53, n. 8, p. 737-753, 1985.

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

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

GASPAR, A. **Física: Ondas, Óptica, Termodinâmica**. 1. ed. São Paulo: Ática, 2000. v. 1.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de Física**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009. v. 2.

KOERTGE, N. **New Dictionary of scientific biography**. New York: Thomson Gale, 2008.

LAVOISIER, A. L. De la combinaison de la matière du feu avec les fluides évaporables, et de la formation des fluides élastiques aëriiformes. In: Académie Royale des Sciences (Org.). **Mémoires...** Paris: Académie Royale des Sciences, p. 420-433, 1777.

MARCET, J. H. **Conversations on chemistry: in which the elements of that science are familiarly explained and illustrated by experiments**. 5. ed. Londres: Longman, 1817. v. 1.

MÁXIMO, A.; ALVARENGA, B. **Curso de Física**. 5. ed. São Paulo: Scipione, 2000. v. 2.

MAZZOTTI, T. B. **Didacografia, a arte de ensinar tudo a todos**. Disponível em: <tmazzotti@mac.com>. Acesso em: 26 set. 2005.

MAZZOTTI, T. B.; OLIVEIRA, R. J. **A retórica das teorias pedagógicas: uma introdução ao estudo da argumentação**. In: REUNIÃO ANUAL DA ANPED - GT FILOSOFIA DA EDUCAÇÃO, 22. Caxambu: ANPED, p. 01-12, 1999.

MEDEIROS, A. Entrevista com o Conde Rumford: da teoria do calórico ao calor como uma forma de movimento. **Física na escola**, v. 10, n. 1, p. 04-16, 2009.

MORRIS, R. J. Lavoisier and the caloric theory. **The British Journal for the History of Science**, v. 6, n. 21, p. 1-38, 1972.

MORVEAU, L. B. G. et al. **Méthode de nomenclature chimique**. Paris: Académie des Sciences, 1787.

MÜLLER, I. **A history of thermodynamics: the doctrine of energy and entropy**. New York: Springer, 2007.

NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de Física Básica:** Fluidos, Oscilações e Ondas, Calor. 4. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2002. v. 2.

PULIDO, M. D.; SILVA, A. N. Do calórico ao calor: uma proposta de ensino de química na perspectiva histórica. **História da Ciência e Ensino:** construindo interfaces, v. 3, p. 52-77, 2011.

RAMALHO JUNIOR, F.; FERRARO, N. G.; SOARES, P. A. T. **Os fundamentos da Física 2:** Termologia, Óptica, Ondas. 9. ed. São Paulo: Moderna, 2007. v. 2.

ROLLER, D. **The early development of the concepts of temperature and heat:** the rise and decline of caloric theory. Cambridge: Harvard University Press, 1950.

SANTOS, Z. T. S. **Ensino de entropia: um enfoque histórico e epistemológico.** 2009. 166 f. Tese (Doutorado em Educação) - Programa de Pós-Graduação em Educação, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2009.

SCHENBERG, M. **Pensando a Física.** 2. ed. São Paulo: Brasiliense, 1985.

SEARS, F.; et al. **Física II - Termodinâmica e Ondas.** 10. ed. São Paulo: Pearson Addison Wesley, 2003. v. 2.

SERWAY, R. A.; JEWETT JUNIOR, J. W. **Princípios de Física:** Movimento Ondulatório e Termodinâmica. Tradução: André Koch Torres Assis. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2005. v. 2.

SILVA, O. H. M.; LABURÚ, C. E.; NARDI, R. Reflexões para subsidiar discussões sobre o conceito de calor na sala de aula. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 25, n. 3, p. 383-396, 2008.

SUMMERS, M. Teaching heat: an analysis of misconception. **School Science Review**, v. 64, p. 670-676, 1983.

TIPLER, P. A.; MOSCA, G. **Física para Cientistas e Engenheiros:** Mecânica, Oscilações e Ondas, Termodinâmica. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009. v. 1.