

**Universidade de São Paulo
Instituto de Física
Instituto de Química
Instituto de Biociências
Faculdade de Educação**

**A TERMODINÂMICA NO ENSINO MÉDIO:
ÊNFASE NOS PROCESSOS IRREVERSÍVEIS**

Djalma Nunes da Silva

Orientadora: Prof^a Dr^a Jesuína Lopes de Almeida Pacca

Dissertação de mestrado apresentada ao Instituto de Física, ao Instituto de Química, ao Instituto de Biociências e a Faculdade de Educação da Universidade de São Paulo, para a obtenção do título de Mestre em Ensino de Ciências.

São Paulo

**Universidade de São Paulo
Instituto de Física
Instituto de Química
Instituto de Biociências
Faculdade de Educação**

**A TERMODINÂMICA NO ENSINO MÉDIO:
ÊNFASE NOS PROCESSOS IRREVERSÍVEIS**

Djalma Nunes da Silva

Banca Examinadora

Prof^a. Dr^a. Jesuína Lopes de Almeida Pacca (IF-USP/ orientadora)

Prof^a. Dr^a. Anna Maria Pessoa de Carvalho (FEUSP)

Prof^a. Dr^a. Anildes Cafagne (PUC-SP)

**São Paulo
2009**

FICHA CATALOGRÁFICA
Preparada pelo Serviço de Biblioteca e Informação
do Instituto de Física da Universidade de São Paulo

Silva, Djalma Nunes da

A Termodinâmica no Ensino Médio : ênfase nos processos irreversíveis. – São Paulo, 2009.

Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo.
Faculdade de Educação, Instituto de Física, Instituto de Química e Instituto de Biociências.

Orientador: Profa Dra Jesuína Lopes de Almeida Pacca

Área de concentração: Física

Unitermos: 1. Física – estudo e Ensino; 2. Concepções alternativas; 3. Barreiras conceituais e ressonâncias; 4. Conceitos de termodinâmica; 5. Processos irreversíveis

USP/IF/SBI-O80/2009

Agradecimentos

O Sol era escaldante sobre a pequena Inhambupe, cidade do recôncavo baiano onde nasci, quando entrei no ônibus rumo a São Paulo. Dois dias depois, desembarquei, ainda adolescente, ao lado de Isaura, minha mãe, que me entregou a esta megalópole no final dos anos sessenta. Aqui fui caminhando... Concluí o ensino médio e o superior, sempre transitando pelas áreas da Física e das Artes.

Numa das escolas de ensino médio onde trabalhei, conheci Maria José e, juntos tivemos Luísa e Carolina que, constantemente, iluminam os nossos caminhos.

Depois de ter sido preso pela ditadura militar, ter dado aulas no ensino médio e superior e escrito vários livros didáticos, instalou-se a crise.

Minha mulher e filhas empurraram-me para a busca de novos caminhos: retornar à Universidade de São Paulo. E assim fiz.

No instituto de Física fui recebido pela professora Jesuína com quem compartilhei minhas Indagações. Ela me acolheu e posteriormente me desafiou com duas questões que, acrescidas de uma terceira adaptada da literatura, me levaram “a campo” para o início de um processo de investigação que resultaria neste trabalho com algumas contribuições para o ensino da Termodinâmica.

Muitas vezes, cansado, desanimado e confuso voltava a procurar a professora Jesuína. A partir de uma leitura atenta do que tinha produzido, fazia sugestões, generosamente, fornecia mais pistas, apontava novos rumos. Em outras ocasiões, sua contribuição durante a troca de experiências entre os orientandos nas reuniões das terças incitava-me a retornar à pesquisa com ânimo novo.

Finalmente, coloco o ponto final, quem sabe para trilhar novos caminhos, porque muitas ainda são as perguntas.

A vocês, Isaura, Maria José, Luísa, Carolina e Jesuína, meus agradecimentos sem limites.

Resumo

Este trabalho procura responder a questão: *“quais as barreiras conceituais que impedem a compreensão da segunda lei da Termodinâmica pelos estudantes?”*

A partir de três questões apresentadas a estudantes do terceiro ano do ensino médio e do primeiro ano do curso superior de licenciatura em física, foram coletadas as respostas produzidas; posteriormente analisadas, permitiram a explicitação de concepções que, confrontadas com as idéias da Termodinâmica clássica, revelaram um raciocínio inadequado. A idéia de sistema centrado no objeto, parece constituir uma barreira conceitual difícil de transpor; assim também ocorre com os conceitos de processo e transformação exibidos pelo senso comum. Tais conceitos são fundamentais para o estabelecimento da Termodinâmica e devem ser pensados no trabalho em sala de aula capaz de produzir conflitos cognitivos com meta a uma mudança conceitual.

Por outro lado, numa perspectiva histórica, foi possível identificar alguma ressonância entre as idéias dos estudantes e o desenvolvimento da concepção de calor; focalizamos especialmente as idéias de Carnot e de Clausius ao longo da elaboração das leis da Termodinâmica.

O trabalho também identificou lacunas decorrentes da forma como os conteúdos científicos são apresentados na sala de aula e nos livros didáticos o que pode explicar as dificuldades encontradas.

Finalmente, o trabalho apresenta subsídios de relevância pedagógica que podem contribuir para a melhoria do ensino da Termodinâmica no nível médio, com atividades especiais que tocam nos pontos conflitantes entre as concepções dos estudantes e o conhecimento científico.

Abstract

This work aims to answering the following question: what are the conceptual barriers that prevent students from understanding the second law of Thermodynamics ?

Starting from three questions that were proposed to third year secondary school and to first year physics teaching university students, the collected answers were analysed and led to an explicitation of conceptions that disclose inadequate reasoning when confronted with the ideas of classical Thermodynamics. The idea of a system centered on the object seems to be a conceptual barrier that is difficult to overcome and the same happens with the concepts of process and change that are usual in commonsense. But these concepts are essential for the fundamentals of Thermodynamics and should be used in class work to create cognitive conflicts aiming to a conceptual change.

On the other hand, from a historical perspective, it was possible to identify some of the students ideas in the development of the concept of heat particularly in the development of the ideas of Carnot and Clausius in the elaboration of the laws of thermodynamics.

The work has also identified gaps resulting from the way scientific contents are presented in the classroom and in textbooks that could explain the students difficulties.

At last, the work presents pedagogically relevant contributions that may be helpful in teaching thermodynamics in secondary schools with special activities that touch points that are conflicting between students conceptions and scientific knowledge.

Sumário

Introdução – Motivação e contexto	10
A crise	10
O retorno	12
As fontes inspiradoras	13
O tipo de pesquisa	21
O problema de pesquisa	24
O conteúdo dos capítulos	26
Capítulo I	28
Os autores pesquisados.....	28
Síntese das idéias de calor e Termodinâmica.....	49
Capítulo II - Calor e Termodinâmica:	
A desagregação interna dos corpos	52
O conceito de calor.....	53
A gênese da segunda lei no raciocínio de Carnot.....	55
Clausius e o conceito de irreversibilidade.....	61
Sistema e Processo.....	70
Capítulo III – Organização da pesquisa.....	72
Natureza e metodologia	72
As questões – obtenção de dados	73
O processo de análise	75
As categorias – instrumento de análise	76
Resultados	77
As concepções dos estudantes.....	94
Elementos de um modelo alternative	96
Capítulo IV – Barreiras conceituais, Ressonâncias e o Ensino da Termodinâmica	100
Sistema	101
Processo	106
Transformação	111

Capítulo V	114
Conclusões	114
Implicações para o ensino	117
Bibliografia	122
Anexo	128

Introdução

Motivação e contexto

*“Vou **aprender** a ler, prá **ensinar** meus camaradas...”*

(Roberto Mendes/Capinam)

A crise

O que leva um professor após trinta anos de trabalho em sala de aula a retornar, como aluno, aos bancos da universidade? O que busca procurar fazer com a experiência acumulada em todo esse período? Que espécie de retorno é este?

Responder a estas perguntas exige uma longa reflexão. Quase diariamente elas aparecem e ocupam um lugar substancial no rol das minhas preocupações. Com relação à primeira delas, posso afirmar, de forma simplificada e parcial, que esta volta se deu devido a algumas insatisfações que, ao longo do tempo, foram se instalando em mim e que acabaram por exigir uma tomada de decisão que está resultando em mudanças profundas na minha vida.

Uma destas insatisfações se originou através dos contatos com colegas professores nas escolas onde trabalhei. Eles defendiam que o conhecimento científico deveria ser transmitido ao aluno através da fala do professor, sem que as reflexões e ações dos estudantes fossem estimuladas. Além disso, me incomodava ausência de discussões sobre a nossa prática, principalmente as que se relacionavam à efetiva aprendizagem de conceitos que, na escola, o estudante deveria entrar em contato e que se diferenciavam daqueles oriundos do senso comum.

É claro que a fala do professor é um recurso valioso e as argumentações dos colegas se alicerçavam em crenças profundamente enraizadas na forma de pensar da nossa civilização. O que me incomodava era o fato de que, segundo a maioria deles, ela deveria ocupar o lugar principal na produção do conhecimento, sem que as ações e as concepções que pudessem ser mostradas ou expressadas pelos estudantes fossem levadas em consideração.

As minhas concepções relativas ao ensino-aprendizagem que se diferenciavam das dos colegas nas escolas onde lecionei foram adquiridas durante o meu curso de graduação na USP no início dos anos setenta. Dasquelas, destaco as fundamentadas em trabalhos de Jean Piaget. Elas produziram em mim fortes impressões que levaram a uma constante preocupação com a forma de transmissão dos conteúdos na sala de aula.

A partir daí procurava atuar de forma a suprir lacunas deixadas durante minha educação formal. Sempre ficava atento aos meus alunos. Queria oferecer a eles um espaço de atuação maior do que tive enquanto estudante.

Utilizei projetos considerados inovadores e que me auxiliaram no desenvolvimento dos conteúdos, tais como PSSC, FAI e PEF desde o final da década de setenta até meados dos anos noventa, quando passei a utilizar livros didáticos de minha autoria.

A minha atuação, na maioria das vezes, privilegiava a experimentação ou textos científicos como ponto de partida, em que os alunos podiam, através de manipulação de materiais, execução de experimentos e leituras se expressar antes que fossem apresentados ao conhecimento científico. A participação e a produção dos estudantes eram muito valorizadas. A prova escrita não era o único e nem o principal instrumento de avaliação.

Durante muitos anos também atuei em cursos pré-vestibulares (onde, além de dar aulas, preparava material didático) e em uma escola privada de engenharia (onde lecionava física básica e moderna).

Apesar de ser considerado um bom professor, sentia dificuldades relacionadas à operacionalização. As surpresas que apareciam durante as aulas revelavam, muitas vezes, falta de conexão entre planejamento e prática. E por não saber lidar com elas e com outras (oriundas de pressões externas, da minha formação inicial, das crenças e rotinas), acabava, algumas vezes, por adotar formas de atuação conservadora.

As pressões externas, na época, estavam relacionadas à questão da competitividade entre as escolas com relação à aprovação em exames vestibulares em universidades consideradas de ponta. Isto impedia, apesar de ter apoio da direção aos meus planejamentos curriculares, que meus trabalhos fossem convenientemente compreendidos e convenientemente tolerados.

Outro problema me incomodou bastante. Este se relacionava a questões curriculares, transposição didática dos conteúdos científicos e avaliação. Enfim, precisava de suportes que, no meu entender, só um retorno à universidade poderia me fornecer.

O retorno

Voltei à Universidade de São Paulo e me incorporei, em 2007, ao programa de mestrado, para me aproximar dos grupos de pesquisa em ensino do Instituto de Física.

A experiência adquirida durante os trinta anos da minha prática docente se encontra em revisão, está sendo reformulada e confrontada com os novos conhecimentos que venho adquirindo atualmente. O que aparece no presente é uma enorme surpresa. É exatamente esta surpresa que me leva adiante. Sei que muitas cortinas ainda precisarão ser abertas revelando muitos palcos onde novos fatos surpreendentes devem aparecer.

Muitas abordagens de conteúdos feitas no passado estão sendo reformuladas com as novas visões adquiridas e é exatamente isto o que me move: quero contribuir de alguma maneira, oferecendo a colegas professores que procuram formas de atuação inovadoras, os resultados do meu trabalho para, quem sabe, auxiliá-los nas suas tomadas de decisão.

A espécie de retorno, para além de um suprimento qualitativo das lacunas existentes no que se refere a aspectos relativos ao arcabouço teórico do ensino-aprendizagem de Física, possui um viés edipiano no que se refere à busca do útero materno. Neste sentido a minha colocação é extremamente embrionária e intuitiva. O Instituto de Física, no momento, me aparece como um refúgio seguro onde, depois de muito tempo ausente, poderei, enfim, recomeçar a reconstruir aquilo que parecia um caminho sem volta.

O trabalho que apresento aqui é o que, no momento, foi necessário realizar. É a primeira etapa de um percurso que, sei, é muito longo. Trata-se de um novo ponto partida. Sei que quero continuar prosseguindo e aprendendo nessa caminhada. Ela por si só é um instrumento humano de grande valor para mim.

As fontes inspiradoras

Os cursos realizados durante o mestrado me forneceram as inspirações necessárias para a escolha do meu trabalho de pesquisa, dentre os quais destaco:

- *Construtivismo e o Planejamento da Aprendizagem Significativa.*

Foi um curso em que tive participação como ouvinte. Ele permitiu entrar em contato com muitas leituras que “regaram” o solo onde pretendia atuar. Uma delas foi o livro *Ensaios Construtivistas*, em que Lino de Macedo assim se refere à função educacional do construtivismo:

“Ao construtivismo interessam as ações do sujeito que conhece. Estas, organizadas enquanto esquemas de assimilação possibilitam classificar, estabelecer relações, na ausência das quais, aquilo que, por exemplo, se fala ou escreve perde sentido. Ou seja, o que importa é a ação de ler ou interpretar um texto e não apenas aquilo que, por ter se tornado linguagem pode ser transmitido por ele”(p 15)

Mesmo entendendo que a linguagem a que se refere Macedo seja um instrumento da fala sem aprofundar o seu significado mais atual, o texto traz informações dos processos que levam à sua constituição dentro de um ponto de vista construtivista.

Mais adiante, ao citar outras fontes inspiradoras do meu trabalho, que foram importantes no procedimento de análise das respostas dos alunos que aparece

no capítulo III, farei breves comentários acerca da concepção mais moderna de linguagem.

Macedo, ao comentar a metodologia conservadora do ensino, ressalta que os conhecimentos científicos na escola são repassados para o aluno através de seus resultados finais, sem que o processo pelo qual o cientista se utilizou durante a elaboração da teoria fosse levado em consideração. Os alunos deveriam ser espectadores passivos tendo, entre outras coisas, suas concepções prévias ignoradas, impossibilitando uma contextualização que permitisse a emergência de situações de aprendizagem. Aos estudantes passava-se a impressão de perfeição que, muitas vezes, causava a impressão de que tais conhecimentos eram obras de gênios, algo que eles dificilmente conseguiriam alcançar.

Este autor aponta ainda que, pertencemos a uma sociedade marcada pela culpa, pelo pecado e pela necessidade de expiá-los. E mesmo que possa ser paradoxal, somos uma sociedade também caracterizada pela complacência diante do erro. Ou seja, de um lado, excesso de rigor e culpa, de outro, complacência. Na escola, por exemplo, os professores exigem que a criança leia bem, leia “direito”. No entanto, em um contexto informal, somos muitos permissivos com o falar e escrever bem. Alguém que fale muito “certinho”, com todos os “esses” e “erres” é, muitas vezes, considerado esnobe ou formal, alimentando uma “cultura” que dificulta a convivência social.

A perspectiva construtivista, na visão de Macedo, que se apóia nas idéias de Piaget, encaminha-nos para uma posição em que o erro não deve ser visto como oposição ao acerto. Ele deve ser revisto ou interpretado de outro modo. Para essa teoria do desenvolvimento da criança, a questão é de invenção e descoberta e não necessariamente de acerto ou erro. Todos nós erramos algumas vezes, ou seja, pensamos e agimos de um modo que um dia terá, talvez, que ser revisto. No processo de desenvolvimento, o que interessa é uma revisão constante de nossas teorias, idéias, pensamentos ou ações, porque erro ou acerto são sempre relativos a um problema ou sistema. No construtivismo erro e acerto são inevitáveis, fazem parte do processo. Não em um sentido de rigor ou complacência excessiva, mas como aquilo com que temos que lidar.

Na perspectiva construtivista um conhecimento a respeito de algo (em um recorte individual ou coletivo, como se faz em história das ciências, por exemplo) só pode ocorrer enquanto uma teoria da ação, que produz esse conhecimento. E nessa teoria interessam, sobretudo, os aspectos lógicos e matemáticos da ação.

Ao se referir ao construtivismo e a prática pedagógica, Macedo escreve:

“(...) Construir conhecimento implica em deduzi-lo a partir de outro já sabido ou dado, ainda que parcialmente. Essa parcialidade corresponde aos limites da relação sujeito/objeto. Mas uma coisa é uma dedução pensada em um contexto de pesquisa, de diálogo, de demonstração, de busca de argumentação; outra é ela tida como pressuposto.

A explicação verbal é importante na prática pedagógica. Ser construtivista não é ser contra a linguagem, mas tratá-la de outro ângulo. Muitas vezes a nomeação não faz sentido para nós; é vazia, não comunica nem expressa. Às vezes, nada mais representa do que o esforço do aluno em dizer coisas que não entende ou não acredita. Ser construtivista é, quem sabe, devolver um pouco de sentido a tudo isso. Desse sentido que tem se perdido na escuridão dos tempos e na clara insensatez dos homens” (p 36).

Como as ações do sujeito que conhece é o que interessa para um procedimento construtivista, a postura do professor em sala de aula deverá ser tal que, além de valorizar os conteúdos escolares, conhecer a matéria que vai ser ensinada, deve também procurar adquirir conhecimento da história da ciência.

Sendo a ciência um processo em construção que exigiu em suas diversas etapas de elaboração a substituição de uma forma pensar por outra que se ajustassem melhor aos fatos, também o conhecimento do aluno deverá ser levado em consideração, pois é este conhecimento que deverá passar por

um processo de revisão para que, relacionando-o com outro, possibilite uma substituição que o leve a uma nova maneira de ver o mundo.

Macedo, citando Piaget, afirma que os indivíduos conferem significado ao mundo físico por meio de desenvolvimento de estruturas e operações lógicas independente dos conteúdos. O significado depende do esquema de conhecimentos existentes no indivíduo. A aprendizagem acontece quando esses esquemas são modificados pelo processo de reequilíbrio. Esse processo requer uma atividade mental interna e tem como resultado a modificação de um esquema anterior de conhecimento existente no indivíduo.

A idéia da aprendizagem como algo que envolve um processo de mudança conceitual, levou, nos últimos trinta anos, a diversas tradições de pesquisa em ensino de ciências. São vários os caminhos apontados por elas. Todas têm como compromisso central o de que o conhecimento não é diretamente transmitido, mas construído ativamente pelo aprendiz (Driver et al 1994).

O fornecimento às crianças de experiências físicas que induzam ao conflito cognitivo deve encorajar os aprendizes a desenvolver novos esquemas de conhecimento que são mais bem adaptadas às experiências. As atividades práticas apoiadas por discussões em grupo formam a essência dessas práticas pedagógicas (Pacca, 2006).

A leitura e a apresentação de um artigo intitulado *“Duas dimensões para caracterizar pesquisa baseada em estratégias de ensino: exemplos em óptica elementar”* (Viennot e Chauvet, 1997), feitas por mim, impressionou-me de forma suficiente para decidir o rumo que deveria tomar o meu projeto de pesquisa. A partir da pergunta: *“como as pesquisas sobre a educação em ciência podem enriquecer e inovar estratégias de ensino?”* As autoras analisam dois possíveis caminhos:

- *As próprias formas de raciocínio dos estudantes podem ser utilizadas para serem confrontadas com visões mais elaboradas dos conceitos.*
- *A estrutura epistemológica dos episódios pode ser feita utilizando um aparato experimental. Isto pode ser feito de diferentes formas,*

desde uma simples indução até a procura por consistência entre leis, hipóteses e fatos experimentais.

Apontando para o fato de que é necessário um longo tempo de treinamento para se obter, por parte dos professores, a consciência da importância deste tipo de atividade, as autoras propõem que os investigadores da área elaborem estratégias abertas e simples com uma descrição clara dos objetivos propostos de forma que os professores possam aplicar em sala de aula e, com o tempo eles mesmos possam se libertar da tutela e elaborarem suas próprias atividades.

Um outro artigo que também provocou bastante interesse foi: *“Dificuldades e Estratégias para o ensino do conceito de energia”* (Pacca e Henrique, 2004). Em que as autoras procuram contribuir na busca de soluções para as dificuldades dos estudantes e professores ao tratar problemas que envolvem o conceito de *energia*, apontando sugestões para a introdução, no ensino médio, de atividades que possam enfrentar os conflitos cognitivos e contribuindo para a reestruturação das concepções do senso comum. Mais detalhes sobre este trabalho serão apresentados no capítulo I.

- *Fundamentos da Física e a física contemporânea como conteúdos instrucionais.*

Este curso, focado no conteúdo do livro *“A matéria, uma aventura do espírito”*, de Luiz Carlos de Menezes, permitiu uma revisão geral do conteúdo da Física numa perspectiva integradora e instigante, permitindo o aparecimento de aspectos relacionados à estética do conhecimento que foram marcantes para a minha escolha do conteúdo de Física que deveria abordar em meu trabalho. Neste livro, ao se referir à degradação da energia (Cap. III p.61 a 74), Menezes escreve:

“A contínua transferência de energia e de quantidade de movimento, nas interações entre partículas dos corpos ou entre estas e as partículas do meio, desorganiza o movimento global, sem violar as leis de conservação. Isso ficou mais fácil

de compreender a partir da interpretação cinética do calor, ao se entender que a energia interna de um objeto se expressa na sua temperatura, que é uma medida da agitação desordenada de suas partículas. O desordenamento dos movimentos, que resulta em calor, não é eventual; em processos espontâneos isolados, as formas mais organizadas de movimento dão lugar a formas desorganizadas resultando em uma degradação da energia. Essa grandeza globalmente se conserva mas espontaneamente perde qualidade (grifo nosso) ou se desordena, isto é um princípio quase universal quanto a conservação da energia”.

E mais adiante afirma:

“...qualquer sistema dinâmico, de muitos componentes, em uma situação de “equilíbrio estatístico” ou seja, em uma configuração estável, como desnível de pressão ou de temperatura, tende espontaneamente ao equilíbrio. Nessa transição, aquela configuração inicial improvável é “diluída no tempo”, pois ela é só uma entre as inúmeras outras que o sistema pode assumir, e de fato assume, em sua rápida e contínua movimentação. Nesta situação final de equilíbrio, as propriedades globais e macroscópicas do sistema se torna estacionária, quer dizer, não variam mais com o tempo.”

Esta evolução natural em direção ao equilíbrio térmico é irreversível, no sentido de sua reversão nunca ocorrer espontaneamente, mas só forçada ou artificialmente como quando se comprime um gás. É dessa forma que os processos térmicos ocorrem.

O tema da irreversibilidade que sempre foi considerado por mim um conhecimento de grande importância, após este curso passou a se constituir como a parte do conteúdo da Física que pretendia focalizar no meu trabalho. Voltarei a falar sobre isso mais adiante, quando apresentar o problema de pesquisa.

- *Ensino e Aprendizagem dos conceitos Científicos em Sala de Aula.*

Este curso proporcionou uma ampliação da visão sobre a concepção de linguagem e das diferentes formas de investigação do ensino-aprendizagem, focalizando aquela em que o ensino de ciências é visto como um processo de enculturação científica. Nele, a ciência é vista como uma forma de cultura com suas próprias crenças, linguagem, prática, percepções, teorias e credos. A sua aprendizagem requer participação numa prática particular dessa cultura. Há um grande potencial nas suas atividades que focaliza uma linguagem observacional e teórica na presença de um fenômeno relevante (Roth,2002). Nesta perspectiva é possível entender a dificuldade dos estudantes que nas aulas de Física se sentem, e com razão, como se fossem estrangeiros que ingressam em “outro país” (Carvalho 2008).

Aprender a utilizar a linguagem científica não é tarefa simples, pois uma das principais dificuldades dos alunos em manejar tal linguagem é a falta de compreensão relativa ao papel que ela exerce no marco da investigação científica. Quando apresentamos situações problemáticas nas atividades de ensino tais como: introdução de conceitos, demonstrações, laboratórios abertos, introdução de textos históricos, problemas de lápis e papel, quando se oferece espaço para que haja uma sistematização coletiva do conhecimento e se tome conhecimento do fato, criamos a oportunidade para “aprender a falar ciência” (Lemke, appud Carvalho, 2008).

Segundo Lemke, a ciência é uma atividade humana cheia de erros e acidentes, impulsionada por egos e orçamentos competitivos constituindo-se, como uma maravilhosa comédia humana. Ela não pode ser equiparada aos seus produtos: o que se diz sobre o mundo da ciência não é a própria ciência. Aprender ciência não é para saber o que a última geração de cientistas pensava, mas sim, é para ter um certo grau de participação neste processo de invenção e descoberta.

É importante também não perder de vista elementos de cognição, relacionados ao nosso dia a dia e que não fazem distinção entre signo e referente. Psicólogos e filósofos estudam como estas entidades diferentes tornam-se aspectos indiferenciados de uma mesma situação (Roth,2003).

Colocar, desde cedo, os alunos em uma situação onde eles possam observar fenômenos científicos e direcioná-los numa busca de relação entre variáveis relevantes, possibilitando a elaboração de hipóteses através de cooperação entre integrantes do grupo e, numa posterior sistematização que tem como elemento norteador a busca da causalidade, pode proporcionar aos estudantes reflexões que levem à necessária compreensão parcial dos fenômenos naturais e uma postura equivalente à dos cientistas e que possa conduzi-los, em séries mais avançadas, a uma melhor compreensão e diferenciação entre signos e referentes.

A legitimação e justificação do conhecimento, dos enunciados relacionados com ele, é feita através da utilização da argumentação, sustentada em critérios sobre qual tipo de conhecimento é aceitável. Entendendo-se também como a capacidade de relacionar dados e conclusões, de avaliar enunciados teóricos à luz de dados empíricos ou de outras fontes, todas elas práticas referidas no discurso da ciência que constituem uma parte substancial do trabalho científico.

A semiótica, que é basicamente o estudo de como percebemos o significado das coisas usando fontes culturais de sistemas de palavras, símbolos e ações. Ela olha cada objeto e ação como um sinal. A “semiótica social” aborda esta questão como sendo um processo social, como algo que aprendemos em grupo, como membros de comunidades, mais do que a nossa própria individualidade. A linguagem propriamente dita é o sistema mais persuasivo das fontes da semiótica (Lemke, 2002).

Num ambiente de aprendizagem é preciso que se dê atenção aos gestos. Eles seriam uma função de transição de movimentos epistêmicos e ergonômicos para a linguagem científica madura. Se gestos surgem das manipulações de laboratório e possuem função no desenvolvimento da linguagem científica, então existem caminhos para o desenvolvimento do discurso científico que transcendem as diferenças lingüísticas relacionadas com o histórico de cada aluno (Roth,2002). Linguagem científica surge, inicialmente, de conversas desordenadas sobre o objeto de estudo. Neste processo, gestos e manipulações possuem um papel fundamental, desenvolvendo-se em gestos simbólicos e, em última instância, em uma linguagem descritiva. Este processo é observado entre cientistas e estudantes.

A escrita como um importante instrumento de aprendizagem que por ser focalizado, demanda esforço cognitivo, posicionamento lógico, reflexivo e convergência, realçando a construção pessoal, a solidariedade e consolidação do conhecimento (Oliveira& Carvalho, 2003).

Quando planejamos nossas atividades de ensino de física buscamos restabelecer a humanidade e as incertezas da ciência produzida pelo homem. Com este objetivo em mente, organizamos o ensino de tal modo que nossos alunos façam experimentos, elaborem hipóteses e utilizem argumentos relativos aos conceitos científicos, como a isto se refere Sutton (appud Carvalho, 2008):

“Se restabelecermos a autoria humana e readmitirmos a incerteza e a possibilidade do argumento, estaremos levando os estudantes a construir uma idéia de ciência não fabricada”.

A aquisição da consciência de que a maneira de fazer a mediação entre os estudantes e a cultura em que estão se inserindo é um elemento decisivo para a aprendizagem juntamente com o conhecimento de modernas investigações sobre linguagem, consolidou a minha tomada de decisão sobre os rumos da minha pesquisa

O tipo de pesquisa

A tomada de consciência, por parte dos professores, de que é a partir dos conhecimentos que os alunos trazem para sala de aula que eles entendem o que se apresenta em classe, é muito importante para evitar a surpresa de se descobrir que os alunos “aprendem” coisas que o professor jura nunca ter ensinado.

Trabalhos e pesquisas realizados em três campos distintos - epistemológico, didático e filosófico – sempre nos mostram os mesmos resultados: os alunos trazem para a sala de aula conhecimentos já construídos, com os quais ouvem e interpretam o que falamos. Esses conhecimentos foram construídos durante a sua vida através de interações com o meio físico e social e na procura de suas explicações do mundo (Carvalho et al 2005)

Após trabalhar o artigo da Viennot e Chauvet, já citado, outros relativos a pesquisas realizadas nos últimos trinta anos e que focalizavam a aprendizagem significativa foram analisados, no intuito de apurar mais a compreensão de como este tipo de aprendizagem é construído pelos indivíduos em que o significado depende dos esquemas de conhecimento previamente existentes nos aprendizes. As abordagens do ensino de ciências baseadas nesta perspectiva concentram-se em fornecer às crianças atividades que levem ao conflito cognitivo e, assim, encorajá-las a desenvolver novos esquemas de conhecimento que são mais bem adaptados à experiência.

Investigações sobre modelos espontâneos que têm sido realizadas nos últimos trinta anos em quase todas as áreas de ciência, principalmente da física, mostram que o problema central da educação científica seria realmente o de criar condições para que o aprendiz reflita sobre suas pré-concepções de forma a modificá-la, ou pelo menos limitar o seu uso adotando como instrumento de interpretação do mundo as concepções aceitas pela comunidade científica. Porém, há um árduo caminho a ser percorrido para que essa nova forma de pensar ocorra (Pacca 2006), pois a mudança conceitual tem como principal pressuposto o fato de que tais concepções são idéias intuitivas relativamente estáveis, parcialmente consistentes, úteis para interpretação dos fenômenos cotidianos e que constituem o conhecimento do senso comum. Uma de suas principais características é a resistência a mudanças acarretando dificuldades na aquisição do conhecimento científico (Viennot, 1979). Justamente por serem altamente resistentes a mudanças, é que em quase todos os trabalhos sobre o tema, recomenda-se a elaboração de propostas didáticas que levem em conta tais concepções, pois elas são referências com os quais os estudantes interpretam os conceitos e as atividades a eles propostas (Pacca 2006).

Neste contexto, as atividades e intervenção do professor são descritas como promovendo o pensamento e a reflexão por parte dos alunos, solicitando argumentos e evidências em apoio às suas afirmações. Para isto é necessário um ambiente que propicie a interação entre os próprios aprendizes, de forma que a troca de informações entre eles proporcione situações tais que um elemento de um grupo possa se beneficiar do conhecimento do outro, criando-

se um espaço de cooperação e generosidade que favoreça o amadurecimento coletivo.

Após estas leituras e muitas outras fornecidas durante o curso “*Introdução à pesquisa no ensino de ciências*” que apresentavam vários tipos e metodologias de pesquisa, optamos pela escolha de pesquisa tipo qualitativa, uma vez que os alunos, sendo os sujeitos diretamente afetados pela pergunta da pesquisa, devem ser o ponto de partida e o destino da investigação.

A crença de que, para a promoção de uma mudança conceitual, a história da ciência pode dar uma importante contribuição, levou-nos a considerar como uma de nossas principais fontes a tese de mestrado “*Ensino de conceitos: estudo das origens da segunda lei da Termodinâmica e do conceito de entropia a partir do século XVIII*” (Aurani 1985), pois ela contém referência à dimensão histórica do conhecimento. A autora, criticando a extrema economia e superficialidade do conteúdo científico dos livros didáticos, assinala que uma maneira do romper com isto é:

“... permitir ao professor o contato com uma ciência em formação...a percepção de uma dimensão histórica do saber”.

Citando Paul Langevin, físico francês defensor da introdução da história da ciência no ensino de Física, Aurani destaca que:

“ É preciso abandonar a abordagem tradicional dos conteúdos científicos, pela qual só se deve introduzir nas escolas as doutrinas solidamente estabelecidas, confirmadas e marcadas pelo tempo. Torna-se necessário, ao contrário, que não nos furtemos a ensinar as teorias balbuciantes, ainda mal assentadas, a fim de oferecer a imagem de uma ciência viva, em investigação. Não sendo assim, estaremos disseminando o dogmatismo que conduz àquela impressão absolutamente falsa de que a ciência é uma coisa morta e definitiva”.

Com a finalidade de confrontar os modelos da Termodinâmica com os alternativos, faremos, no capítulo II, algumas considerações a respeito de Sistema, processos, transformação. Os autores selecionados são Callen (2005), Gibert (1962), Cafagni (1996), Pacca e Henrique (2004), Carnot e Clausius (citados em Aurani, 1981).

O problema de pesquisa

Quais as barreiras conceituais dos estudantes que dificultam a compreensão da segunda lei da Termodinâmica?

Ao procurar a resposta para esta questão, este trabalho, a partir de um levantamento sobre as concepções prévias dos estudantes, detecta as barreiras conceituais que dificultam a compreensão da segunda lei da Termodinâmica por estes estudantes e, além disso, identifica elementos de raciocínio que se aproximam da idéia de *desagregação* de Clausius durante seus estudos para o estabelecimento do conceito de entropia. Esta detecção foi possível a partir de um questionário que foi especialmente elaborado para a obtenção dos dados. As respostas deveriam fornecer elementos de raciocínio sobre a Termodinâmica, que:

- se relacionassem com os de Carnot e Clausius durante a elaboração da teoria.
- se aproximassem ou se afastassem dos conceitos atualmente aceitos pela comunidade científica.

O foco na Termodinâmica, além da inspiração citada anteriormente, também se relaciona à busca de abordagem, em sala de aula, das transformações e conservação da energia de forma mais significativa. Recentes investigações sobre essa área mostram a existência, entre os professores de tendências a formas de raciocínio próprias da perspectiva espontânea do senso comum e estão na raiz dos maiores obstáculos à aprendizagem. Para romper com isso é preciso que haja uma concepção mais

ampla do espaço no qual tem lugar as interações que ocorrem em um determinado sistema onde os processos de transformação deve dar conta da sua conceituação (Pacca e Henrique 2004).

As propriedades de transformação, transferência e conservação da energia não completa, contudo, a sua compreensão. Para isso é necessário que o estudante compreenda a degradação. Os livros didáticos de nível médio não apresentam, na mecânica, este aspecto da energia e o ensino tradicional praticamente não a cita. Para interpretar problemas onde ocorre atrito, verifica-se que estudantes e professores se utilizam expressões do tipo: “ *o trabalho se converte em calor*”, “ *a energia se dissipa*” etc. Por outro lado, os meios de comunicação transmitem uma idéia de consumo, como de esgotamento ou crise, muito diferente da idéia de conservação que aparece na ciência, aparente paradoxo que se resolve com a idéia de degradação

Nossa hipótese é de que esta visão mais integradora sobre a energia poderá ser adquirida conhecendo-se as idéias alternativas dos estudantes sobre sistemas, processos, transformações, calor e partículas que são conceitos básicos que permitem um direcionamento adequado no tratamento das leis da Termodinâmica.

Os elementos de raciocínio dos estudantes que se aproximam dos das idéias de Carnot e Clausius quando do estabelecimento da segunda lei da Termodinâmica e do conceito de entropia, podem contribuir, em parte, para um melhor ensino da Física (Aurani 1985), uma vez que poderão permitir a elaboração de estratégias a serem aplicadas em sala de aula, levando-se em conta que não há valor real no ensino se a construção pessoal dos conceitos pelo estudante não ocorreu(Rozier & Viennot,1991).

O conceito científico de degradação (ou perda de qualidade) está relacionado à diminuição da capacidade da energia térmica de realizar trabalho útil, ou seja: de produzir energia mais organizada. Neste aspecto, como os processos espontâneos são irreversíveis, a situação de equilíbrio corresponde a uma situação de uma desordem maior. Este conceito de degradação já aparece nos trabalhos de Carnot e Clausius, como será visto no capítulo II.

O conteúdo dos capítulos

No capítulo I apresentamos um levantamento bibliográfico sobre os estudos relativos às concepções de crianças, adolescentes e alunos do curso superior sobre conceitos que são estudados na Termodinâmica.

O capítulo II se inicia com um resumo histórico sobre o conceito de calor de acordo com a visão de Astolfi e Develay e em seguida recortes e análise dos trabalhos de Carnot e Clausius feitos por Aurani em seu trabalho, ressaltando os aspectos que remetem aos conceitos de reversibilidade e irreversibilidade. Além disso, são feitas considerações a respeito de sistema processos, transformação, calor energia e partículas tomando como base os trabalhos de Callen, Cafagne, Gibert, Pacca e Henrique, Carnot e Clausius.

Queremos destacar que, inicialmente o conteúdo do capítulo II deveria se restringir a um breve histórico sobre o desenvolvimento do conceito de calor e dos elementos de raciocínio de Carnot e Clausius durante a elaboração da teoria da Termodinâmica, com vistas à busca de ressonâncias nos raciocínios dos estudantes do ensino médio e superior, pois inicialmente nos interessava a busca das barreiras conceituais dos estudantes. Durante a análise e discussão dos dados brutos surgiu a necessidade de se confrontar os modelos de sistema, processos e transformação do senso comum com os da Termodinâmica. Acreditamos que este aprofundamento poderia valorizar mais as barreiras encontradas e oferecer subsídios mais consistentes para um trabalho pedagógico. Em vista disso foram acrescentadas breves considerações sobre as concepções da Termodinâmica referentes a tais modelos, os quais aparecerão descritos com mais detalhes no capítulo IV.

Tal ampliação está relacionada ao fato de que as ressonâncias encontradas e que se relacionam com as idéias de Carnot e Clausius, possibilitam a procura de pontes que produzam uma maior aproximação entre o conhecimento do senso comum e o da Termodinâmica, mas, esta aproximação ainda resulta como uma forma incompleta de apreensão da consistência das leis, o que, para isso, segundo nosso ponto de vista, implica um aprofundamento maior que é o da confrontação entre as concepções dos estudantes que se distanciam da Termodinâmica .

No capítulo III descrevemos a metodologia de pesquisa, a análise dos dados, o inventário conceitual e o modelo dos estudantes.

Nos capítulos IV e V são apresentados os modelos dos estudantes e os da Termodinâmica apontando as ressonâncias e as barreiras conceituais, bem como as conclusões sobre o trabalho e as dificuldades encontradas pelo investigador durante a realização da pesquisa e as conseqüentes implicações para o ensino.

Esperamos que os resultados apresentados possam servir de âncoras para elaboração de estratégias para o ensino significativo da Termodinâmica. Estas estratégias têm como pressuposto possibilitar o crescimento cognitivo e o amadurecimento pessoal dos estudantes, contribuindo para a construção, por parte de cada um, de um conhecimento científico pessoal. Essa construção envolve necessariamente um relativo afastamento das concepções e da visão do senso comum (Viennot,1979), pelo menos na interpretação das situações e dos fenômenos analisados em sala de aula.

Capítulo I

Levantamento bibliográfico

A seguir, apresentamos uma síntese de algumas pesquisas realizadas nos últimos 35 anos sobre concepções alternativas de crianças e adolescentes referentes a questões que envolvem calor. Elas foram obtidas a partir das argumentações escritas e orais dos estudantes através de aplicações de atividades e/ou entrevistas fornecidas e analisadas por investigadores da área, sendo que algumas delas são apresentadas com mais detalhes que outras, dependendo do grau de interesse que despertou para o nosso trabalho.

Os autores pesquisados

Shayer & Wylam(1981)

Estes investigadores, em um trabalho sobre o desenvolvimento dos conceitos de calor e temperatura em estudantes entre 10 e 13 anos, procuram esclarecer sobre a questão do quanto é possível generalizar sobre níveis de compreensão alcançados por diferentes estudantes sobre um dado conceito, já que há controvérsias a este respeito. Alguns investigadores acreditam que estes níveis obedecem a uma sequência sucessiva de diferentes etapas por todos os alunos. Outros, não acreditam em tais ordenamentos e que o melhor critério que o professor deve utilizar é o que se refere ao conhecimento atual de cada aluno.

Os resultados do trabalho não dão suporte à hipótese de que diferentes argumentações que as crianças apresentam durante a aprendizagem são tão diferentes que é impossível descrever um desenvolvimento hierárquico comum para todos. Pelo contrário, observou-se que o conhecimento do aluno é determinado pelo seu nível de desenvolvimento mental e que os níveis de

assimilação possíveis para os diferentes estágios podem ser utilizados como elementos importantes no ensino-aprendizagem.

Erickson (1979)

Neste artigo sobre calor e temperatura Erickson afirma:

“ Se eu pudesse reduzir toda a psicologia educacional a apenas um princípio, eu poderia dizer que o fator mais importante que influencia a aprendizagem é o que o aprendiz já sabe. Investigue isso e o ensine de acordo”.

Com base nisto ele realiza entrevistas informais e abertas com crianças dos 3 aos 13 anos de idade, gravadas em áudio. Inicialmente foram apresentados materiais concretos que ilustravam os fenômenos do calor para serem manipulados. Em seguida vários problemas foram propostos pelo entrevistador, permitindo a obtenção de idéias como:

- O calor torna o líquido mais leve e então ele sobe.
- Quando um cubo de gelo é colocado na água algum frio sai do cubo e vai para a água.
- Quando uma vareta é aquecida o calor ocupa uma parte dela até preenchê-la. Em seguida vai se movendo e ocupando as outras partes até que acaba a vareta.
- Um cubo de metal fica mais quente que um cubo de madeira ou de açúcar porque: é mais difícil para o ar entrar profundamente nos cubos de metal para esfriá-lo .
- Uma vareta longa se aquece mais rapidamente do que uma pequena porque: a longa tem mais espaço com ar dentro permitindo que o calor viaje por ele.
- A cera derrete porque ela é uma substância mole.
- Um grande cubo de gelo demora mais para derreter do que um cubo pequeno porque: o cubo grande tem uma temperatura mais baixa do que o pequeno.

- Calor é uma substância, algo como ar ou vapor.
- Temperatura é a medida da mistura de calor e frio dentro do objeto.
- Todos os objetos contêm uma mistura de calor e frio.

Erickson conclui explicitando a importância para o ensino do conhecimento das concepções levantadas, pois poderá possibilitar a elaboração de estratégias pelo professor, com vistas a facilitar a compreensão do conteúdo específico de sua área.

Tiberghien (1985)

Em um estudo com crianças de doze e treze anos obtido na França, este investigador, em 1985, obteve o mesmo tipo de resposta obtida por Erickson. Em alguns casos as crianças usam os termos ‘*vapor*’ ou ‘*fumaça*’ para descrever a transmissão de calor. Uma criança disse que: “ *Calor vem do radiador, é como fumaça, que vem e invade a casa*”. Ao pedir para as crianças procurarem dentre uma série de recipientes feitos de diferentes materiais, qual o mais adequado para reter o frio do gelo, a maioria escolheu o metal dando o seguinte motivo: “ *...porque o ferro é mais frio*”.

Em um outro artigo (Tiberghien & Delacote 1979) entrevistaram quinze crianças de dez e onze anos sobre questões relacionadas à propagação de calor por condução e convecção, verificando que elas fazem associações de calor com vida, fontes e transformações e raramente utilizam a palavra temperatura. A propagação do calor é admitida com mais frequência no caso da convecção, devido ao deslocamento da matéria. A conclusão do trabalho é que a maioria das crianças não possuem um modelo estável, mas são capazes de ir além da percepção imediata.

Em seu artigo de 1985, destaca que os alunos de 12 a 14 anos têm dificuldades em identificar **sistemas**, apontando que o procedimento destes em relação a situações experimentais, leva em conta apenas objetos, descrevendo-os através de:

- eventos: O corpo “se” aquece, está aquecendo ou está resfriando;
- propriedades: é frio, é quente, é sólido, é duro, é fino;

- suas funções: o café é esquentado para ser bebido; o alimento é cozinhado para ser comido;

Esta maneira de conceber sistemas leva a associações entre:

- uma propriedade do objeto com um evento: *“o gelo é frio, logo ele resfria”*.
- Uma propriedade com outra: *“a panela é de metal, por isto pega calor”*
- Um objeto e outro em situação análoga: *“a boca queimou por causa do café”*

Clough & Driver (1985)

Num estudo sobre concepções de condução de calor realizado através de entrevistas com estudantes de doze a dezesseis anos, as autoras verificaram que as concepções de calor existente entre as crianças mais novas também aparecem no pensamento de estudantes do ensino médio.

Elas verificaram que, como as crianças mais jovens, os estudantes do ensino médio concebem tanto frio como calor como entidades semelhantes a uma substância e alguns estudantes não consideram calor e frio como pólos de uma mesma dimensão. Dois exemplos que ilustram o frio como uma substância é:

- *“O metal é mais frio porque o frio passa através dele muito mais rapidamente do que no plástico”*.(jovem de dezesseis anos)
- *Metal absorve mais frio que o plástico* (jovem de doze anos)

As noções de calor e frio como substâncias materiais, frequentemente com propriedades dinâmicas parecem ser poderosas e persistentes. Como esta idéia encontra ressonância no desenvolvimento histórico do conceito de calor, a exploração deste desenvolvimento pode ser utilizada como estratégia para promover um fórum de discussões entre professores e alunos sobre as idéias

alternativas, seus méritos, defeitos e seus desvios das idéias atualmente aceitas pela ciência. Ser identificado com grandes cientistas do passado dá muito mais status do que considerar aquela concepção como erro.

Alomá & Malaver (2007)

Os autores analisam os conceitos relativos à energia como aspectos fundamentais em Termodinâmica e o teorema de Carnot como uma aplicação prática da área de engenharia, em textos universitários de Termodinâmica dirigidos a estudantes de engenharia na Venezuela. Em seu trabalho, nos interessou a citação das conclusões de vários investigadores (Michinel, D'Alessandro-Martinez, Solbes, Traver, Alvarez, Níaz, de Posada, Goncari, Giorgi, Malaver, Pujol, Perez-Bustamonte, Michinel, e outros, sobre a forma como alguns livros didáticos abordam a Termodinâmica. Criticando:

- a estrutura da prosa e os diagramas, nos textos, que podem gerar concepções erradas nos estudantes.
- existências de interpretações espontâneas e não formais dos fenômenos físicos que podem afetar a aprendizagem das ciências.
- imprecisões sobre a estrutura da matéria que podem induzir os estudantes a falsas concepções.
- termos como energia cinética, energia potencial e uma noção da energia como substância ou ente material capaz de modificar os corpos e produzir mudanças de estado físico.
- apresentam o conceito de calor como uma forma de transferência de energia.
- confusão generalizada em expressões e notações dos diversos tipos de velocidades moleculares em sistemas gasosos.
- erros de interpretação do teorema de Carnot.

Ainda citando diversos investigadores, apontam que o conhecimento profissional dos professores não apresenta suficiente solidez científica quando trata de fenômenos como evaporação e ebulição dos líquidos, permanecendo a concepção do senso comum.

Apontam que as dificuldades dos estudantes e dos professores na compreensão do conceito de energia se estende ao conceito de calor e trabalho.

Sobre os textos didáticos analisados, os autores dizem ainda que:

- A maioria não mostra uma conceituação de energia. Fazem apenas referências a termos como energia cinética, potencial, translacional e apresenta uma noção de energia como uma substância ou ente material capaz de modificar os corpos e produzir mudanças de estado.
- Vários textos mostram o conceito de calor como uma transferência de energia. Em todos os textos analisados aparecem frases que confundem o calor como uma forma de energia ou o definem como energia que se transfere.
- A definição de trabalho é apresentada como forma de transferência de energia e em todos eles é a ação de uma força em um deslocamento, porém, como ocorre na conceituação de calor, apresentam frases que se referem ao trabalho como energia .
- O teorema de Carnot é apresentado na maioria das vezes como se a eficiência de todas as máquinas reversíveis fosse igual à do ciclo de Carnot quando operam entre os mesmos limites de temperatura.

Pacca & Henrique (2004)

Neste trabalho, as autoras oferecem uma contribuição no sentido de solucionar dificuldades apontadas por investigadores como Grimelini, Tomasini, Driver, Duit e outros, relativas à compreensão do conceito de energia e sua conservação, na análise de fenômenos físicos, por parte dos estudantes. Focalizam, também, a dificuldade dos professores na planificação de estratégias adequadas para enfrentar as principais características do raciocínio do senso comum com relação ao processo de construção do conhecimento científico na sala de aula.

Discutem episódios que revelam o potencial de utilização de analogias na construção de energia potencial gravitacional e outros que procuram provocar **conflitos cognitivos** nos alunos no processo de análise de fenômenos que envolvem a conservação da energia.

Analisando as concepções dos professores do ensino médio, que participam de um curso de formação contínua coordenado por Pacca sobre fenômenos que envolvem os conceitos de energia, na mecânica, as autoras encontraram três idéias fundamentais associadas ao conceito de energia:

- como algo que os corpos possuem e que os permite realizar alguma ação;
- os corpos que se movem têm energia;
- a energia tem existência quase material e pode armazenar-se dentro dos objetos. Quando se fala de que a comida tem energia armazenada, se sugere que a energia é uma substância.

Estas concepções pertencem ao senso comum e constituem a origem dos obstáculos de aprendizagem da física que trata da transformação e conservação da energia.

Segundo elas, a descrição e interpretação dos fenômenos físicos através da transformação e conservação da energia envolvem, principalmente, a observação de interações físicas, a delimitação de **sistemas de corpos** ou **sistemas físicos** e a **caracterização dos estados desse sistema**; além disso, essa interpretação deve considerar que as quantidades físicas que caracterizam tais estados podem depender de referenciais adotados arbitrariamente.

Chamam a atenção para o fato de que, a distância que existe entre a perspectiva espontânea e a perspectiva científica ao analisar os fenômenos físicos é patente:

a) **visão local**, própria do raciocínio do senso comum, **que se opõe à idéia de sistema de corpos e de interações físicas**;

b) a concepção de grandezas físicas como **qualidades intrínsecas** aos corpos, **que se opõem à idéia de quantidades que dependem de corpos em interação e de referências eleitas arbitrariamente**.

As autoras, apontando a distância existente entre a ciência do professor e do aluno, acreditam que o trabalho com os professores permite, devido à

oportunidade oferecida para que eles reflitam com maior profundidade os fenômenos físicos, que possam ser localizadas possíveis dificuldades de aprendizagens ocasionadas pelas diferenças entre os modos de pensar do senso comum e o pensamento científico e conseqüentemente melhorem sua atuação didática.

Através de uma seqüência de atividades relacionadas ao conceito de energia com foco em sua conservação que ocorre em seus processos de transformação, verificou-se a possibilidade de ocorrência de discussões que contribuem para a compreensão da energia potencial gravitacional como associada ao campo e não como uma propriedade do corpo.

(Rozier & Viennot,1991)

No artigo *Argumentação dos estudantes em Termodinâmica* que toma como suporte experimental um trabalho realizado por S.Rozier (1987), que trabalhou com aproximadamente duzentos estudantes (alunos da Universidade de Paris e professores de uma sessão de treinamento), verificou-se que, de maneira geral, eles reduzem a complexidade dos problemas que envolvem conceitos de termodinâmica. Percebem-se argumentações com ausência de variáveis relevantes e outras mais elaboradas, onde todas as variáveis são consideradas mas através da utilização de um caminho simplificado: o “ argumento linear causal”.

Com relação à redução do número de variáveis, verifica-se que os estudantes esquecem uma variável relevante, fundem duas delas ou apresentam falta de simetria nas implicações.

As autoras citando Piaget e Inhelder (1941) têm mostrado que crianças lidando com três variáveis cinemáticas (s,v,t), consideram uma dessas quantidades ligadas apenas uma das outras; “ O mais rápido é o mais distante”. Em outros estudos, (Viennot, 1982, Maurines, 1986) mostram dificuldades similares. A Termodinâmica, sendo uma atividade mental a priori, aumenta a dificuldade no seu ensino principalmente porque seu estudo envolve muitas variáveis.

Ao tentarem explicar, numa compressão adiabática e em termos de partículas, por que a pressão e a temperatura do gás aumentam, os estudantes

revelam um modo de pensar que contradiz a teoria Cinética dos Gases e inclusive os dados apresentados no problema.

Um dos fatores responsável por tais contradições, segundo as autoras, são decorrentes do raciocínio linear causal, utilizado por estes estudantes . Em um experimento, (Rozier, 1987), com a finalidade de refinar este ponto de vista e para verificar se este tipo de argumentação correspondia a uma forma de ajudar na interpretação das idéias relacionadas à termodinâmica, **constatou que 69% deles pensam que a energia cinética média das moléculas no estado líquido durante a liquefação é menor que a do vapor.**

As autoras do artigo, optando por não discutir a correção das argumentações, enfatizam que “tais raciocínios simples qualitativos” tratam de questões por alto, omitindo dificuldades daqueles que utilizam variáveis múltiplas, que pelo fato de não serem focalizadas possibilitam o surgimento das contradições. Em vista disso, as autoras colocam as seguintes questões:

- Que argumentação deve ser utilizada para ajudar os estudantes na compreensão de novos conceitos?
- Que espécie de argumentação eles deverão aprender para que explicitem suas respostas de maneira adequada?

Segundo as autoras, se houver um interesse em trabalhar argumentações que envolvam várias variáveis, o fenômeno deve ser ilustrado conectando-o com a estrutura microscópica da matéria, escolhendo inicialmente exemplos simples, como o da área de um retângulo , que é uma função de duas variáveis. Argumentações qualitativas profundas podem ser treinadas com exemplos similares mais simples.

Elas enfatizam, entretanto, que tais objetivos de ensino ligam-se outros não muito favoráveis neste momento, ofuscados como são por objetivos dos conteúdos específicos. Contudo, um ponto pode ser ao menos esclarecido: para nossos estudantes, argumentações lineares causais são, provavelmente, resultado de ensino que nunca entrou em confronto com eles.

Parece portanto, que não podemos evitar um debate sobre objetivos de ensino que consideram de forma mais explícita, espécies de argumentação que esperamos que os estudantes aprendam.

Cafagne(1991;1996)

Em sua tese de mestrado, a autora estudou as concepções alternativas de alunos do ensino médio de uma escola pública de São Paulo a respeito dos conceitos de calor e temperatura, condutores e isolantes, equilíbrio térmico e condução de calor. Neste trabalho, pode-se verificar que:

- poucos alunos descrevem o calor em termos de energia. Na maioria dos casos predomina o aspecto material do calor. Tanto o calor como o frio estão associados à substância, que podem entrar, sair, ou serem retiradas. Ou usam substâncias como suporte do calor. Tal visão revela a utilização de um modelo similar ao calórico.
- calor associado ao ambiente, aos efeitos provocados ou à mudança de fase.
- idéia de movimento de calor num só sentido e parecendo revelar a existência de apenas um tipo de calor.
- calor relacionados a temperatura acima e frio com temperatura abaixo da temperatura ambiente.
- o material é determinante para possibilitar a entrada ou a saída do calor possuindo, o calor e o frio, afinidades diferentes: o frio por objetos duros e calor por objetos leves.
- Existem dois tipos de calor: “calor quente” e “calor frio”.
- Calor como oposição ao frio.
- “Calor “ e “frio” são opostos sendo que um deles é mais poderoso do que o outro, o que atribui aos calores propriedade aditiva-subtrativa.
- O encontro entre dois corpos com temperaturas muito diferentes é violento, enquanto que o encontro de corpos com temperaturas próximas não o é.
- Num corpo em equilíbrio térmico só existe um só tipo de calor, ou seja, “calor frio” ou “calor quente”.
- “ Fonte fria dá frio”, “fonte quente” dá calor.
- Equilíbrios térmicos envolvendo corpos quentes são mais rápidos dos que os que envolvem corpos frios.

- Substâncias conduzem de modos diferentes porque o calor viaja mais rápido em algumas do que em outras.
- Objetos de um mesmo meio estão em temperaturas diferentes.
- Os corpos possuem um estado natural de calor. Um corpo é naturalmente frio ou quente.
- O calor é uma propriedade dinâmica e não como uma propriedade inerente à constituição da matéria.

Já em sua tese de doutorado, esta mesma autora (Cafagne 1996) investigou a estrutura do conhecimento do senso comum a respeito dos fenômenos térmicos, a partir das explicações elaboradas em termos da oposição do frio ao quente por estudantes do ensino médio cujo inventário conceitual foi elaborado em sua tese de mestrado. Aqui, partindo do confronto entre os modos de pensar da Termodinâmica e os dos alunos, chega à conclusão que barreiras como a substancialização do calor e a causalidade linear impedem a percepção dos conceitos de energia interna e trabalho, e do princípio de conservação da energia. Mas reconhece ocorrência de idéias que se aproximam do conceito científico no que se refere aos modos de pensar mais ingênuos.

Estes dois trabalhos revelam que a insensibilidade dos alunos às explicações científicas decorre de dois fatores:

1 - respondem pela necessidade do dia a dia, uma vez que não são aleatórias, mas comportam modelos explicativos que evoluem segundo a causalidade que encerram, em sua forma e conteúdo, de modo integrado, resultando numa relação coerente entre o dado extraído do mundo real e aquele interpretado pelo “mundo do senso comum”, o que leva a admitir que o conhecimento do senso comum pode ser visto como um corpo de conhecimento solidário e uma estrutura.

2 - se relaciona com o fato de que as informações proporcionadas pela escola não são suficientes para desenvolver o significado da percepção de novidades capazes de levar ao conhecimento científico desejado.

Na sua interpretação, a autora atribui à falta de consciência dos alunos sobre suas concepções contraditórias, ao fato de que elas não o são no mundo do senso comum. As questões propostas nas escolas passam despercebidas porque não constituem novas possibilidades abertas dentro da estrutura do

senso comum e incapazes de perceber as incoerências entre os modos de pensar diferentes.

Como os professores não conhecem as explicações do senso comum e as reações que o conteúdo ensinado pode proporcionar, não têm como fazer os alunos perceberem as inconsistências de suas idéias.

Brook et Al (1983)

O grupo analisou respostas escritas de estudantes de quinze anos para seis questões , onde cada uma delas requeria respostas utilizando a idéia de partículas em diferentes contextos. Procurou-se com isso, fazer um levantamento das idéias dos estudantes sobre a natureza da matéria, os sólidos, líquidos e gases. E se eles usavam o modelo científico sobre partículas para interpretar situações do dia a dia.

As idéias dos estudantes mostram que:

- não fazem considerações sobre o bombardeio com as paredes do recipiente como explicação da relação temperatura-pressão para gases.
- partículas incham ou se fundem.
- a intensidade da força entre as partículas varia com a temperatura.
- as forças entre as partículas de um gás e as paredes do recipiente que o contém explicam a pressão.
- as forças entre as partículas ficam mais fracas com o aumento de temperatura e isto explica a mudança de fase.
- a mudança de fase é um processo contínuo.
- partículas param ao se esfriar ou a 0°C.
- partículas se movem de um lado para outro nos sólidos e vibram nos líquidos e gases.
- o espaço entre as partículas não se encontram necessariamente vazio.
- partículas se movem mais e ocupam mais espaço quando aquecidas.

Aurani (1985)

Em um trabalho voltado para a formação dos professores, a autora procura recuperar elementos históricos quando do estabelecimento da segunda

lei da Termodinâmica e do conceito de entropia, visando a utilização no ensino de Física. Discute teorias do calor do século XVIII – flogístico e calórico – do ponto de vista dos elementos principais que as caracterizam como formas coerentes e diferentes de pensar os fenômenos do calor, pretendendo com isso, dar subsídios para uma maior aproximação entre os modos de pensar dos alunos e o conteúdo apresentado em sala de aula pelo professor.

Este trabalho levanta as seguintes questões: - a idéia de movimento como causa do calor está contida no conceito de calórico de Lavoisier, já que o movimento é característica essencial de um fluido? - E num fluido muito sutil, real, de substância material, sem ser matéria, cujos efeitos sobre a matéria podem ser encarados de maneira abstrata e matemática?

A idéia da conservação do calórico não comportava um dos elementos importantes para a idéia de conservação que advém com a conservação da energia, o da geração de calor pelo trabalho: *o de transformação*. Nesse ponto então, encontramos a *ruptura* entre a moderna teoria do calor e a teoria do calórico e que levará ao conceito de entropia.

Um traço notável no desenvolvimento da Termodinâmica que é citado, é a busca da generalização, que constitui um traço marcante em um momento posterior, com Clausius, onde significado de transformação é generalizado para incluir não só as transformações de calor em trabalho e vice-versa, mas também as de calor de uma temperatura a calor de outra temperatura (qualidade do calor), bem como as mudanças no estado de agregação das substâncias.

As descobertas que se relacionam com a conservação da energia entre 1842 e 1847, efetuadas por Mayer, Joule, Helmholtz e outros, levaram a uma crise sobre o conceito de calórico que se percebe através dos questionamentos de Kelvin que inicialmente se inclinava pelos desenvolvimentos de Carnot, mas ao mesmo tempo reconhecia que era imperativo integrar a “conservação do efeito mecânico” à teoria do calor:

“Quando a ação térmica é gasta na condução do calor através de um sólido, o que acontece com o efeito mecânico que ele produz? Nada pode ser perdido nas operações da natureza - nenhuma energia poderia ser destruída. Que efeito pode ser

produzido no lugar do efeito mecânico que é perdido? Uma teoria do calor correta, imperativamente necessita de uma resposta para essa questão; nenhuma resposta pode ainda ser dada no presente estágio da ciência.”(Apud Aurani,K.p50)

A harmonização entre os desenvolvimentos de Carnot e as implicações da conservação da energia foi efetuada por Clausius como pode se ver nesta citação, também destacada por Aurani:

“Em todos os casos onde uma quantidade de calor é convertida em trabalho, e onde o corpo, efetuando essa transformação, retorna no final às suas condições iniciais, uma outra quantidade de calor deve ser necessariamente transferida de um corpo mais quente para um corpo mais frio.”

No capítulo II faremos um relato mais completo dos elementos de raciocínio de Carnot e Clausius que levaram ao estabelecimento da segunda lei da Termodinâmica focalizando os aspectos que se relacionam com a qualidade do calor, por serem muito significativos para o nosso trabalho.

Martinez e Pérez (1997)

Os autores realizaram uma pesquisa cujo interesse foi explorar se os conceitos de energia interna e temperatura vinculados a um modelo molecular da matéria, que poderiam ser mais significativos do que o que comumente se ensina no nível médio. Com esse objetivo, elaboraram uma sequência didática que foi aplicada nesse nível escolar e posteriormente no ensino superior. O trabalho foi fundamentado na noção de aprendizagem significativa que implica em modificações não triviais na estrutura cognitiva dos alunos. As conclusões, apontaram para uma melhoria da qualidade das concepções dos estudantes acerca dos fenômenos da termodinâmica quando comparados àqueles que não foram submetidos a este tipo de sequência.

Albert (1978)

Fundamentada em trabalhos de Piaget, esta investigadora utiliza a idéia de que é no processo de interação com o meio ambiente que se constrói, na criança, as várias noções, intuições e formas de pensamento que determinam o seu desenvolvimento cognitivo. A inteligência depende do próprio meio para a sua construção, graças às trocas que podem ocorrer entre eles e que são mediadas através da ação. O conhecimento não está no sujeito e nem no meio, mas é decorrente das contínuas interações entre os dois. Todo pensamento se origina na ação e para se conhecer a gênese das operações intelectuais é imprescindível a observação da interação do sujeito com o objeto. A partir desta visão, a investigadora procurou descobrir como ocorre o desenvolvimento dos conceitos de “quente”, “morno”, “calor” e “temperatura” nas crianças de quatro até jovens de dezesseis anos.

A análise de respostas sobre questões que envolviam os citados conceitos permitiu a identificação de “pensamentos padrões” para diferentes estágios de desenvolvimento, permitindo uma classificação em seis categorias cada uma delas agrupando um, dois ou três padrões. Tais categorias foram:

Categoria I: Construção de “Corpos quentes”

Dos quatro aos seis anos a criança expressa um conceito de **que calor é a fonte**; “ O Sol é quente”; “o fogo é quente”; “ O Sol torna você quente”; “ o forno torna você quente”; “Água fervendo torna você quente”. Nesta faixa de idade percebe-se:

1 – Construção de “corpos quentes” através de direcionamento espacial: a concepção de fonte de calor como um “corpo quente” é baseada em experiências cotidianas da criança com a radiação que preenche o espaço em que ela vive e que provem de uma fonte localizada no espaço (como o Sol, um forno ou uma lareira) e que incide em áreas do seu corpo.

Percebe-se que aos quatro anos, as crianças não se referem à localização da fonte. Elas dizem: “o Sol é quente”, “o forno é quente”, o fogo é quente”, etc. Aos cinco anos elas dizem; “O Sol me esquenta”, “O Sol torna

“você quente”, etc. Nesta faixa, as crianças ampliam a idéia de fontes para corpos como cobertores, calças e outros objetos que as fazem sentir-se quentes mas que não possuem o mesmo aspecto “direcional” que ocorre nas fontes de radiação.

2 - Construção espacial entre a fonte de calor e o objeto afetado:

Por volta dos cinco anos “corpo quente” (fonte de calor) é diferenciado, pelas crianças, de outros objetos aquecidos por ele. Elas usam a fonte como um agente que torna outros objetos quentes sem se referir aos seus próprios sentimentos. Por exemplo, ao responder à questão “ Quem faz o lado de fora ficar quente?” uma criança respondeu: “o Sol faz isso”. Aqui, pela primeira vez a criança descreve a atividade do Sol sem se referir ao efeito direto sobre ela mesma.

3- calor como algo que pode ser subitamente criado ou destruído:

Entre quatro e seis anos, as crianças apresentam um número limitado de formas de produção de calor. Quando elas descrevem manipulações com objetos que podem produzir calor, mencionam atividades de ligar e desligar (fornos, lâmpadas, aquecedores, etc) esperando, com isso, que eles se tornem quentes ou frios de forma imediata. As ações estão associadas diretamente com as expectativas de que o objeto pode se tornar quente ou frio. Não há, aqui, um pensamento estruturado. Isto sugere que a idéia de que a existência de um lugar aquecido é uma condição para um objeto se tornar quente. Calor é alguma coisa que vai da fonte para o objeto acrescentado de um efeito que envolve alguma atividade como a de ligar lâmpadas, fornos e outros aparelhos e que envolve alguma expectativa de se criar um ambiente aquecido.

Categoria II: Natureza condicional do calor

Por volta dos sete anos nota-se um desenvolvimento que revela um progresso numa direção mais objetiva do conhecimento sobre o calor. A criança explicita que “objetos quentes” podem ser quentes algumas vezes. A

noção de “lugar de calor” como uma propriedade dos objetos adquire um caráter condicional, como pode ser visto a seguir:

1- Natureza condicional do calor baseada em sistemas de planos.

Aos sete anos podem e querem fazer algumas coisas envolvendo calor (reveladas em expressões como “*se você liga um forno para cozinhar*” ou “*se você o coloca sobre uma grelha*” e assim por diante) pois eles conhecem uma variedade de manipulações e procedimentos para produzir calor. As palavras “*se*” e a expressão “*algumas vezes*” podem ocorrer de forma freqüente em suas argumentações sugerindo que há uma consciência das diferentes possibilidades de ações para aquisição ou não de calor.

2 - Natureza condicional do calor com base nas atividades do próprio corpo.

Aos oito anos as crianças se referem às atividades ligadas aos próprios corpos para argumentarem sobre o calor. Por exemplo, sobre a questão “*onde também pode estar o calor?*” Anna (8 anos) respondeu: “*Se você corre muito durante um longo tempo, você pode senti-lo*” ou Gil (8 anos): “*É como se você tirasse um soneca e em seguida você sai e corre bastante por um longo tempo*”. Tais padrões de respostas que implica em uma reflexão sobre experiências passadas são usadas a partir dessa idade de forma freqüente. O uso de expressões e/ou palavras como: “*por um longo tempo*”, “*muito*” e “*algumas vezes*” estão sempre em conexão com as atividades corporais. Com freqüência utilizam o advérbio “*algumas vezes*” quando se referem a tornar-se quentes e na maioria das vezes a ligação entre o sentimento térmico e a a atividade corporal é através de uma corrida. A criança está consciente que correr é uma decisão própria e que a corrida para ela ser longa, depende de sua própria decisão naquele momento. Isto revela uma construção do “*quente*” possuindo um aspecto condicional que depende de sua decisão naquele momento.

3 – “tornar-se quente é um processo”

Já foi dito que aos cinco anos, a criança tem a idéia de que o ar torna-se quente por causa do Sol. Aos sete, um novo aspecto aparece: o aquecimento

do ar pelo Sol aparece como um processo. Por exemplo, Phillip(7) disse: “ O sol faz o ar tornar-se quente” ou Holly(7): O Sol faz o ar ficar muito quente e em seguida o ar torna-se quente”, etc. Assim, as crianças adquirem a concepção que esquentar-se é um processo que leva um certo tempo (tanto para a fonte como para o objeto) e que o calor é alguma coisa ativa no objeto que o torna aquecido.

A raiz da concepção de *“tornar-se quente”* como um processo está na experiência de sentir-se aquecido quando o nosso corpo é exposto à radiação solar. Neste caso, o aquecimento penetra e se espalha pelo corpo. Isto pode ser percebido nos seguintes argumentos: Anna(8) *“O Sol brilha e bate no cabelo deixando-o brilhante”*. O Sol é visto como *“algo que trabalha”* e que este trabalho leva tempo.

A evidência desses pensamentos ocorre devido à freqüência de expressões como *“Eles tornam-se quentes”*, *“tornam-se aquecidos”* que aparecem nas entrevistas. Além disso, o uso freqüente da palavra calor sugere o começo de uma diferenciação entre o calor e o objeto.

Categoria III: Calor como uma única dimensão

Entre as idades de quatro a sete anos, as crianças não diferenciam entre *“quente”* e *“morno”*, pois utilizam os dois termos de forma indiferenciada. A diferenciação começa a ocorrer a partir dos oito anos e ao mesmo tempo, referem-se ao calor e morno como diferentes manifestações de uma mesma dimensão. Por exemplo, para a pergunta *“Dê exemplos de calor”*, Teresa respondeu: *“ Bem, se ele está realmente quente e você o toca, você se queimará”*, Karen(9): *“Se colocar seus dedos rapidamente na chama de uma vela, você não se queima, mas se eles ficarem por longo tempo, se queimarão”*, Ron(9) assinalou: *“Quente produz queimadura, mas morno não...”*, etc. O fato das crianças descreverem o quente e o morno através das sensações provocadas ao se tocar objetos quentes ou mornos, mostram que quente e morno são diferentes manifestações de uma mesma dimensão.

1 – Quente e morno como uma mesma dimensão

Quando questionadas sobre a diferença entre calor e morno, crianças a partir dos oito anos descrevem como manipulam e operam com objetos quentes e mornos. Ao tocar um objeto quente, você pode se queimar e o contrário ocorre quando um objeto morno é tocado. Mais tarde, aos nove anos, dois novos aspectos aparecem: 1 - se uma chama for tocada rapidamente você pode não se queimar, o que não ocorre quando se toca lentamente. 2 - se alguma coisa for aquecida e em seguida tocada, ela pode estar quente ou morna. Claramente a criança reflete sobre qual o efeito sobre ele, o que se sente e qual a sua reação ao entrar em contato com o objeto. A queimadura é o acontecimento extremo que aparece no pensamento das crianças. Este pensamento é estruturado a partir de um referencial: a queimadura. Isto permite que quente e morno sejam justapostos e tratados como um continuum. A análise revela que o tratamento de quente e frio como diferentes manifestações de uma mesma dimensão foi adquirido como resultado de uma atividade em construção.

Categoria IV: Construção da idéia de calor como uma entidade independente

Aos oito anos há evolução na distinção entre calor e o objeto no qual se encontra o calor. O calor passa a se constituir como algo que se encontra em volta do objeto quente em um certo lugar do espaço onde a criança pode estar ou se mover.

Há duas formas de pensamento que revelam esta distinção: 1 - o calor como algo que pode ser começar e ser mantido por uma fonte. 2 – O calor é localizado em alguma região do espaço: em volta de um forno ou de uma lareira. Falemos um pouco mais sobre isso:

1 – o calor começa e é mantido por uma fonte

Aos oito anos, as crianças inserem em suas descrições, afirmações que enfatizam a independência entre calor e objeto: “Se você coloca sobre uma

grelha um objeto quente, ele capta calor, mas você tem que ligar a grelha.” A ênfase está sobre o objeto que “trabalha” e está em atividade enquanto produz calor. As ações das crianças são necessárias apenas para que o objeto comece a “trabalhar”. O “trabalho” do objeto é mantido por ele mesmo de forma automática porque é da própria natureza do objeto tal ocorrência. Embora calor seja algo que é independente do objeto, ainda reside nele.

2 - O Calor se espalha pelo espaço

Aos oito anos, um novo aspecto surge nas expressões das crianças: elas se referem explicitamente ao calor em termos espaciais (por exemplo: “*calor sobe*”). E descreve situações e arranjos nos quais um objeto torna-se quente ou capta calor (exemplo: “*você pode sentar frente a uma lareira e captar calor*”). Além disso, o calor é frequentemente descrito como algo em movimento (“*ele sobe*”, “*ele desce*”, “*ele vai para janela*”, “*ele vai*”). O arranjo espacial inclui, também, as próprias ações das crianças (sentada em frente à lareira, ligando e abrindo o fogão, etc). Estas situações mostram que para elas, calor é algo que se sente, se espalha pelo espaço e se move.

Os dados mostram uma forma padrão de repetição nos argumentos “*o calor vem de encontro a mim (ou eu vou para perto dele) e o sinto.*” Isto mostra um componente fundamental para o início da construção de calor como uma entidade localizada: as diferentes sensações térmicas experimentadas quando ocorre a aproximação e afastamento de objetos quentes.

Categoria V: A conceituação de temperatura

De oito para dez anos percebe-se, pela primeira vez, a idéia de “*graus*” e de distinção entre “*níveis de calor*”. A maioria das crianças nessa faixa etária fala de níveis de calor associando-os a números. Por exemplo, para a questão “*o que pode ser morno*” Jerry(8) respondeu: “*É como agora no ar, que está a noventa e cinco. Diferentemente de quando está sessenta, sessenta e cinco e setenta, ele está mais morno.*” Ou na questão “*o que é menos quente que o Sol?*” Robin(8) respondeu: “*Quando você tem uma grelha que está a 300 e uma outra que está a quatrocentos, a de quatrocentos está mais quente que a*

de trezentos”. Algumas crianças quando questionadas sobre calor em fornos, utilizaram palavras como: “*movendo*” o ponteiro, ou “*girando-o*” para se referirem à mudança de um nível a outro de calor. Estes fatos dão suporte à nossa hipótese de que as manipulações são o estopim da consciência sobre mudança de temperatura. Algumas crianças argumentaram que na mudança de um nível mais baixo para o mais alto gastava-se algum tempo. Por exemplo, Rable(8) descreveu que 200° de calor em um forno é mais alto que 100° porque “*Se você coloca o ponteiro em um número, o forno fornece uma quantidade de calor e quando vai mudando para um número mais alto ele vai ficando mais quente.*”

1 – Nível de calor construído com base em manipulações de ponteiros

Esta concepção está relacionada com a construção de um processo contínuo que se relaciona ao calor e de níveis discretos que se relacionam à temperatura, com base em manipulações de ponteiros que indicam temperaturas de fornos. Ao movimentar o ponteiro de um número para outro, a ação tem um ponto final que é captado pela mente da criança durante o intervalo de tempo em que o ponteiro se movimenta. As marcas no aparelho aparecerem de forma discreta, mas há a aquisição da consciência de um continuum devido a ação de movimentar o ponteiro. O pensamento da criança é construído com base em três componentes: a- o ponteiro de indicação da temperatura de um forno ou aquecedor. B – a consciência da passagem do tempo durante a transição de um nível para outro. C – O fato de que números, que são entidades independentes, serem associados a níveis de calor , faz com que estes níveis também sejam considerados entidades discretas(as temperaturas)

Categoria VI: *energia mecânica como uma fonte de calor*

Aos oito, nove anos e mais tarde, aparece a idéia de que calor pode ser produzido em um corpo através da energia mecânica. Ao ser pedido para que desse um exemplo de calor, a maioria das crianças relacionaram o movimento de um corpo e seu estado térmico final. Por exemplo: ao ser pedido para dar

mais exemplos de calor, Amy(10) respondeu: *“Os pneus de uma bicicleta ficam quentes você a dirige por muito tempo”*.

Nas expressões utilizadas por essas crianças, encontram-se palavras como “girando em volta”, “ele vai”, etc. Além disso, eles utilizam expressões que indicam que o processo tem longa duração (como *“se movimenta por um longo tempo”*, *“andar em volta”*, *“tornando-se quente”* e expressões de sentimento de calor em sua própria atividade motora.

Síntese das idéias alternativas

Todos os trabalhos analisados forneceram contribuições diversas, que, no seu conjunto, serviram para dar consistência ao nosso, ampliando as zonas de “luz” quando procurávamos as respostas para nosso problema de pesquisa. No de Albert, devido à apresentação do desenvolvimento do conceito de calor desde crianças de quatro até jovens de dezesseis anos, num processo de categorização que se mostrou muito útil na análise futura de nossos dados, nos levou a colocá-lo em maior extensão.

As leituras realizadas e alguns aspectos recorrentes nestes trabalhos, a saber:

- Os alunos pensam a partir de suas constantes interações com o meio.
- As idéias espontâneas resistem a mudanças, pois se verificam semelhanças às das crianças entre adolescentes, professores e autores de livros didáticos.
- É possível identificar um modelo comum a muitos estudantes.
- Avaliações feitas com estudantes submetidos a sequência de ensino inovadoras mostraram uma melhoria de qualidade em relação àqueles que não foram submetidos a este tipo de aprendizagem.
- Aspectos relacionados ao modo de fazer do cientista apresentam ressonâncias com as idéias dos estudantes.
- É necessário que se dê atenção à qualidade das argumentações para que se procurem formas de torná-las consistentes com as leis científicas.

- Abundância já coletada e sistematizada das idéias do senso comum de calor, temperatura, energia e outros relativos a fenômeno térmicos .

Tendo como base muitos aspectos apresentados por uma parte desta pesquisa bibliográfica, fomos investigar as concepções prévias dos estudantes sobre fenômenos irreversíveis e compará-las com as da Termodinâmica.

Durante a análise dos nossos dados, ao percebermos que a ausência do modelo de **sistema** termodinâmico se constituía como um sério obstáculo à compreensão das leis da Termodinâmica, ampliamos esta pesquisa bibliográfica, introduzindo trabalhos como os de Pacca e Cafagne.

Estes trabalhos, relidos diversas vezes, nos forneceram condições para elaborar e aperfeiçoar nosso instrumento de análise, como é o caso do de Albert, ao explicitar categorias capazes de dar conta dos dados encontrados.

Capítulo II

Calor e Termodinâmica : A desagregação interna dos corpos

Iniciamos este capítulo com um breve histórico sobre a noção de calor com base nos autores Astolfi e Develay (1991), em seguida apresentamos recortes dos escritos originais de Carnot e Clausius extraídos da tese de mestrado *“Ensino de conceitos: estudo das origens da 2a lei da Termodinâmica e do conceito de entropia a partir do século XVIII “*, de Aurani, K. M. (1985). Pretendemos com tais recortes apontar elementos de raciocínio de Sadi Carnot em *“Reflexions sur La puissance motrice du Feu et sur las machines propres a développer cette puissance”* publicados em 1824 pela editora Bachelier, Paris e de Clausius em seus artigos: *“On a modified form of the second Law fundamental theorem in the Mechanical Theory of Heat”*, de 1856; *“On the application of theorem of the equivalence of transformations to the internal work of a mass of matter”*, de 1862; *“On different forms of the fundamental equations of the mechanical theory of heat and their convenience for application”*, de 1867.

Os elementos de raciocínio que serão destacados pretendem revelar aspectos do desenvolvimento de uma teoria, em que, um conceito ao ser substituído por outro, permitiu o desenvolvimento da Termodinâmica na direção de uma melhor descrição dos fenômenos térmicos, se ajustando, melhor aos fatos reais.

Na parte final, fazemos algumas considerações sobre a Termodinâmica com destaque para as idéias de sistema e processo, baseando-se em Callen (2005), Pacca (2004), Cafagne(1996) e Gibert(1962)

O conceito de calor

No livro *A didática das ciências*, Astolfi & Develay(1991) afirmam que o calor, inclusive nos dias atuais, sempre teve um duplo estatuto:

- *Calorimétrico*, que apresenta uma abordagem experimental dirigindo-se muito rapidamente às medidas e procurando explicitamente ou não, uma quantidade conservadora.
- *Energético*, mais voltado à pesquisa de novas causas, dependente de um encaminhamento modelizador, no qual tenta-se introduzir resultados de experiências.

A corrente calorimétrica identificada como substancialista, tem origem na antiguidade. Aristóteles tenta descrever o calor como uma das quatro qualidades da matéria junto com o frio, a umidade e a aridez, correspondendo aos quatro estados desta mesma matéria: o fogo, a água, a Terra e o ar. A combinação dois a dois das qualidades citadas, permitia a Aristóteles criar um dos quatro estados. Nesta concepção não há distinção entre qualidade e substância, o que conduzirá à indagação sobre o caráter preponderante do calor e do frio (Astolfi & Develay, 1991).

Estes autores afirmam que o poeta latino Lucrecio considerava que o calor escorre do Sol, o frio dos rios e o fogo, que é constituído de uma substância muito sutil, pode-se transferir através dos poros da matéria, representação que será encontrada até a Renascença, em autores como Gassendi, Boyle e Galileu.

Segundo eles, caráter científico da noção de calor apareceu no campo da química, durante o século VIII, através de pesquisas que justificavam os resultados experimentais do momento, permitindo o aparecimento da idéia do *flogístico* (idéia de Stahl e Becher em 1720) que será adotada pela maioria dos químicos. O flogístico é uma substância contida em todo o corpo e que só se manifesta através de sua separação da matéria, quando se dá a combustão e que ocorre antes da oxidação. Este sistema explicativo dava conta das inúmeras combustões dos corpos metálicos que se realizavam experimentalmente nessa época. No entanto, não explicava as diferenças entre a massa de óxido formado e a inicial do metal.

O estabelecimento das bases da química moderna por Lavoisier, em 1775, em que aparece a conservação da massa global quando ocorre uma reação química, destrói a teoria do flogístico.

Segundo Astolfi e Develay, o calor não se manifesta unicamente nas combustões, mas também contribui na variação da temperatura de um corpo. Este fato levou, no início do século XVIII a uma segunda teoria do calor-substância que se desenvolverá paralelamente à do flogístico: a do *calórico*, enunciado por Wolf em 1720. Esta substância impregnaria toda matéria e seria indetectável quando o corpo atingisse o equilíbrio térmico. Só poderia ser detectada quando o equilíbrio fosse rompido porque seria permutada com outro corpo. As variações de temperatura dos corpos indicariam os deslocamentos deste calórico, do corpo mais quente para o corpo mais frio. A temperatura aparecia como um “grau” de calor, uma medida que permitirá prever o sentido e os valores das trocas. O calor torna-se uma grandeza mensurável, aditiva e que deixa entrever as propriedades de conservação.

A caracterização de calórico como fluido implica propriedades de elasticidade e capacidade de escoar, sem que necessariamente tenha massa. As propriedades deste fluido muito sutil só podem ser apreendidas pelo seu efeito.

No entanto, os sucessos aparentes dessa teoria do calórico irão colidir com um obstáculo: o da massa da substância. Apesar dos esforços de Rumford, não será possível mostrar sua existência (Astolfi & Develay, 1991).

Ainda segundo estes autores, a segunda corrente, *mecanicista*, caminha paralelamente à primeira. A teoria mecanicista considera a matéria como formada de partículas, sendo o calor uma troca de movimento entre essas partículas. Afirmam que desde a antiguidade Platão formulava a hipótese de que o fogo colocava as partículas de matéria em movimento e que o ar as comprimia. Para ele, o aquecimento de um corpo conduz a um aumento de seu volume, a sua dilatação.

Kepler, Bacon, Descartes, Boyle e Huyghens descrevem, No século XVII, os estados térmicos de um corpo em termos de movimentos ou de vibrações de partículas. Entretanto o calor continua sendo uma grandeza não objetivável, podendo ser transmitida por contato. Estas bases não permitiam

explicar, por exemplo, a repartição de calor entre dois materiais diferentes. A distinção entre calor e temperatura não aparecia.

Em 1784, Laplace e Lavoisier realizaram a síntese entre as teorias mecanicistas e substancialistas. Introduzem a noção de quantidade de calor contida num corpo, como a força viva das vibrações, distinta dessas vibrações, distinta da temperatura que é uma medida da agitação das partículas. Astolfi chama atenção para o fato, notável, desta teoria ter evoluído sem se apoiar em qualquer argumento experimental direto.

Em suas pesquisas, Clausius, Maxwell e Boltzmann, No século XIX, tornarão coerentes as intuições de Lavoisier e Laplace. Em 1900, Gibbs integrará os resultados experimentais na teoria, com a termodinâmica estatística.

Segundo os autores citados acima, a hipótese de Platão foi ignorada durante muito tempo pois buscava o porquê do fenômeno e considerava a estrutura da matéria. A descrição de Aristóteles tinha mais aceitação pois estava mais ligada aos fenômenos sensíveis. Esta situação mostra como é difícil desligar-se das primeiras impressões e dar o passo que separa a observação da experimentação.

Para muitos problemas, a assimilação do calor como substância continua eficaz. Mas, em contrapartida, essa visão impede que se compreenda a equivalência entre o calor e o trabalho mecânico.

Ainda segundo estes autores, outro obstáculo importante no histórico sobre a noção de calor é a transferência das ferramentas da mecânica para o campo dos fenômenos térmicos. As analogias são numerosas nas descrições de Descartes, Huyghens e Leibniz, mecânicos notáveis que procuravam descrever os fenômenos térmicos com modelos da mecânica.

A gênese da segunda lei no raciocínio de Carnot

Segundo Aurani, nas primeiras páginas do seu trabalho *Réflexions sur La Puissance motriz du feu*, Sadi Carnot aponta a importância do estudo do calor para a sua época: *o calor produz movimento*. Em sua argumentação ele não se limita aos aspectos científicos da questão, mas também os sociais, econômicos e políticos da produção da potência motriz do fogo. Suas

colocações estabelecem relações entre os aspectos utilitários das máquinas a vapor com as transformações sociais e políticas que acompanharam as mudanças econômicas da Revolução industrial. Ele pontua, entretanto, que pouco se sabia sobre os aspectos teóricos que envolviam o funcionamento dessas máquinas, pois todos os avanços na tentativa de melhorar o rendimento delas eram feitos com componentes predominantemente intuitivos e com forte componente de acaso, sem que houvesse uma preocupação de se recorrer a uma sistematização teórica.

Disposto a submeter a máquina a vapor a uma análise deliberada, Carnot iniciou uma investigação com a finalidade de responder duas perguntas cruciais naquele momento: *seria a potência motriz do calor ilimitada, ou haveria um limite para ela? Existiriam agentes preferíveis ao vapor d'água para a produção da força motriz do calor?*

Partindo da preocupação com o aperfeiçoamento da máquina e com a conseqüente melhoria de sua produção, Carnot considera como o aspecto norteador dos seus estudos sobre o calor, *o limite da potência motriz do fogo*. Isto o levou a estabelecer as bases da Termodinâmica que se aplicam não só às máquinas a vapor, mas a todas as máquinas de calor, independente da substância motora utilizada e do seu método de funcionamento.

A busca da generalidade é um traço marcante no seu trabalho. Ele acreditava que deveriam ser analisados os princípios que regem os fenômenos envolvidos na produção de potência motriz, da forma mais geral possível, ou seja, independentemente dos mecanismos utilizados na máquina e qualquer que seja a substância nela empregada, como pode ser constatado nas seguintes citações:

“O fenômeno da produção de movimento pelo calor não tem sido considerado de um ponto de vista suficientemente geral. Nós o temos considerado somente em máquinas cuja natureza e modo de ação não nos tem permitido absorver a total extensão das aplicações possíveis. Em tais máquinas, o fenômeno é, de certa forma, incompleto. Torna-se difícil reconhecer seus princípios e suas leis.”(Apud. Aurani pg 30,1985)

“É necessário estabelecer os princípios aplicáveis não somente às máquinas a vapor, mas a todas as máquinas de calor, seja qual for a substância motora utilizada e qualquer que seja o seu método de funcionamento.” .”(Apud. Aurani pg 30,1985)

Esta preocupação com generalidade aparece em outros momentos de seu trabalho quando apresenta preocupação com a definição de uma escala absoluta de temperatura e na tentativa de encontrar uma relação matemática para as transformações envolvidas na máquina térmica. A idéia de *transformação* também é generalizada (como será visto nos trabalhos de Clausius), de forma a incluir não só as de calor em trabalho e vice-versa, mas também as de calor de uma temperatura a calor de outra temperatura e as ocorridas nas mudanças no estado de agregação das substâncias que, no nosso trabalho, se constitui um fator de fundamental importância.

Carnot estabelece um princípio de que *“qualquer produção de movimento pelo calor é acompanhado pelo restabelecimento de equilíbrio no calórico.”* Nas máquinas a vapor, o processo é descrito de forma que podemos identificar a segunda lei da termodinâmica enunciada de maneira explícita, como podemos ver nesse trecho:

“A produção de movimento nas máquinas térmicas a vapor é sempre acompanhada por uma circunstância em que devemos fixar nossa atenção. Essa circunstância é o restabelecimento do equilíbrio no calórico; Isto é, sua passagem de um corpo em que a temperatura é mais ou menos elevada para um outro em que a temperatura é mais baixa. O que acontece de fato, em uma máquina a vapor efetivamente em funcionamento? O calórico desenvolvido na fornalha pelo efeito da combustão, atravessa as paredes da caldeira, produz vapor, e de alguma forma incorpora-se a ele. Este último, carregando consigo o calórico, leva-o primeiramente ao cilindro , onde desempenha sua função e dali para o condensador onde se liquefaz pelo contato com a

água fria que aí se encontra. A água fria do condensador se apodera, pois, como resultado final, do calórico desenvolvido pela combustão. Ela se aquece por intermédio do calor, como se tivesse sido colocada diretamente sobre a fornalha. O vapor aqui é apenas um meio de transportar o calórico.”(p9)

“Reconhecemos facilmente nas operações que acabamos de descrever o restabelecimento do equilíbrio no calórico, sua passagem de um corpo mais ou menos aquecido para um corpo mais frio. O primeiro desses corpos, no caso, é o ar aquecido na fornalha; o segundo, é a água da condensação.” (Apud Aurani, pg32, 1985)

Depreende-se daí, que as máquinas precisam receber de uma fonte, calor a alta temperatura e descarregá-lo em outra fonte de baixa temperatura. A diferença de temperatura indica que o trabalho mecânico foi conseguido através do fluxo material promovido por esta diferença de temperatura.

É importante ressaltar que o calórico é transmitido da fonte quente à água da caldeira, e, levado pelo vapor produz o trabalho mecânico, sendo posteriormente fornecido à fonte fria. *A mudança ocorrida aí é apenas na temperatura. A quantidade de calórico fornecida pela fonte quente, entretanto, é a mesma que chega à fonte fria.*

As condições para que uma máquina térmica forneça o máximo de potência motriz é explicitada da seguinte forma:

“ Desde que todo restabelecimento de equilíbrio no calórico pode ser a causa de potência motriz, todo restabelecimento de equilíbrio efetuada sem a produção dessa potência deverá ser considerada como uma verdadeira perda. Ora, basta uma pequena reflexão para que nos apercebamos de que toda mudança de temperatura que não seja devida a uma mudança de volume nos corpos não será mais que um restabelecimento inútil de equilíbrio no calórico. A necessária condição para o máximo é, então, que nos

corpos empregados para realizar a potência motriz do calor não ocorra alguma mudança de temperatura que possa não ser devida a uma mudança de volume. Reciprocamente, toda vez que essa condição for preenchida o máximo será alcançado.”(p23)

Para que ocorra o máximo rendimento deve-se evitar as trocas de calor que ocorre através do contato entre o vapor quente e as paredes do recipiente.

Para a obtenção da condição de máximo Carnot estabelece uma sequência de operações isotérmicas e adiabáticas, cuja possibilidade real de ocorrência é nula. É por isso que se diz que este raciocínio constitui-se como um limite teórico para a eficiência da máquina.

A idéia fundamental de que na produção da potência motriz a substância motora deve retornar às condições iniciais foi uma contribuição valiosa da análise teórica de Carnot: *a noção de ciclo*. Isto revela porque ele considerava incompleto, nas máquinas em funcionamento na época, o fenômeno da produção de potência motriz pelo calor. Naquelas máquinas, a substância motora nunca era exatamente a mesma, pois o vapor, nelas, era sempre renovado, o que sugeria um começo e um fim no processo.

A definição operacional da condição de máximo é reconhecida atualmente como a origem do ciclo reversível que nortearam os desenvolvimentos posteriores, dando suporte aos trabalhos de Clapeyron, Kelvin e Clausius que foram importantes para o estabelecimento de uma teoria consistente sobre o calor.

Ao procurar, no desenvolvimento do seu trabalho, responder à pergunta: *“a potência motriz desenvolvida pela queda do calórico entre 100 e 50, seria igual à desenvolvida entre 50 e 0 graus celsius? Carnot forneceu elementos muito significativos para o estabelecimento, mais tarde, do conceito de entropia por Clausius.*

A constatação de que a quantidade de trabalho útil produzida no ciclo varia se tomarmos a mesma diferença de temperatura, em pontos diferentes da escala termométrica, levou à compreensão de que nem todo o calor disponível pode ser convertida em trabalho, ou seja, levaria ao confronto com a

possibilidade da conversão de calor em trabalho em função das temperaturas utilizadas.

Além disso, tal constatação leva a uma indagação interessante: será que para Carnot, o calórico era uma substância, como quer a interpretação mais conhecida a esse respeito? A constatação citada não seria um indício de que, para ele, o calórico não teria o significado substância, mas supõe propriedades mais sutis?

Segundo Aurani, o significado do conceito de calórico para Carnot é uma questão que dá margem a um amplo debate. T. S. Khun, defende que em Carnot o calórico é um fluido material, já V. L. La Mer vê uma identificação do calórico com o moderno conceito de entropia, outros sustentam que Carnot se baseava numa definição alternativa de calor como entropia.

Ao eliminar a dependência da potência motriz com os meios e agentes empregados para desenvolvê-la, Carnot, finalmente chegou à conclusão sobre os fatores que interferem na produção dessa potência, desde que observada a condição de máximo, como pode ser visto na citação:

“ A potência motriz do calor é independente dos agentes empregados para realizá-la; sua quantidade é fixada unicamente pelas temperaturas dos corpos entre os quais é efetuada, finalmente, a transferência de calórico.”(Apud, Aurani, pag 42, 1985)

Aurani chama a atenção para o aspecto surpreendente desta conclusão, pois, durante aproximadamente cem anos procurava-se aperfeiçoar a máquina através de inovações das substâncias utilizadas, dos mecanismos empregados, do desenho e constituição de suas peças.

Clausius, ao tentar estabelecer uma relação quantitativa entre a quantidade de calor que é convertida em trabalho e aquela que é perdida para a fonte fria, e as temperaturas envolvidas no processo, não só chegou à formulação matemática da segunda lei, como também destacou a grandeza que denominou entropia.

Clausius e o conceito de irreversibilidade

Segundo Aurani, as descobertas ligadas à conservação da energia entre 1842 e 1847 efetuadas por Mayer, Joule e Helmholtz, entre outros, pareciam tornar difícil a conciliação entre as conclusões de Carnot sobre a produção de potência motriz do fogo e a concepção de calor como forma de energia. Enquanto Carnot descrevia o processo através de uma quantidade de calórico que fluía inalterada do corpo de temperatura mais alta para corpo de temperatura mais baixa, a conservação da energia previa que a quantidade de calor a atingir o corpo frio deveria ser menor que aquela cedida pelo corpo quente, sendo a diferença entre as duas equivalente à quantidade de trabalho produzida.

A dificuldade na conciliação pode ser ilustrada pelos questionamentos de Kelvin; este inicialmente se inclinava pelos desenvolvimentos de Carnot, mas ao mesmo tempo reconhecia que era imperativo integrar a “conservação de efeito mecânico” à teoria do calor. Conforme seu depoimento, encontrado em “From Watt to Clausius” de Cardwell, citado por Aurani:

“Quando a ação térmica é gasta na condução de calor através de um sólido, o que acontece com o efeito mecânico que ele poderia produzir? Nada pode ser perdido nas operações da natureza – nenhuma energia pode ser destruída. Que efeito é então produzido no lugar do efeito mecânico que é perdido? Uma teoria do calor correta, imperativamente necessita de uma resposta a esta questão; nenhuma resposta pode ainda ser dada no presente estágio da ciência”.

A conciliação veio através de Clausius. Dessa conciliação decorre a formulação da segunda lei da termodinâmica e a definição do conceito de entropia. Inicialmente ele considera a produção de trabalho pelo calor através de processos cíclicos no artigo “On a modified form of the...”, de 1856. Esta síntese, segundo Aurani (p51), é enunciada assim:

“Em todos os casos onde uma quantidade de calor é convertida em trabalho, e onde o corpo, efetuando essa transformação, retorna no final às suas condições iniciais, uma outra quantidade de calor deve ser necessariamente transferida de um corpo mais quente para um corpo mais frio; e a magnitude desta última quantidade de calor, em relação à primeira, depende somente das temperaturas dos corpos entre os quais o calor passa, e não da natureza do corpo efetuando a transformação.”

Em suas exposições também estabelece um princípio fundamental que hoje conhecemos como a formulação de Clausius para a segunda lei da Termodinâmica:

“ O calor não pode nunca passar de um corpo mais frio para um corpo mais quente sem que ocorram ao mesmo tempo mudanças associadas. Tudo que sabemos em relação à troca de calor entre dois corpos de temperaturas diferentes confirma isso, pois o calor em toda parte manifesta uma tendência em igualar diferenças de temperatura, e conseqüentemente em passar numa direção contrária, isto é, do corpo mais quente para o mais frio. Sem explicações adicionais, a veracidade do princípio será garantida.”

Percebe-se a preocupação de Clausius em justificar o caráter de “princípio” à sua proposição sobre trocas de calor; para ele, assim como para Carnot, o princípio surge como uma generalização a partir de observações mais localizadas, consideradas evidentes.

Ao analisar o ciclo de Carnot, Clausius trabalha com a idéia de transformação de calor em trabalho, detectando outro tipo de transformação no processo que é a de energia de uma temperatura à energia de outra

temperatura, por efeito da passagem do calor entre o corpo quente e o corpo frio.

Atribui arbitrariamente valores numéricos positivos e negativos às transformações que serão chamados equivalentes. O sinal positivo é atribuído à transformação de trabalho em calor e de calor de uma temperatura mais alta a calor de uma temperatura mais baixa e formula, em termos desses valores, o princípio de equivalência das transformações, que em seu trabalho “On the application of the Theorem of the equivalence of transformations to the internal work of a mass of matter”, é enunciado assim:

“Se a quantidade de calor Q da temperatura t é produzida a partir do trabalho, o valor equivalente dessa transformação é $\frac{Q}{T}$; e se a quantidade de calor Q passa de um corpo à temperatura t_1 para um corpo à temperatura t_2 , o valor equivalente da transformação é $Q(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1})$ onde T é uma função de temperatura que é independente do tipo de processo por meio do qual a transformação é efetuada, e T_1 e T_2 denotam os valores dessa função que correspondem a t_1 e t_2 . Mostrei por considerações em separado que T é com toda probabilidade nada mais que a temperatura absoluta.”

O quociente $\frac{Q}{T}$ expressa a quantificação da equivalência entre as transformações e, através dela Clausius conclui que nos processos reversíveis as transformações se cancelam uma às outras de forma que a soma algébrica delas é nula. Já nos processos irreversíveis a soma algébrica só poderia ser positiva, evidenciando a existência de uma direção preferencial para as transformações.

Aurani em seu trabalho afirma:

“Resgatar as origens históricas, ao mesmo tempo que evidencia as limitações do pensamento que norteia as definições conceituais, amplia a compreensão dos seus significados.”(p58)

Sua colocação chama a atenção para o fato de que, ao se ensinar uma ciência a partir da sua axiomatização, como se encontra hoje, contribui para o afastamento entre os conceitos e as formas de pensar que justificam sua definição.

No artigo de 1862, Clausius estuda os processos não cíclicos que envolve o tratamento do arranjo interno das substâncias. Nele, estabelece a diferença entre trabalho externo e interno. O externo se refere às forças que outros corpos exercem sobre o corpo em questão, e o interno que é efetuado pelos constituintes moleculares do próprio corpo, o que o levou à introdução do conceito de desagregação.

Ao se referir à expansão do gás perfeito, Clausius chama a atenção para o fato de que aí as forças intermoleculares podem ser desprezíveis; durante seu aquecimento, a pressão exercida pelo gás no recipiente que o contém é uma medida “da força repulsiva do calor contido no gás”*, e essa pressão deve ser, de forma aproximada, proporcional à temperatura absoluta.

Pensar as alterações no arranjo interno dos corpos por ação do calor, requer considerações sobre a força intermoleculares que a força ativa do calor deve vencer para efetuar tais alterações. A lei da proporcionalidade entre a força ativa do calor e a temperatura absoluta é então enunciada:

“O trabalho mecânico que pode ser executado pelo calor em qualquer alteração de arranjo do corpo é proporcional à temperatura absoluta no qual essa alteração ocorre.”

Neste enunciado percebe-se que a noção de reversibilidade está associada à igualdade entre a intensidade da força do calor daquela que se opõe a ele. Quando estas forças possuem intensidades diferentes, o processo é **irreversível**. Isto significa que para haver transformação, é necessário que as intensidades das forças sejam diferentes.

Num processo reversível, o calor dQ recebido por um corpo corresponde à soma entre o trabalho dL (interno e externo) realizado, e dH que é o calor que permanece no corpo, então:

$$dQ + dH + AdL = 0 \quad (1)$$

Sendo A o equivalente em calor de uma unidade de trabalho. Esta expressão foi posteriormente denominada por Clausius de primeira lei da Termodinâmica. Foi a partir dela que ele obteve a expressão matemática da equivalência das transformações para processos não cíclicos, como veremos a seguir:

Para chegar à expressão matemática da segunda lei Clausius introduziu o conceito de **desagregação** que se refere ao arranjo dos constituintes internos do corpo.

Em seu artigo ("On the application...), escreveu:

“Desde que o aumento da desagregação é a ação por meio da qual o calor realiza trabalho, tem-se que uma quantidade de trabalho deve manter uma razão definida com a quantidade pela qual a desagregação é aumentada; fixaremos conseqüentemente a determinação ainda arbitrária da magnitude de desagregação de tal forma que, a qualquer temperatura, o aumento da desagregação seja proporcional ao trabalho que o calor pode realizar na temperatura.”

Como o calor realiza trabalho através da desagregação e seu valor é proporcional à temperatura absoluta (T), Clausius escreveu:

$$AdL = TdZ \quad (2)$$

Onde dZ representa uma alteração infinitesimal de desagregação.

Substituindo (2) em (1), vem:

$$dQ + dH + TdZ = 0$$

Dividindo a expressão por T e efetuando a integração, obtém-se:

$$\int \frac{dQ+dH}{T} + \int dZ = 0 \quad (3)$$

A expressão (3) mostra que nos processos não circulares reversíveis, três tipos de transformações são consideradas: de calor em trabalho (dQ), de calor de uma temperatura à de outra temperatura (dH) e a que se refere às alterações no estado de agregação das substâncias (dZ). Nos processos circulares o termo dZ não aparece na expressão pois as alterações de desagregação se compensam.

No caso dos processos irreversíveis é preciso relacionar a ocorrência dos três tipos de transformação, conforme sejam positivas ou negativas, permitindo observar de maneira mais objetiva a existência do sentido privilegiado, (positivo) das transformações. Sobre esta questão, escreve Clausius:

“Se o calor está para ser transformado em trabalho, o que é uma transformação negativa, uma alteração positiva de desagregação deve ter lugar ao mesmo tempo, a qual não pode ser menor do que uma determinada magnitude que consideramos equivalente. Na transformação de trabalho em calor, por outro lado, as coisas são diferentes. Se a força do calor é superada por forças de oposição, de tal forma que uma mudança negativa de desagregação é efetuada, sabemos que nesse caso as forças de superação podem ser maiores do que é necessário para produzir o resultado particular. O excesso de força pode então originar movimento de considerável velocidade nas partículas do corpo em consideração, e esses movimentos podem subsequentemente ser convertidos em movimento molecular que chamamos calor, de forma que no final é necessário mais trabalho ser convertido em calor do que o correspondente à mudança de desagregação efetuada. Em muitas operações, especialmente no atrito, a transformação de trabalho em calor pode ter lugar mesmo que independentemente de qualquer transformação negativa simultânea.

A relação que o terceiro tipo de transformação, a saber a alteração de desagregação, mantém com consideração dessa natureza, deduz-se do que já foi dito. A alteração positiva de desagregação deve de fato ser maior, mas não pode nunca ser menor, que a transformação de calor em trabalho que a acompanha, e a alteração negativa de desagregação deve ser menor, mas nunca maior, que a transformação de trabalho em calor.

Finalmente, no tocante ao tocante ao segundo tipo de transformação, ou a passagem de calor entre corpos de diferentes temperaturas, eu pensei ser justificado assumir como uma proposição fundamental a qual, de acordo com tudo que sabemos do calor, deve ser considerada por si só evidente, isto é, de que a passagem de temperatura mais baixa para temperatura mais alta, que conta como uma transformação negativa, não pode ocorrer por si só – isto é, sem uma transformação positiva simultânea. Por outro lado, a passagem de calor numa direção contrária, de uma temperatura mais alta para uma temperatura mais baixa, pode muito bem ter lugar sem uma transformação negativa simultânea.”(Apud Aurani, K. p 71-72)

Aurani aponta que a equação (2) expressa a relação entre a variação da desagregação e o trabalho realizado, num processo reversível. No caso de uma operação irreversível, uma alteração positiva na desagregação com realização de trabalho, verifica-se que a alteração de desagregação pode ser maior que o calculado a partir do trabalho. Um exemplo disto é a expansão livre do gás perfeito; no final do processo sua energia interna é a mesma e o gás não realiza trabalho. Porém, para levá-lo de volta ao volume inicial, é necessário efetuar trabalho sobre ele; isso ocorre por causa do grau de dispersão do gás. Nesse caso limite, enquanto há um acréscimo de desagregação, o trabalho realizado pelo gás é nulo.

No caso de uma alteração de desagregação negativa, tem-se trabalho se transformando em calor; como parte do trabalho realizado sobre o gás pode ser convertido em movimento molecular, o valor da desagregação pode ser menor em valor absoluto, mas ainda assim algebricamente, continua sendo maior que o valor calculado a partir do trabalho. Portanto, em ambos os casos:

$$dZ \geq \frac{AdL}{T} \quad (4)$$

Donde se conclui que a equação (3) deve ser expressa como uma desigualdade para incluir processos irreversíveis:

$$\int \frac{dQ+dH}{T} + \int dZ \geq 0 \quad (5)$$

Em sua forma mais geral, o princípio da equivalência das transformações, pode, então, ser enunciado da seguinte maneira:

“ A soma algébrica de todas as transformações ocorrendo em qualquer condição de alteração que seja, pode ser somente positiva, ou em caso extremo, igual a zero.”

A partir deste enunciado Clausius chegou ao conceito de entropia: as transformações têm um sentido privilegiado. Para se chegar a esta conclusão, o conceito de desagregação se constituiu como um elemento fundamental nessa nova forma de pensar.

A concepção do conceito de desagregação e o estabelecimento de suas relações com outros dois tipos de transformação dirigem para a preocupação inicial de Clausius : a possibilidade da transformação de calor em trabalho. Assim, a forma como nos processos irreversíveis, a desagregação supera o valor do trabalho realizado pela força do calor (equação 4) marca a impossibilidade de se garantir que toda essa força se esgote na realização de trabalho. Encontra-se aqui a entropia embrionária de que a energia é dissipada no movimento caótico das partículas, de que a mudança no caráter da energia tendem a torná-la inutilizável.

A expressão $\int \frac{dQ+dH}{T} + \int dZ = 0$ leva o Clausius, em 1867, no artigo “On a different forms of the fundamental equations of the mechanical theory of heat and their convenience for application”, a definir a entropia. Nesta equação, a parcela $\frac{dQ}{T}$ define uma quantidade dS ($dS = \frac{dQ}{T}$) em função do valor de transformação do calor presente no corpo ($\frac{dh}{T}$), e do valor das alterações do arranjo interno dZ :

$$dS = \int \frac{dH}{T} + \int dZ$$

O nome da nova grandeza foi escolhido em função do seu significado, como explicita Clausius neste trecho:

“ Procuremos agora um nome apropriado para S. Da mesma forma que chamei U o conteúdo de trabalho do corpo, chamamos S o conteúdo de transformação do corpo. Entretanto, sinto que é mais apropriado tomar os nomes de quantidades científicas importantes de línguas antigas na medida em que elas podem aparecer sem alteração em todas as línguas contemporâneas. Assim, propomos que chamemos S de entropia do corpo a partir da palavra grega...que significa transformação. Formei intencionalmente a palavra entropia de modo a ser tão parecida quanto possível da palavra energia, pois as duas quantidades que esses nomes representam estão tão de perto relacionadas em significado físico que uma certa semelhança em seus nomes pareceu apropriado”.

Entropia e energia através da primeira e segunda lei, regem as conversões calor-trabalho. Enquanto a energia, através da primeira lei estabelece algo que se conserva na transformação, a entropia, através da segunda lei, prescreve a mudança inerente àquela conservação. Com a transformação de calor em trabalho, uma grandeza mantém a sua identidade ainda que pareça mudar de uma forma.

De acordo com Aurani, através do ciclo de Carnot, Clausius teve a chave para tratar as mudanças que a conservação envolve, porque nesse ciclo, as mudanças se compensam e é possível estabelecer uma equivalência, passível de ser matematizada por uma igualdade. Mas o equilíbrio, a compensação, pressupõe uma grandeza cuja alteração é neutralizada no decorrer do processo; esta emergiu da relação procurada como sendo entropia. A idéia de conservação pressupõe alteração e constância; desse modo, não é possível falar nas transformações calor trabalho sem mencionar energia e entropia. Assim, quando se estabelece a conservação da energia, já se definia a necessidade da caracterização da mudança; a primeira e a segunda lei integram a mesma idéia a de conservação, ou de transformação.

Em seu artigo de 1867 Clausius conclui o seu trabalho assim:

“ ...se imaginarmos que a quantidade que denominei entropia de um determinado corpo é formulada para todo o universo com as devidas considerações de todas as circunstâncias presentes, e se a isso incorporarmos o relativamente mais simples conceito de energia, podemos expressar os dois princípios fundamentais da teoria mecânica do calor para o universo na simples forma seguinte:

- 1 . A energia do universo é constante.*
- 2. A entropia do universo luta para atingir um valor máximo”.*

Sistema e processo

Com a finalidade de completar as concepções da Termodinâmica que interessam para o nosso trabalho e que serão confrontadas com os modelos dos estudantes que aparecerão no capítulo III, acrescentamos algumas considerações a respeito de Sistema e processos com base nos seguintes autores autores: Callen (2005), Gibert (1962), Cafagne (1996) e Pacca (2004).

Como já dissemos, a necessidade desse acréscimo apareceu durante a análise , discussão dos dados, retorno às referências bibliográficas e reflexões sobre o que realmente, para nós, seriam os aspectos relevantes do trabalho. Foram momentos interessantes da pesquisa, pois, revelaram-se aspectos emergentes e algumas vezes inesperados que exigiram um mergulho mais profundo da nossa parte, resultando num alcance mais amplo do trabalho. Estas questões relativas a sistemas e processos, junto com a idéia de transformação que aparece nos raciocínios de Clausius, nos pareceram oferecer subsídios mais consistentes a serem transformados em questões de ensino-aprendizagem da Termodinâmica.

Como pretendemos relacionar os conceitos citados no parágrafo anterior, com os dos estudantes, colocaremos as duas visões (dos estudantes e a da Termodinâmica), no capítulo IV.

Capítulo III

A Organização da pesquisa

Natureza e metodologia

A pesquisa efetuada foi qualitativa, a partir da construção de um instrumento para obter os dados pertinentes ao nosso problema e de outro para analisar as respostas. O primeiro instrumento consistiu na apresentação de três questões abertas sobre fenômenos termodinâmicos a alunos em duas salas de aula: uma do terceiro ano do ensino médio e outra do primeiro ano de curso superior de licenciatura em Física. A coleta de dados serviria como uma primeira incursão no trabalho de investigação. A escolha por estudantes do ensino médio e superior se baseou, inicialmente, nas seguintes curiosidades: as respostas apresentariam níveis de elaboração diferentes? Os alunos de curso superior apresentariam, nestas amostras, concepções dos conceitos da Termodinâmica mais ajustados às concepções científicas? À medida que o trabalho fosse avançando e dependendo das revelações que emergissem da análise do discurso, mais dados poderiam ser coletados e até mesmo outros mecanismos como entrevistas semi estruturadas poderiam ser acrescentadas. Percebemos, depois, que tal procedimento não seria necessário.

A aplicação das questões foi feita por dois professores integrantes do grupo de pós-graduandos da nossa orientadora. Um deles as aplicou em uma de suas classes do terceiro ano do ensino médio regular de uma escola federal na cidade de Cubatão no interior de São Paulo e o outro, uma professora, em uma classe de primeiro ano de um curso de licenciatura em Física de uma faculdade da rede particular da Cidade de São Paulo onde leciona.

A classe do ensino médio era de vinte alunos e a do curso superior de dez. O número de alunos poderia ter sido diferente dependendo da classe em que as questões fossem aplicadas ou se os professores escolhidos fossem outros; porém isto não alterou nossa intenção e a busca de resposta à questão de pesquisa.

As questões foram aplicadas pelos próprios professores aos seus alunos, sem a presença do investigador. Eles disseram que as respostas deveriam ser dadas no tempo máximo de vinte minutos, que seriam para o trabalho de pesquisa de um colega e que não serviriam para nota.

O tempo de vinte minutos foi determinado para que os alunos apresentassem por escrito suas concepções espontâneas que brotassem de imediato, pois eram essas primeiras impressões que deveriam se relacionar ou não, com seus conhecimentos, mais resistentes, oriundos do senso comum. Esse tempo mostrou-se suficiente.

As questões – obtenção dos dados

As questões (Q₁, Q₂ e Q₃) tinham como finalidade colher as respostas escritas dos estudantes sobre processos termodinâmicos que eles pudessem relacionar com fenômenos encontrados na vida diária. Elas foram apresentadas de uma só vez, em duas folhas com espaços para as respostas (ver anexo).

- **Q₁ – Uma panela com água foi colocada sobre a chama que após algum tempo foi apagada. O volume de água inicialmente existente na panela diminuiu. É possível que, de forma espontânea, o volume inicial de água volte a existir? Explique sua resposta.**
- **Q₂-Temos duas canecas com água até a metade; numa delas a temperatura da água é de 10°C e na outra é de 30°C. As quantidades de água são misturadas numa das canecas e a temperatura da mistura fica num valor intermediário. Como fazer para que os líquidos voltem a ficar separados e com as mesmas temperaturas iniciais?**

- **Q₃ – Em uma compressão adiabática de um gás perfeito, a pressão e a temperatura aumentam. Pensando no gás como algo formado por partículas, explique porque isso ocorre.**

As duas primeiras questões foram elaboradas especialmente para este trabalho de pesquisa e a terceira foi extraída e adaptada do artigo de Rozier e Viennot (1985).

Embora soubéssemos, através dos professores que aplicaram o teste que estes estudantes já tinha tido aulas de Termodinâmica, isto não era uma preocupação nossa. O que pretendíamos era colher, através de respostas escritas, as concepções espontâneas deles sobre fenômenos da termodinâmica relacionados à questão dos fenômenos irreversíveis, com a finalidade de levantar as idéias que pudessem ser consideradas como próximas ao conceito científico e as barreiras conceituais que dificultam a aprendizagem desses fenômenos.

A questão Q₁ possui um forte componente ligado à situação do dia a dia do aluno e relacionada com seu espaço de vivência. Encontra-se aí, uma fonte que produz calor e um sistema constituído por um recipiente contendo uma porção de água. A chama é apagada e verifica-se que porção de água sofreu uma mudança de volume. Mais do que obter a resposta correta, a nossa expectativa era de que as explicações dos estudantes sobre a possibilidade do retorno do sistema às condições iniciais revelassem suas concepções sobre sistemas (abertos e fechados), processos (sentido, estados inicial e final), transformação e natureza do calor.

A questão Q₂ apresenta um sistema - mistura de duas porções de água - que, devido à diferença inicial de temperaturas atingiu o equilíbrio termodinâmico. Interessava-nos aspectos qualitativos. Pretendíamos colher idéias sobre o retorno às condições iniciais de um sistema que atingiu o equilíbrio térmico entre eles. Esta questão está mais diretamente ligada à idéia da percepção da ocorrência de um sentido privilegiado das transformações utilizando o conceito de temperatura: a natureza, na sua busca do equilíbrio, tende a igualar as temperaturas.

Com questão Q₃, a única extraída da literatura, pretendíamos verificar se havia, no raciocínio dos alunos, referências a transformação de movimentos ordenados em desordenados e quais as idéias que eles possuíam a respeito da relação entre pressão, temperatura e energia cinética das partículas e de que forma eles raciocinam em termos de teoria cinética dos gases. A questão apresenta uma afirmação cientificamente correta para verificar se o modelo da Termodinâmica é utilizado na descrição do fato abordado.

O processo de análise

A análise dos dados brutos obedeceu a vários estágios e implicou num primeiro momento na organização das respostas, separando-as em partes, relacionando estas partes, procurando identificar nelas tendências e padrões relevantes. Num segundo momento essas tendências e padrões foram reavaliadas buscando-se relações e inferências num nível de abstração mais elevado.

Durante o segundo momento ocorreu uma delimitação progressiva do foco de estudo. Para isto, foi de substancial importância as sugestões dadas pelo grupo de estudos da pós-graduação do qual participamos.

Este grupo, coordenado pela nossa orientadora, se reúne uma vez por semana com a finalidade de discutir o andamento dos trabalhos de cada um de seus integrantes. As sugestões sobre a correção dos rumos que apareciam durante as discussões eram algumas vezes gravadas em áudio, sendo posteriormente transcritas e refletidas, selecionando-se as pertinentes. Tal procedimento, junto com as constantes revisões dos suportes teóricos, contribuiu significativamente para que as categorias que se adequavam ao meu trabalho fossem finalmente encontradas.

Inicialmente parecia-nos que o número de respostas e os elementos de raciocínio contidos nelas eram insuficientes para que pudéssemos chegar aos nossos objetivos. Entretanto, durante as releituras e discussões a nossa capacidade de percepção foi ampliando de tal forma que chegamos à conclusão que não seria preciso voltar a campo para mais coletas.

De fato, os resultados eram tão interessantes e significativos, trazendo informações bastante relevantes e nos surpreendendo pela novidade e qualidade dos resultados.

A seguir apresentamos os dados das respostas registradas a serem organizadas nas categorias; os sujeitos autores são identificados da seguinte maneira:

- Ensino médio: de M1 a M20.
- Ensino superior: de S21 a S30.

Assim, quando utilizarmos uma determinada resposta de um aluno do ensino médio ou superior colocaremos, no seu final, o código (M5Q₁) ou (S21Q₃), que significa respectivamente: “*resposta dada à primeira questão pelo aluno número 5 do ensino médio*”, ou: “*resposta dada à terceira questão pelo aluno número 21 do ensino superior*”.

As categorias – instrumento de análise

As categorias surgiram após as reflexões feitas sobre os comentários e sugestões obtidas durante o segundo momento da análise e acompanhadas pelas releituras de artigos fornecidos durante o curso “*Introdução à Pesquisa em Ensino de Ciências*”, o que permitiu uma impregnação cada vez maior no objeto de estudo.

Uma preocupação nossa foi a de que a análise não ficasse restrita ao que estava explícito nas respostas dos alunos, mas procurasse ir mais fundo, desvelando mensagens implícitas e dimensões contraditórias.

Finalmente as categorias foram criadas tomando como foco o conteúdo argumentativo presente nas respostas e que levassem de forma significativa ou não, aos seguintes núcleos das questões:

- É possível que, de forma espontânea, o volume de água volte a existir? Explique sua resposta (Q₁).
- Como fazer para que os líquidos voltem a ficar separados e com as mesmas temperaturas iniciais?(Q₂).

- Pensando no gás como algo formado por partículas, explique porque isso ocorre(Q₃).

Uma mesma resposta poderia ser encaixada em várias categorias, dependendo da quantidade de elementos presentes nas argumentações e cujo conteúdo fornecia subsídios relevantes e que pudessem servir de âncoras a serem vinculadas aos objetivos do nosso trabalho.

Para a nomeação das categorias levamos em conta grupos de respostas cujo conteúdo latente nos levou a uma interpretação invocando a proximidade com as concepções científicas acreditadas ou a consistência no raciocínio aparente.

A: incluíam componentes aceitáveis cientificamente (inclusive aquelas que possuem elos com o contexto histórico).

B: continham idéias alternativas afastadas das cientificamente aceitáveis.

C: revelavam percepções que se distanciavam do núcleo das questões e de baixo nível de consistência.

D: indecodificáveis ou estavam em branco.

Resultados

1 – Categoria A – componentes aceitáveis cientificamente

1.1 - Não há retorno porque o sistema é aberto.

Um grande número de alunos considerou não ser possível o retorno da água ao volume inicial utilizando uma argumentação causa – efeito. Consideraram que a diminuição de volume (efeito) ocorreu devido à “*evaporação*” da água (Causa) e que no estado gasoso, a água se dispersa facilmente (propriedade natural), mas voltará em dado momento ao estado líquido (propriedade natural), porém distribuir-se-á por uma área muito maior

que aquela que é ocupada pela panela (o sistema em seu estado final estará com menos água), o que revela uma concepção de que o sistema (a água inicialmente confinada no recipiente) perde matéria para o ambiente devido à evaporação, apresentando uma idéia de que a reversibilidade ou reversibilidade está condicionada à distribuição espacial: como o vapor se distribui num espaço maior, ao retornar ao estado líquido parte deste cairá fora da panela.

Exemplos:

- *“Não, pois a água que evaporou não cairá totalmente dentro da panela quando voltar ao estado líquido. Porque qualquer material no estado gasoso se dispersa facilmente”.(M2Q₁)*
- *Não, pois esse volume de água que diminuiu foi perdido para o meio, ou seja, foi evaporado, virou vapor, não podendo retornar ao volume original (M18Q₁).*

Um aspecto significativo que detetamos aparece nas respostas da questão Q₂. Muitos alunos procuram dar uma explicação sobre reversibilidade utilizando um caminho diferente daquele utilizado na questão Q₁. Veja como M2, citado anteriormente, respondeu:

- *“Dividimos em duas canecas novamente, cada uma pela metade. Numa deverá ser aquecida e a outra resfriada para voltarem às suas temperaturas iniciais” (M2Q₂).*

A resposta mostra que, dependendo do evento, o processo de reversibilidade ou irreversibilidade é descrito de uma maneira diferente. Neste caso a reversibilidade está relacionada às ações mecânicas externas do sujeito sobre o sistema acrescidas de exposições de cada parte a aquecimento e resfriamento. Não há nenhuma correlação entre o caminho utilizado na argumentação da resposta dada a Q₁ e a que aparece em Q₂.

1.2- Há retorno porque o sistema é fechado.

Muitos estudantes admitiram que o volume inicial seria restabelecido se a panela estivesse tampada, também usando a argumentação de causa e efeito. O volume será o mesmo (efeito) porque não haverá dispersão do vapor (causa). Mais uma vez a noção de irreversibilidade ou não do processo aparece como condicionado à localização inicial do objeto (água). O sistema fechado é um local que o aprisiona, impedindo que, ao passar para a fase de vapor ele se disperse.

Exemplo:

“Sim. Se a panela estiver fechada, a água que sofreu evaporação se condensará e o volume será igual ao do início”(M14Q₁).

Alguns alunos consideram que o vapor por ser mais leve sobe, ele não cai, vai embora, apresentando uma concepção semelhante à de Aristóteles na antiguidade. Às vezes mencionam que para voltar ao estado líquido a temperatura do vapor deve diminuir. Mas esta diminuição ocorre como uma propriedade natural do vapor.

Exemplo:

“ Sim, mas com a condição que a panela esteja tampada. A água que ‘sumiu’ foi na verdade evaporada e, sendo mais leve, tende a dispersar-se. Contudo, se a panela estiver tampada, o vapor será retido e, com a diminuição da temperatura, o vapor acaba voltando ao estado líquido”.(M8Q₁)¹

¹ É interessante ressaltar que quando (M8) destaca a palavra ‘sumiu’, ele está claramente expondo a sua satisfação com o fato de que **ele sabe** que não houve o desaparecimento de uma porção da água. Ele está expressando sua satisfação em saber que, apesar de não vê-la, ela está por aí, de outra maneira, invisível, na forma de vapor. Na nossa opinião, este é um belo exemplo de como o conhecimento científico traz satisfação para quem dele se apossa.

A dispersão do vapor é, atribuído ao fato de que a fase gasosa é “mais leve” que a fase líquida. Se esta dispersão for impedida, com a diminuição da temperatura a água volta ao estado líquido.

M8 considera que a volta ao estado líquido é possível com a diminuição da temperatura, o que está relacionado com a retirada da fonte quente. Esta volta é tida como algo natural da água. Sem a presença da fonte quente, ela se esfria.

Esta idéia remete à que Albert (1978) observou entre crianças de quatro a seis anos, quando descrevem manipulações com objetos que podem produzir calor. Elas mencionam atividades de ligar e desligar (fornos, aquecedores, etc) esperando, com isso, que eles se tornem quentes ou frios de forma imediata. Salienta que não há um pensamento estruturado, sugerindo a idéia de que a existência de um lugar aquecido é uma condição para um objeto se tornar quente.

As categorias 1.1 e 1.2 citadas acima, revelam uma idéia de sistema centrada no objeto (água). Verificamos que os estudantes raramente citam as interações entre o objeto e outros em sua vizinhança o mesmo ocorrendo nas respostas das questões Q₂ e Q₃, como mostram os exemplos:

- “Coloca metade em outra caneca e deixa uma delas num ambiente a 10°C e aquece a segunda, com ajuda de um termômetro, até os 30°C (M14Q₂).

Nesta resposta, o aluno cita um ambiente a 10°C como um “local frio”. Ele utiliza a idéia de que, o ambiente, por ser frio, tornará a água da caneca também fria. Ao afirmar que a segunda caneca deverá ser aquecida até os 30°C, o estudante revela que calor e frio são entidades diferentes e associadas ao ambiente, predominando o aspecto substancialista, significando que frio e calor podem entrar sair ou serem retiradas dos objetos.

A idéia substancialista apresenta ressonâncias com o desenvolvimento histórico de calor e, como vimos no capítulo II, a idéia de calórico está presente no raciocínio de Carnot. Esta noção também é detectada em trabalhos de outros autores em que se aponta a idéia de calórico presente não só entre

crianças, estudantes do ensino médio e superior, mas também entre professores e livros didáticos, em que verifica-se falta de clareza sobre as concepções oriundas das correntes calorimétricas e substancialistas que são citadas, como já foi apontado, por Astolfi e Develay.

Quando M14 diz “...deixa uma delas a 10°C ...” revela que o aspecto substancialista é acompanhado de uma outra idéia: a de *contágio*, que foi detectada em crianças de seis anos (Piaget e Postel, 1986). Estes autores constataram que estas crianças são capazes de prever o aquecimento ou resfriamento da água quando se coloca nela um suporte metálico mais quente ou mais frio por um certo tipo de *contágio*, com base na transmissão espacial e que o suporte esquentará a água sem perder nenhum calor e, segundo eles, são necessários alguns anos até que se conceba a *transmissão térmica*. Eles também citam o seguinte exemplo: Ao se apresentar a uma criança partes iguais de água à mesma temperatura separadas por uma parte móvel, ela acredita que quando a separação for retirada, a água ficará mais quente. Como se “*mais líquido implicasse em maior temperatura*”. Esta constatação também ocorreu nos trabalhos de Erickson (1979) entre crianças de três a onze anos, com relação ao frio: “*um grande cubo de gelo demora mais para derreter do que um cubo pequeno porque o cubo grande tem uma temperatura mais baixa do que o pequeno*”.

- “*A pressão aumenta pois se diminuiu a área e se conserva o volume do gás. E a temperatura também aumenta pois as partículas têm menos espaço para se movimentarem e com isso colidem mais umas nas outras gerando calor*”(S21Q₃).

Nesta resposta, o aluno além de centrar o objeto (gás) como sistema, mostra lacunas provavelmente adquirida na escola. Uma dessas lacunas aparece na afirmação: “*A pressão aumenta pois se diminuiu a área*”, provavelmente lembrando que a pressão é igual à “força dividida pela área”. Outra lacuna aparece em: “*E a temperatura também aumenta pois as partículas têm menos espaço para se movimentarem e com isso colidem mais umas nas outras gerando calor*” transportando para a Termodinâmica modelos da mecânica relativos às colisões não elásticas entre corpos. Rozier e

Viennot(1991) detetaram respostas semelhantes entre estudantes universitários na França.²

1.3 - Elementos de raciocínio relacionados à desagregação ou à desordem

Os elementos de pensamento contidos na teoria de Clausius sobre a ação do calor nos constituintes internos da substância encontram ressonância na concepção de alguns estudantes quando eles se referem às forças de agregação entre as moléculas de água

Exemplo:

“ Não. A água evaporada, que passou do estado líquido para o gasoso não voltará espontaneamente para a panela, pois uma vez destruída a força que unia a molécula de água, ela não voltará a se unir.(M6Q₁)

Verifica-se, entretanto, que quando M6 afirma que a força é “destruída, tal concepção revela um distanciamento do conceito científico e nos fornece um importante ponto para produzir, em salas de aula, situações de ensino que revelem as diferenças entre vapor e gás como aponta Alomá e Malaver (2007) ao citar as imprecisões, entre professores, sobre a estrutura da matéria, que podem induzir os estudantes a falsas concepções.

Em outros momentos, a referência aos elementos constituintes da substância aparece sem que se faça referência às forças de agregação.

Entretanto é possível identificar alguns indícios de ressonância com as idéias de reversibilidade e irreversibilidade quando o aluno cita que o sistema só retornará à situação inicial através de uma ação externa, ou então quando se refere à impossibilidade de cada elemento constituinte do corpo readquirir o seu estado inicial, veja:

² Estas lacunas nos fazem lembrar as colocações de Lino de Macedo ao se referir ao ensino conservador: (...) *muitas vezes a nomeação não faz sentido para nós; é vazia, não comunica nem expressa. Às vezes, nada mais representa do que o esforço de um aluno ao dizer coisas que não entende ou não acredita.*

- “As temperaturas iniciais só voltarão a ser as mesmas com adição de energia externa através do calor. Quanto ao líquido propriamente dito, será quase impossível colocá-lo em sua totalidade, átomo por átomo, molécula por molécula”(M6Q₂).

A resposta de M6 nos remete à discussão e leitura de um texto sobre modelos atomísticos, da Barbel Inhelder, fornecido por Pacca (2006) durante o seu curso. Nele está escrito:

“Faz muito tempo recolhi as primeiras explicações atomísticas; foi durante o primeiro ano como estudante de psicologia que Piaget sugeriu que eu dissolvesse pedaços de açúcar e transformasse esferas de argila para estudar noções de conservação. Estas experiências bastante banais despertaram meu interesse pela psicologia e pela epistemologia genética.

(...)A criança de dez anos diz: “Todo açúcar está na água, está em pedaços muito pequenos mas tão finos e difundidos que você então não pode vê-los, mas posso reuni-los na minha cabeça, sabendo que tem a mesma quantidade de açúcar”. Falando historicamente, esta é uma das primeiras manifestações de reversibilidade operatória que Piaget formalizou num modelo lógico o “agrupamento” correspondente a um semi-retículo ou grupo parcial”.

Podemos ver que M6 se reporta aos aspectos físicos das transformações quando se refere à impossibilidade do retorno às condições iniciais, utilizando para isto um modelo explicativo intuitivo e atomístico que atribui à realidade para explicar a permanência das duas porções de água na situação de equilíbrio termodinâmico.

Outro aluno, M16, argumenta que a forma gasosa *naturalmente* se espalha pelo ar e o espalhamento impede o “retorno natural” à panela:

- “Não, pois com o aumento de temperatura provocado pela chama a água evaporou, atingindo a forma gasosa que se espalha pelo ar, evitando que, de forma natural, essa água retorne à panela.”(M16Q₁)

Nesta resposta percebemos a idéia de que é praticamente impossível, na expressão “retorne de forma natural”. Isto já sugere a idéia de baixa probabilidade de que a situação ocorra.³

1.4- Elementos de raciocínio relacionados à qualidade do calor.

A maioria dos alunos se refere ao calor como algo que, dependendo da quantidade em que ele é adicionado ou retirado, leva o corpo a atingir um determinado nível que se expressa através de sua temperatura. Esta idéia, que contém elementos da identidade do calor como sendo uma substância, como relacionado a um ambiente quente ou frio, também revela aspectos que se relacionam com a qualidade (calor de uma temperatura e calor de outra temperatura), que aparece nos raciocínios de Carnot e Clausius.

Exemplos:

- “Recolocar os líquidos na caneca, de forma equilibrada e submetê-los ao calor necessário para que cada um atinja a temperatura inicial.”(M11Q₂)
- “Coloca metade em outra caneca e deixa uma delas num ambiente a 10°C e aquece a segunda, com ajuda de um termômetro, até os 30°C.”(M14Q₂)

³ Lembro-me de que, quando menino, uma das minhas grandes curiosidades era entender como eu sentia o cheiro dos alimentos, dos perfumes, das coisas. Esta curiosidade foi um dos pontos que me levaram a me interessar pela Física.

Carnot, na tentativa de estabelecer uma expressão geral para as máquinas térmicas, inclui não só as transformações de calor em trabalho e vice versa, mas também de calor de uma temperatura a calor de outra temperatura, em que Clausius efetuando uma generalização, inclui as mudanças de estado de agregação das substâncias.

Embora Carnot se refira ao calórico como algo inalterado que flui da fonte quente para a fonte fria, mostrando que ele sofre durante o processo uma perda de qualidade, diferentemente das concepções dos estudantes, percebemos que eles já utilizam uma idéia embrionária de “qualidade” assim expressa: *“submetê-los ao calor necessário para que atinjam uma determinada temperatura”, ou então deixa uma delas num ambiente a 10°C e aquece a segunda, com ajuda de um termômetro, até os 30°C.* A ressonância, neste caso, está no fato de que em Carnot, a substância de trabalho (vapor d’água), ao receber o calórico da fonte quente, o transporta à fonte fria e este calor recebido pela fonte fria está a uma temperatura mais baixa, tendo perdido a sua “potência motriz inicial”. Nos estudantes, embora não apareça o transporte de calor pela substância, verifica-se que a substância é capaz de receber ou perder calórico dependendo do ambiente ou da fonte com a qual ela é colocada em contato: se a fonte é quente, ela esquenta, se é fria, ela esfria. O adicional de Carnot está no fato de que a mesma substância, inicialmente colocada em contato com a fonte quente, recebe o calórico, realiza trabalho e no final, ao entrar em contato com a fonte fria, cede o calórico que agora se encontra a uma temperatura mais baixa.

1.5- elementos de raciocínio que se relacionam com um sentido privilegiado para as transformações.

Muitos alunos revelam uma concepção de que o fenômeno de mudança de fase é espontâneo no sentido de líquido para gasoso, o que revela uma noção adquirida através do seu contato direto com a realidade; os rios evaporam... a água derramada em um assoalho evapora...

Exemplos:

- *Se o volume diminui, podemos concluir que houve evaporação da água. Deste modo não é possível que a água evaporada volte à condição líquida espontaneamente. Não obstante a panela pode ter se dilatado, com isso o volume aparente da água pode ter diminuído e conforme a panela for esfriando voltará ao seu tamanho inicial e conseqüentemente a água terá o seu volume inicial também. (M19Q₁)*
- *Acredito que não, pois a água durante o tempo em que a chama estava acesa, houve mudança ou pode ter ocorrido mudança de fase de líquido para gasoso, impossibilitando o retorno do volume original de água na panela.”(M25Q₁)*

Um aluno ao se referir à possibilidade de retorno às condições iniciais de duas porções de água que foram misturadas citou a possibilidade de se fazer isso através da coloração de uma delas, para depois, por ação externa, separá-las novamente como se separa misturas heterogêneas, como se a cor pudesse “informar” qual era a temperatura inicial de uma das porções. Ao mesmo tempo que ele considera que a informação da temperatura inicial continua na mistura, admite que é pouco provável que essa possibilidade exista sem argumentar ou justificar o porquê. Neste raciocínio o estudante revela uma idéia de sentido privilegiado: a de que, ao procurar igualar as temperaturas o sistema “perde” a possibilidade de retorno, pondo em evidência uma idéia embrionária de que a transformação se dá no sentido de igualar as temperaturas:

Exemplo:

- *“Não vejo maneira de ocorrer esse fenômeno!” Uma hipótese que pode haver é a seguinte: junto com a água quente ou a outra água pode-se colocar uma espécie de corante, ou algo parecido,*

que demonstre a diferença. Mas acho pouco provável a veracidade deste fato”(M1Q₂).⁴

Ao tentar mostrar isso através da introdução de um corante, ele tenta manter o comportamento inicial das duas porções mesmo no equilíbrio térmico, como se quisesse dizer que as partículas manteriam suas energias cinéticas iniciais e que através disso seria possível a reversibilidade. O aparecimento de um conflito é explícito quando diz que acha pouco provável que isto seja possível.

2 - Categoria B – idéias alternativas afastadas das cientificamente aceitáveis.

2.1 - Um processo espontâneo só ocorre se não houver mudança de temperatura, de pressão e nem interação com o ambiente.

Muitos alunos consideram que o retorno espontâneo é uma propriedade natural do corpo. A idéia da volta ao estado líquido revela um distanciamento do conceito científico, pois, neste, tal retorno implica em trocas de calor com o ambiente, o que não é citado por estes estudantes.

Exemplos:

- *“De forma espontânea, não. Já que, parte da água ebuliu, para que seu volume tenha diminuído. Como não é possível por livre espontânea vontade, fazer a água condensar,(sem alterar a temperatura), logo, não é possível”. (M4Q₁)*
- *“De forma espontânea não. Pois teria que ocorrer um aumento na pressão e na temperatura.(M7Q₁).*

⁴ Aqui temos um belo exemplo de **criação** de que se refere Lino de Macedo (1994), ao citar Piaget. A questão instigou o aluno, fez com que ele elaborasse hipóteses, tentasse responder à questão. A criatividade do aluno, entre outras coisas, se revela em considerar que as porções de água em diferentes temperaturas são diferentes. Ele indaga (implicitamente): o corante possibilitaria reverter o processo?

A ausência de considerações sobre as interações entre o sistema e o ambiente levam a barreiras, como observaram Cafagne(1996), Pacca e Henrique(2004), quando apontam a dificuldade do senso comum de traduzir a realidade para o sistema Termodinâmico.

2.2 - Partículas esquentam, mudam de estado ou variam de volume com a mudança de temperatura.

Percebe-se que muitos estudantes não distinguem molécula de substância, atribuindo a elas as mesmas propriedades.

Exemplos:

- Não, pois durante o aquecimento moléculas de água no estado líquido foram esquentadas e vaporizaram-se, a não ser que essa panela estivesse tampada".(M3Q₁).
- Aluno 5 – “ Sim. O volume diminuiu devido à evaporação. Se a panela foi aquecida com sua tampa vedando-a, então, após algum tempo, as moléculas de água se condensarão e o volume inicial voltará a existir”.(M5Q₁).
- “Pois a temperatura faz com que as partículas se “dilatam”, aumentando assim o volume. Com o volume maior, as partículas terão que fazer uma pressão maior para se manter distante e ocupar todo o espaço”.(M4Q₁).

Os exemplos acima mostram que os alunos não diferenciam moléculas de substância levando a argumentações inconsistentes e contraditórias.

Brook, A. et Al (1983), como já vimos, encontrou respostas semelhantes a respeito das idéias de partículas entre estudantes tais como: “*partículas incham, se fundem, param a 0°C, o espaço entre elas não se encontram necessariamente vazio, se movem mais e ocupam mais espaço quando aquecidas*.”

2.3 - O retorno às condições iniciais depende da ação do sujeito sobre o objeto.

A maioria dos alunos apresenta uma visão macroscópica do sistema que revela desconhecimento do que seja o equilíbrio termodinâmico.

A água é um corpo, que, ao atingir sua temperatura de equilíbrio fica numa situação semelhante à de equilíbrio estático da mecânica. Para eles, fazer com que haja retorno às condições iniciais implica em separá-la em partes, aquecendo uma dessas partes e resfriando outra. O equilíbrio termodinâmico é diferente: trata-se de um equilíbrio estatístico. Cada molécula da água modifica sua velocidade constantemente, entretanto a energia cinética média de todas elas permanece constante.

Exemplos:

- *“Primeiro, separe os líquidos. Depois, pegue um termômetro e meça a temperatura. Se um estiver mais frio, do que deveria estar, aqueça-o ao fogo. Se o outro estiver mais quente do que deveria estar, coloque-o em uma vasilha com gelo. Sempre cheque a temperatura com um termômetro”* (M5Q₂).
- *Para que as canecas com água voltem a ter respectivamente 10°C e 30°C, devo separá-las onde as quais terão temperatura de equilíbrio e submetê-las a diferentes experiências uma de perda de calor e outra de ganho de calor*(S26Q₂).

As respostas revelam, como mostra Cafagne(1995), o aspecto narrativo ocupando um lugar principal na descrição do processo, mostrando que os elementos que justificam a narrativa são escolhidos em função do contexto de tal forma que não se distanciam dos fatos observados na vida diária e dos instrumentos perceptivos do sujeito.

2.4 - O aumento de temperatura se deve ao choque ou ao atrito entre as partículas de um gás.

Para a maioria dos alunos a o processo é descrito como uma sucessão de causa e efeito, onde o foco nas condições iniciais e final do sistema passa a ser secundário. A forma como o aumento de temperatura é descrito na transformação adiabática revela a aplicação de modelos oriundos da mecânica e que levam a sérias contradições. Ao considerar que o aumento de temperatura é devido ao de atrito entre as partículas faz considerações que violam o princípio da conservação da energia.

Exemplos:

- *“Porque quando aumentamos a pressão, as partículas desse determinado gás passam a se chocar mais vezes e com isso a temperatura aumentará. Da mesma forma ocorre se aumentarmos a temperatura, a pressão aumentará se for uma compressão adiabática logicamente”(M6Q₁).*
- *“Com a diminuição de volume, as partículas ficam mais próximas umas das outras, isso causa um maior atrito entre elas, elevando assim a pressão e temperatura” (M7Q₂).*
- *As partículas sendo comprimidas terão um menor espaço para se movimentarem. Assim as partículas exercerão uma força “contrária” aumentando a pressão. Ficarão também mais próximas uma das outras elevando o atrito e conseqüentemente a temperatura”(M19Q₃).*
- *“ A pressão aumenta pois se diminuiu a área e se conserva o volume do gás. E a temperatura também aumenta pois as partículas têm menos espaço para se movimentarem e com isso colidem mais umas nas outras gerando calor.”(S21Q₄).*

Brook et Al (1983) também detectaram concepções semelhantes a esta entre estudantes de quinze anos descobrindo que eles não fazem

considerações sobre o bombardeio com as paredes do recipiente como explicação da relação temperatura-pressão para gases e que as partículas se movem mais e ocupam mais espaço quando aquecidas.

Além disto, a utilização do raciocínio linear causal em fenômenos da Termodinâmica, como já apontaram Rozier e Viennot(1991) tratam de questões superficialmente, omitindo dificuldades daqueles que utilizam variáveis múltiplas, ocorrendo o surgimento de contradições e citam um exemplo que tem implicações sérias para o ensino, que é aquele em que a maioria dos estudantes pensam que a energia cinética média no estado líquido durante a liquefação é menor que a do vapor.

2.5 - Associação entre diminuição da distância entre as partículas e aumento da energia.

A idéia de que a pressão está ligada à diminuição da distância entre as partículas e também à energia cinética revela um distanciamento do conceito científico, uma vez que na Termodinâmica a variação da distância está relacionada apenas à pressão, enquanto que a energia cinética está relacionada à temperatura.

Exemplos

- *Se aumenta a pressão o espaço diminui e as moléculas se agitam muito mais, aumentando a energia, logo a temperatura aumenta. E o contrário também é válido. Aumenta a temperatura, maior agitação das moléculas, logo aumento da pressão.”(M2Q₃)*
- *Aluno 10 – “Na compressão adiabática, o volume diminui, a pressão e a temperatura aumentam. Isso ocorre porque há menos espaço para o movimento das partículas, aumentando a velocidade de choque entre elas e, conseqüentemente, a pressão que elas fazem...(ininteligível) e a sua temperatura.(M10Q₃)*

Como observou Cafagne(1996), a concepção de sistema centrada no objeto, apesar de apresentar ressonâncias com o sistema simples na

Termodinâmica, impede a percepção da interação entre o sistema e a vizinhança, o que representa uma barreira para a percepção do que varia e do que se conserva, impedindo a percepção das variáveis de estado e de processo.

A compressão adiabática representa um excelente exemplo na exploração, em sala de aula, de exposição e debates sobre os modelos Mecânicos e Termodinâmicos focalizando principalmente o aspecto da transformação dos movimentos ordenados em desordenados e também para apontar o aspecto da concepção moderna de calor, que nesta transformação está ausente.

2.6 - Na fase de vapor, força de ligação que existia entre as moléculas na fase líquida não voltará a existir.

A idéia de que as forças de agregação são destruídas revela um distanciamento do conceito científico uma vez que o vapor pode retornar, oferecida as condições para isto, ao estado líquido. O raciocínio do aluno mostra uma não diferenciação entre o conceito de vapor e gás.

Exemplo:

- “ Não. A água evaporada, que passou do estado líquido para o gasoso não voltará espontaneamente para a panela, pois uma vez destruída a força que unia a molécula de água, ela não voltará a se unir. (M6Q₁)

Brook et al, mostram também que os estudantes, em seu trabalho, apresentam esta concepção quando afirmam “*as forças entre as partículas ficam mais fracas com o aumento de temperatura e isto explica a mudança de fase*”. Tal concepção, apesar de apresentar ressonâncias com o conceito de desagregação de Clausius, é bastante incompleta, se relacionando também com o raciocínio linear causal apontados por Rozier e Cafagne, como já foi citado anteriormente.

3 - Categoria C – percepções que se distanciavam do núcleo das questões e de baixo nível de consistência.

3.1 - Respostas que não levam em conta o núcleo das perguntas ou apresentam baixo nível de explicação macroscópica.

Alguns alunos responderam as questões de maneira descontextualizada, porém revelando algum elemento de raciocínio que apesar de baixa consistência contém elementos que de alguma forma se encadeiam.

Exemplos:

- *‘Sim; É só acender a chama novamente, porque assim a água vai se expandir com o calor’(M12Q₁).*
- *“3 fatores alteram um gás: volume, pressão e temperatura. Se é uma compressão adiabática, o volume não muda, e como um fator depende do outro, se a pressão é alterada, a temperatura também altera as partículas do gás.” (M14Q₃)*
- *$P_1V_1T_1 = P_2V_2T_2$. Na adiabática o volume não se altera, logo $P_1T_1 = P_2T_2$. Então aumentando a pressão, logicamente o volume alterar-se-á.*(M17Q₃)
- *“A pressão aumenta pois se diminuiu a área e se conserva o volume do gás. (M21Q₃)*
- *Aluno26 –:” Sim, o que aconteceu foi que a água tem a propriedade de reduzir seu próprio volume depois de receber n calorías. Como a chama foi apagada o calor absorvido irá dissipar, retornando às características anteriores.”(S26Q₁)*
- *“Citamos uma panela de pressão, a pressão e o volume variam. Logo provoca a agitação térmica do material e conseqüentemente a variação do volume (compressão adiabática).”(S26Q₃)*

Essas respostas combinam termos e expressões da teoria apresentada pelo professor mas com pouca coerência e referência ao fenômeno considerado concretamente.

4 - Categoria D - Indecodificáveis

Exemplos:

- *“ Houve uma dilatação dos gases”(S28Q₁)*
- *“É só separar em 4 o volume. ¼ você mistura com água mais quente e o outro ¼ você mistura com água mais gelada.” (M9Q₂)*
- *“Não, porque a água presente na panela evapora. Exceto, no caso em que a água não evapora, assim em T° mais alta a densidade da água diminui por ‘convenção’, e quando se resfria aumenta o volume. Ou também se a panela estiver hermeticamente fechada”. (M20Q₁)*
- *Não, uma vez mudando a sua temperatura inicial, automaticamente muda o seu volume e suas características”.(S24Q₁)*
- *“ Sim, desde que a temperatura ambiente esteja menor que 04 graus Celsius, pois a água tem esta característica.”(S27Q₁)*

As concepções dos estudantes

A procura das concepções espontâneas ou alternativas servem a dois propósitos: estabelecer uma relação com as idéias de Carnot e Clausius ao longo da elaboração da Teoria da Termodinâmica, bem como compará-las com as da Termodinâmica hoje aceitas.

Para chegar à compreensão mais profunda das concepções dos estudantes e sua relação com um modelo talvez mais articulado, organizamos os resultados obtidos em um quadro tomando como base a análise dos textos de Carnot e Clausius, por sua importância para a compreensão das leis da termodinâmica com ênfase **nos três tipos de transformação de Clausius: a de calor em trabalho, a de perda da qualidade de calor e a de desagregação.** Agregamos a essas idéias outros conceitos da Termodinâmica e sua concepção científica acreditada.

Nossa intenção foi não perder de vista os elementos mais fortemente ligados às respostas e às categorias e ao mesmo tempo percebê-los num contexto atual da Termodinâmica e seus conteúdos essenciais. Assim construímos o quadro:

Sistema	Processo	transformação	Calor	Energia	Partículas
<i>aberto</i>	<i>evolução</i>	Calor- trabalho	<i>Identidade</i>	<i>identidade</i>	<i>identidade</i>
<i>fechado</i>		<i>Sentido</i>	<i>qualidade</i>	<i>conservação</i>	
<i>isolado</i>		<i>desagregação.</i>			

Com esse foco retomamos as concepções dos estudantes:

SISTEMA
Aberto : - Há perda de substância para o ambiente - Parte da substância se dispersa no ambiente
Fechado : - não há perda nem dispersão no ambiente
Isolado : - confunde-se com sistema fechado

PROCESSO
Evolução : - descrito de forma narrativa - transporte de modelo mecânico

TRANSFORMAÇÕES
Calor- trabalho – associado à mudança de fase
Sentido – ligado à idéia de espontâneo como propriedade natural do corpo. - associado à atuação do experimentador sobre o sistema. - associado à idéia de sistema fechado.
Desagregação – dispersão - quebra de forças entre moléculas

CALOR
Identidade - substância
Qualidade – ligada à temperatura como nível térmico.

ENERGIA
Identidade - movimento
Conservação – nada foi detectado

PARTÍCULAS
Identidade - semelhante ao de um corpo. Podem: variar de volume, ser atritadas, gerar calor durante choques.

Elementos de um modelo alternativo

Sistema: Objeto

A maioria dos alunos descreve o sistema focalizando exclusivamente o objeto. É a água nas questões Q_1 e Q_2 , ou o gás na questão Q_3 . Não faz referência a possíveis interferências entre ela e as superfícies de separação como painéis, canecas etc. e o meio ambiente. A interferência que o sistema recebe é exclusivamente entre o objeto e a fonte de calor, como mostra, mais uma vez, o exemplo a seguir:

- “Acredito que não, pois a água durante o tempo em que a chama estava acesa, houve mudança ou pode ter ocorrido mudança de fase de líquido para gasoso, impossibilitando o retorno do volume original de água na panela.”(S25Q₁).

Como já foi dito antes, este modelo do senso comum, apesar de apresentar ressonâncias com o modelo de sistemas simples da Termodinâmica, contém sérias limitações quando se pretende analisar com

mais profundidade o fenômeno, principalmente quando se pretende dar possibilidade, aos estudantes, de acesso à consistência das leis da Física.

Processo: *narrativo, com descrição de passagens intermediárias relacionando causa e efeito.*

É caracterizado de forma narrativa, justificando todas as passagens, desde o início até a situação final com abordagem exclusivamente macroscópica como mostra a resposta de M5:

- *“Primeiro, separe os líquidos. Depois, pegue um termômetro e meça a temperatura. Se um estiver mais frio, do que deveria estar, aqueça-o ao fogo. Se o outro estiver mais quente do que deveria estar, coloque-o em uma vasilha com gelo. Sempre cheque a temperatura com um termômetro”(M5Q₂).*

Este modo de pensar parece muito afastado da idéia de estados inicial e final, usualmente tratado para resolver problemas em que ocorre troca de calor. A necessidade de análise através de relações causais subseqüentes será um obstáculo para a compreensão da Termodinâmica.

Transformação: *Ligada à mudança de fase, de dispersão e do todo para as partes.*

Este modelo é revelado através das considerações a seguir:

a) muitos estudantes possuem a idéia de espontâneo como uma tendência natural do corpo em permanecer no estado em que se encontra, remetendo à idéia de inércia. Isto implica que para eles sentido para as transformações é duplo e forçado. Podem ocorrer tanto das temperatura mais altas para as mais baixas quanto das mais baixas para as mais altas. Talvez isto venha da concepção do duplo sentido que o calor tem para eles: o corpo ao receber “calor quente” se esquentam e ao ceder “calor frio” se esfria

Cafagne(1996). Portanto não há um sentido privilegiado para as transformações.

- “De forma espontânea, não. Já que, parte da água ebuliu, para que seu volume tenha diminuído. Como não é possível por livre espontânea vontade, fazer a água condensar,(sem alterar a temperatura), logo, não é possível”.(M4Q₁)
- “De forma espontânea não. Pois teria que ocorrer um aumento na pressão e na temperatura.(M7Q₁)
- “Acredito que não, pois a água durante o tempo em que a chama estava acesa, houve mudança ou pode ter ocorrido mudança de fase de líquido para gasoso, impossibilitando o retorno do volume original de água na panela.”(S25Q₁) .

b) Um grande número de alunos expressam a reversibilidade como ação externa sobre o sistema, dividindo-o em partes (idéia estática de equilíbrio termodinâmico).

- “Primeiro, separe os líquidos. Depois, pegue um termômetro e meça a temperatura. Se um estiver mais frio, do que deveria estar, aqueça-o ao fogo. Se o outro estiver mais quente do que deveria estar, coloque-o em uma vasilha com gelo. Sempre cheque a temperatura com um termômetro”(M5Q₂).

c) Retirando-se a fonte o calor é rejeitado pelo sistema.

Para alguns estudantes, uma vez afastada a fonte, o calor absorvido será expulso e ele voltará à situação inicial.

Exemplo

- “ Sim. O volume diminuiu devido à evaporação. Se a panela foi aquecida com sua tampa vedando-a, então, após algum tempo, as moléculas de água se condensarão e o volume inicial voltará a existir”(M14Q₁).

d) Desagregação ligada a aumento de dispersão.

Alguns alunos apresentam uma concepção mais elaborada do sentido da transformação quando apresenta uma visão relacionada à estrutura interna do corpo. Neste caso ele se aproxima da noção científica de irreversibilidade como algo que está ligado ao arranjo interno das substância.

Exemplos:

- *“Não vejo maneira de ocorrer esse fenômeno!” Uma hipótese bem... (ininteligível)... que pode haver á a seguinte: junto com a água quente ou a outra água pode-se colocar uma espécie de corante, ou algo parecido, que demonstre a diferença. Mas acho pouco provável a veracidade deste fato.”(M1Q₂)*
- *“Não. A água evaporada, que passou do estado líquido para o gasoso não voltará espontaneamente para a panela, pois uma vez destruída a força que unia a molécula de água, ela não voltará a se unir.”(M6Q₁)*
- *“Não, pois com o aumento de temperatura provocado pela chama a água evaporou, atingindo a forma gasosa que se espalha pelo ar, evitando que, de forma natural, essa água retorne à panela.” (M16Q₁)*

Capítulo IV

Barreiras conceituais, aproximações possíveis e o ensino da Termodinâmica

Neste capítulo discutimos as barreiras conceituais e as aproximações possíveis com o conhecimento científico que podem subsidiar o processo de construção conceitual da Termodinâmica, com a finalidade de possibilitar o ensino e aprendizagem, levando dos modelos do senso comum para os científicos.

A utilização da expressão “*Barreiras conceituais*” que aparece na questão de pesquisa, se deve ao fato de que o conhecimento do estudante pode representar um entrave na compreensão dos conceitos científicos. Como já foi dito, elas podem se constituir como um conhecimento estruturado e resistente a mudanças que foi sendo adquirido durante o seu contato com o mundo extra-escolar desde o seu nascimento, incluindo também lacunas decorrentes do seu contato com os conteúdos científicos na escola.

As concepções consideradas por nós como próximas dos conceitos científicos poderão ser utilizadas como sementes para produzir, em sala de aula, situações de ensino que levem a uma aproximação crescente com a Termodinâmica. Entretanto, estas aproximações serão ainda incompletas, o que requer, quando se pretende um aprofundamento maior, a consideração das barreiras conceituais colocando-as em situação de conflitos cognitivos com o conhecimento científico.

Os elementos organizados no quadro da página 86: Sistema, Processo e Transformação são importantes chaves para essa discussão porque representam a base sobre a qual a Termodinâmica é definida, dando conta da fenomenologia dessa área da física.

Sistema

O senso comum revela uma noção de sistema que constitui uma barreira conceitual considerável. Ela se caracteriza por uma centralização no objeto e privilégio da fonte quente no processo de troca.

Sendo centrado no objeto.

Como foi mostrado no capítulo III, tal noção revela a ausência de familiarização com os procedimentos da Termodinâmica sobre sistemas complexos, porque tal visão, de que sistema e objetos simples coincidem, não possibilita a percepção das interações entre o objeto observado e os outros em suas vizinhanças.

Nas questões Q_1 e Q_2 apresentadas aos alunos não há referências a sistemas isolados; o fato de tratar situações do cotidiano onde as paredes são as “naturais”, ligadas ao universo do aluno, permitiu identificar nas respostas suas pré-concepções e relacioná-las com as da Termodinâmica.

As respostas dadas à Q_3 reforçam o que foi considerado para as duas primeiras. O sistema, centrado no gás, impede a consideração do movimento do êmbolo durante a transformação adiabática e suas conseqüentes implicações para o movimento desordenado das partículas. Além disso, os alunos não fazem relação, em nenhum momento, entre as forças exercidas pelo êmbolo, durante a compressão, e os efeitos sobre as partículas do gás.

Observações semelhantes já tinham sido apontadas por Pacca e Henrique (2004), com relação ao conceito de energia potencial gravitacional entre professores do ensino médio onde também aparece uma *visão local*, própria do raciocínio do senso comum, que se opõe à idéia de *sistema de corpos e de interações físicas*.

Sendo a presença da fonte quente fortemente acentuada, a argumentação de muitos estudantes, trata-a *como uma fornecedora de uma “substância” que provoca alterações no corpo que a recebe, tais como aumento de temperatura e mudança de estado físico, como pode ser observado nas seguintes citações: “a água recebe calor (da chama) e aumenta sua temperatura.” “o calor da chama fez com que a água evaporasse”.*

Mostramos que investigadores como Albert (1978), Clough & Driver (1985) e outros detetaram respostas semelhantes e tal concepção se estende ao conceito de energia como observaram Alomá & Malaver (2007), Pacca e Henrique(2004), inclusive entre professores e alunos: uma substância ou ente material capaz de modificar os corpos e produzir mudanças de estado físico. Tal concepção também aparece entre autores de textos sobre termodinâmica onde, frases que confundem o calor como uma forma de energia ou o definem como energia que se transfere, são frequentemente encontradas.

O mesmo acontece, em tais textos didáticos, com a definição de trabalho como forma de transferência de energia. Em todos eles é a ação de uma força sobre um corpo durante o deslocamento do seu ponto de aplicação, porém, como ocorre na conceituação de calor, apresentam frases que se referem ao trabalho como energia, revelando desconhecimento do processo histórico que levou à sua conceituação que, no caso da termodinâmica, representa um obstáculo à compreensão de idéia de transformação introduzida por Clausius e que, na nossa opinião, leva a uma compreensão distorcida da primeira lei.

Estas concepções levam a barreiras para a aplicação correta da lei da conservação da energia, levando a dificuldades na identificação do que se transforma e do que não varia ou se conserva; o não isolamento, dificulta a identificação dos corpos do sistema e, conseqüentemente, o que nele é invariante.

Um outro aspecto observado se refere às respostas dadas à questão Q₃. A sua análise remete, uma vez mais, às conclusões de Alomá & Malaver(2007), quando se referem aos textos dos materiais didáticos: a maioria não mostra uma conceituação de energia. Fazem apenas referências a termos como energia cinética, potencial, translacional e apresenta uma noção de energia como uma substância ou ente material capaz de modificar os corpos e

produzir mudanças de estado. Verificamos também, no nosso caso, o transporte para as situações da Termodinâmica, de modelos mecânicos, conduzindo a argumentações que violam o princípio da conservação da energia, como podemos verificar nos exemplos:

Porque quando aumentamos a pressão, as partículas desse determinado gás passam a se chocar mais vezes e com isso a temperatura aumentará. Da mesma forma ocorre se aumentarmos a temperatura, a pressão aumentará se for uma compressão adiabática logicamente.”(M6Q₃)

“ A pressão aumenta pois se diminuiu a área e se conserva o volume do gás. E a temperatura também aumenta pois as partículas têm menos espaço para se movimentarem e com isso colidem mais umas nas outras gerando calor.”(S21Q₃).

Como podemos verificar, para o aluno 6, o aumento de pressão acarreta o aumento do número de colisões, resultando disso, um aumento de temperatura. Verifica-se portanto, que para ele, as novas colisões “geram calor”, transportando para os fenômenos termodinâmicos discussões feitas na mecânica para colisões não elásticas entre corpos macroscópicos, o que revela mais uma vez a ausência da idéia de sistema termodinâmico como elemento essencial para a compreensão do fenômeno estabelecendo para isso o foco adequado no que se refere ao que se transforma e ao que não varia.

Os exemplos mostram que, de forma implícita, os estudantes explicam o aumento de pressão devido ao aumento do número de partículas por unidade de volume ou “densidade” de partículas. Nada é dito sobre outros aspectos relevantes como a energia cinética das partículas que se modifica devido à movimentação do êmbolo, que ao realizar trabalho mecânico possibilitou a transformação de energia mecânica em energia interna do sistema.

Rozier & Viennot(1991), ao aplicar esta questão aos estudantes de engenharia da Universidade de Paris, obtiveram respostas semelhantes como mostram os exemplos: “O volume diminui, portanto as moléculas ficam mais próximas umas das outras, portanto há mais colisões e a pressão aumenta”. “O

volume diminui, portanto há mais moléculas por unidade de volume, portanto a pressão aumenta”.

As autoras sublinham a tendência dos estudantes em não considerar algumas variáveis relevantes e, num olhar mais amplo, apontam que esta mesma tendência ocorre em livros didáticos, inclusive alguns que são considerados muito bons por alguns professores universitários em avaliações informais na França.

A noção de Sistema da Termodinâmica se afasta bastante do senso comum. Pacca e Henrique(2004), chamam a atenção para o fato que, do ponto de vista clássico, o conceito físico de energia somente tem significado se for considerado no contexto de transformação e, portanto, associado a uma concepção mais ampla do espaço no qual tem lugar as interações que se tem em conta para um determinado **sistema** onde os processos de transformação devem dar conta da própria conceituação da energia.

Segundo Callen (2005), a Termodinâmica é o estudo das conseqüências macroscópicas de um grande número de coordenadas atômicas, que, devido às médias estatísticas, não aparecem explicitamente na descrição macroscópica do sistema. Para a descrição de um sistema termodinâmico é necessário a especificação “das paredes” que separa o sistema do seu entorno e que fornecem o estabelecimento de fronteiras.

Para que os sistemas possam ser pensados isolados utilizando a concepção da Termodinâmica é preciso que sejam identificados os outros com os quais interagem. Assim, pode-se levar em conta a conservação e descrever o estado do sistema com os parâmetros da temperatura.

Um exemplo de sistema termodinâmico é o calorímetro, composto por recipiente, substância colocada em seu interior, agitador e termômetro. O sistema é inicialmente separado (em pensamento), do resto das objetos materiais e descrito por meio de “variáveis de estado” macroscópicas tais como pressão, volume e temperatura. A fronteira do sistema é necessária para compreender de que maneira o sistema interage com um outro à sua volta denominado vizinhança.

As considerações das paredes do sistema permitem um estudo mais sistemático do problema, permitindo a mensurabilidade da energia. Um exemplo disto é a medida da diferença de energia entre dois estados diferentes

de um gás ideal numa compressão adiabática. O trabalho mecânico realizado pela força sobre o êmbolo desde o estado inicial até o estado final, corresponde à diferença de energia interna entre os dois estados, independente de todas as condições externas. Este exemplo também ilustra uma excelente maneira de discutir a transformação de trabalho mecânico em energia interna, além de permitir uma frutífera discussão a respeito das diferenças entre a energia relativa aos movimentos ordenados e aquela que se relaciona aos movimentos desordenados.

Um sistema termodinâmico pode ser **aberto, fechado e isolado**, do ponto de vista das trocas com a vizinhança. Esta classificação é feita de acordo com a ocorrência ou não das trocas de energia e/ou matéria. No *aberto*, há trocas tanto de matéria quanto de energia. No *fechado*, só há trocas de energia. Já no *isolado* não há trocas nem de matéria nem de energia.

Na natureza não há sistemas totalmente isolados porque está ocorrendo constantemente interações entre os corpos do universo, de forma que a conservação da energia não se verifica para qualquer sistema real. Pode-se entretanto através de uma escolha conveniente, tornar desprezíveis os efeitos externos e considerá-los isolados.

Na termodinâmica, o isolamento dos sistemas adquire uma importância fundamental não apenas para delimitar o problema e tratar com mais segurança as variáveis, mas também por se tratar de uma necessidade praticamente imposta pelo comportamento natural do calor, de se distribuir pelos corpos até alcançar o equilíbrio térmico (Cafagne,1996).

Este isolamento deve ser feito levando-se em conta a identificação dos sistemas que interagem (considerando-se o princípio da conservação da energia), a descrição dos estados do sistema, a comparação das diferenças de temperatura existentes e a verificação de como se aplica a segunda lei da termodinâmica com relação ao sentido de propagação do calor.

Processo

O senso comum não identifica variáveis de estado de variáveis de processo porque carece de dificuldades intrínsecas à concepção do modelo de gás e de matéria aceita pela física.

Não faz diferenciação entre calor e temperatura.

Grande número de alunos diz: “à medida que recebe calor da chama, a temperatura aumenta”. Percebe-se aqui que o calor é a causa do aumento de temperatura. Revela-se, portanto, distância da concepção da Termodinâmica no que diz respeito ao que seja uma variável de estado (que seria a energia interna da substância) e a variável de processo que é o calor.

Tal raciocínio é válido quanto ao aspecto histórico no que se refere à idéia de “calórico” e para os cálculos que são efetuados na calorimetria. Entretanto, é importante que se coloque a seguinte questão: para familiarizar os estudantes com a termodinâmica, levando-os a trabalhar com as concepções dessa ciência e que leve a uma maior consistência com suas leis, é fundamental que se pense em formas de levar para sala de aula situações de ensino que revelem a importância do sistema para a compreensão da Termodinâmica. Ela deverá possibilitar uma diferenciação entre variáveis de estado e de processo. Pois, o conceito de calor como associado à categoria de processos (interações térmicas), que implicam em transformações, poderão ajudar os estudantes a modificar sua concepção substancialista de calor.

Não há percepção entre trocas de energia entre o objeto e o ambiente.

Muitos alunos apresentam argumentações do tipo: “se a panela estiver com a tampa, após algum tempo a água volta ao estado líquido”. Nota-se aqui, que a noção de sistema fechado está relacionado apenas com a ausência de perda de massa com o meio ambiente. A volta à condição inicial (estado líquido) se relaciona como algo natural da própria substância e, para que isso ocorra, basta que a fonte quente seja desligada.

No capítulo I mostramos no estudo realizado por Albert (1978), que entre seis e quatro anos, a criança tem a noção de calor como algo que pode ser subitamente criado ou destruído. Quando elas descrevem manipulações com objetos que podem produzir calor, mencionam atividades de ligar e desligar (fornos, lâmpadas, aquecedores, etc) esperando, com isso, que eles se tornem quentes ou frios de forma imediata. As ações estão associadas diretamente com as expectativas de que o objeto pode se tornar quente ou frio. Não há, aqui, um pensamento estruturado. Isto sugere que a idéia de que a existência de um lugar aquecido é uma condição para um objeto se tornar quente. Calor é alguma coisa que vai da fonte para o objeto acrescentado de um efeito que envolve alguma atividade como a de ligar lâmpadas, fornos e outros aparelhos e que se relaciona com alguma expectativa de se criar um ambiente aquecido. Podemos perceber, em nosso trabalho, que essas concepções permanecem entre os estudantes, tanto do nível médio quanto do superior.

Um aspecto interessante é a menção de que a água leva um certo tempo para retornar ao estado líquido. Isto mostra que os estudantes misturam várias concepções sobre calor que parecem se sobrepor ao longo de sua vida. A menção ao tempo mostra a concepção de “tornar-se líquido” como processo, o que remete às conclusões de Erickson (1979), sobre o processo do aquecimento de um bastão. Ao apontar que entre crianças de 3 aos treze anos, há descrições de que quando uma vareta é aquecida o calor ocupa uma parte dela até preenchê-la. Em seguida vai se movendo e ocupando as outras partes até que acaba a vareta. No nosso caso, a relação com a volta ao estado líquido parece ser de que o calor vai sendo aos poucos rejeitado até que a água possa, finalmente, atingir a sua forma líquida inicial.

Já foi verificado ao longo das pesquisas com crianças e jovens que “tornar-se quente é um processo”; assim, o aquecimento do ar pelo Sol aparece como um processo, ou seja: as crianças adquirem a concepção que esquentar-se é um processo porque leva um certo tempo para ocorrer(tanto para a fonte como para o objeto). A raiz da concepção de “*tornar-se quente*” como um processo está na experiência de sentir-se aquecido quando o nosso corpo é exposto à radiação solar. Neste caso, o aquecimento penetra e se espalha pelo corpo.

Utiliza-se frequentemente da forma narrativa:

Como já apontamos anteriormente, as argumentações dos estudantes revelam a existência de uma historicidade, como mostra o exemplo: “à medida que recebe calor da chama a temperatura da água aumenta até que se transforma em vapor e se espalha pelo ar”. Este aspecto narrativo revela um componente fortemente cultural do ambiente social em que os estudantes vivem em que os acontecimentos são narrados a partir da situação anteriormente existente, em que a fase intermediária recebe um tratamento especial, o que se distancia da Termodinâmica, para cujo formalismo o que interessa é a situação inicial e final, onde o sistema “esquece” a sua história.

Cafagne (1996), ao se referir a este aspecto do senso comum acentua que a narrativa ocupa um papel importante na descrição dos processos “*o calor da chama aumenta a temperatura da água que se evapora e se espalha pelo ar*”, o que mostra que os elementos que justificam a narrativa são escolhidos em função do contexto, sem que se distanciem dos fatos observados na vida diária e dos instrumentos perceptivos do sujeito. E este modo de pensar não é facilmente superável, existindo resistência para aceitar a descrição apenas por meio de estados inicial e final.

É caracterizado pela forma causa-efeito:

Verificou-se também que, de maneira geral, os estudantes reduzem a complexidade dos problemas que envolvem conceitos de termodinâmica. Percebem-se argumentações com ausência de variáveis relevantes e outras mais elaboradas, onde todas as variáveis são consideradas mas através da utilização de um caminho simplificado: o “argumento linear causal”.

Um exemplo deste tipo de argumento no nosso trabalho é: “o calor da chama aumentou a temperatura da água, por isso ela evaporou. O vapor, sendo leve, sobe e se espalha pelo ar, fazendo com que a água não volte mais”. Embora o senso comum ao colocar as coisas num contexto causal mostre alguma ressonância com as teorias científicas, pois tentam dar ordem e

regularidade onde aparentemente há desordem e irregularidades, apresenta, contudo, limitações em relação à causalidade científica.

O fato de que quando o senso comum afirma "o ferro é frio", ele está considerando uma relação entre "objetos" o ferro e a sensação de frio que este transmite ao ser tocado. O cientista, porém, exprime o mesmo fato de modo diferente ao considerar a condutividade do ferro a partir de dois instantes diferentes. Enquanto o conhecimento comum tende a pensar a causalidade uma relação entre objetos, o cientista a utiliza como uma relação entre estados diversos de um mesmo objeto ou de um mesmo sistema de objetos, em diferentes instantes de tempo(Cafagne,1996).

Não diferencia os modelos mecânicos do termodinâmico.

Respostas como: " ao diminuir o volume, as partículas se chocam mais, aumentando o atrito elevando a temperatura", mostram lacunas que impedem a diferenciação entre os conceitos da Mecânica e os da Termodinâmica. Estas lacunas são frequentemente encontradas nos textos didáticos em que, na mecânica, por exemplo, aspectos que seriam importantes a considerar como a transformação de movimentos ordenados em desordenados não são abordados de forma conveniente, o que favorece uma indiferenciação entre os fenômenos mecânicos e Termodinâmicos.

O que diz a Termodinâmica ?

A Termodinâmica clássica é o estudo das conseqüências macroscópicas de um grande número de coordenadas microscópicas que, devido às médias estatísticas, não aparecem explicitamente na descrição macroscópica do sistema. Nela, o corpo é visto como um agregado de moléculas cujas posições e velocidades são distribuídas arbitrariamente. Assim, só podemos estudar o comportamento dos estados de máxima desordem que correspondem a estados de equilíbrio termodinâmico.

A Termodinâmica clássica trata apenas dos estados de equilíbrio em que o sistema evolui no tempo de forma que as grandezas como a temperatura

pressão, descritas como variáveis de estado sejam uniformizadas em todas as partes de modo que o sistema esqueça o seu passado. A variação de qualquer propriedade do sistema implica na variação do seu *estado*, o que nos leva a dizer que ele sofreu um **processo**. A identificação das variáveis de processo e das variáveis de estado é de importância fundamental na Termodinâmica. O primeiro princípio pode mostrar de forma clara quais são elas.

O princípio da conservação da energia que hoje é conhecido como primeira lei da Termodinâmica junto com o segundo princípio, são afirmações que concentram um determinado número de conceitos cuja compreensão necessita uma reflexão cuidadosa sobre o significado do seu enunciado.

A primeira lei da termodinâmica reproduz a lei da conservação da energia em termos da energia interna de qualquer porção de uma substância qualquer. Ela explicita que a variação da energia interna de uma substância é igual ao calor que ele recebe do meio, por conta da diferença de temperatura, menos o trabalho que ela realiza sobre o meio. Simbolicamente:

$$dU = dQ - dW$$

Sendo que dU é uma pequena variação da energia interna (U), dQ uma pequena quantidade de energia recebida do meio e dW o trabalho realizado pela substância sobre o sistema.

Para mudanças macroscópicas em que o sistema evolui do estado 1 para o estado 2, devem ser somadas todos os dQ e dW para calcular a variação total de energia interna durante a passagem do sistema do estado inicial para o final:

$$\int_1^2 dU = \int_1^2 dQ - \int_1^2 dw$$

A variação da energia dU depende apenas dos estados inicial e final, podendo-se dizer que em cada estado o sistema possui uma energia interna, portanto ela é uma variável de estado. Entretanto, Q e W são variáveis de processo, ou seja, não se pode dizer que em cada estado o sistema tem uma quantidade de calor ou de trabalho.

As variações de energia são determinadas pelas condições iniciais e finais não pelo caminho. Calor e trabalho referem-se à energia no processo de transformação, seus valores são determinados não apenas pelas condições iniciais e finais, mas também pelo caminho seguido, estão associadas às variáveis de processo.

Transformação

As transformações no senso comum parecem constituir uma barreira crítica e relacionada com a concepção de sistema:

As questões apresentadas levaram a respostas que revelam uma concepção de que os processos espontâneos não são possíveis pois muitos destes alunos apresentam uma idéia de espontâneo ligada a uma característica do corpo que tende a deixá-lo sempre no estado de equilíbrio termodinâmico em que se encontra, como por exemplo: *“Acredito que não, pois a água durante o tempo em que a chama estava acesa, houve mudança ou pode ter ocorrido mudança de fase de líquido para gasoso, impossibilitando o retorno do volume original de água na panela.”*(S25Q₁).

Esta visão mostra, que, diferentemente da Termodinâmica, justamente por não focalizar as interações entre sistemas, o estudante tende a considerar o estado final da substância como seu estado natural, centrando sua atenção para a característica de uma maior expansão do estado gasoso em relação ao estado líquido, o que mostra um raciocínio excessivamente centrado no objeto e com a aplicação de um modelo de calor como algo capaz de produzir uma transformação no próprio corpo, dimensão esta que possui alguma ressonância com a idéia de desagregação de Clausius, segundo o qual, o trabalho dos constituintes internos do corpo produzem desagregação, como exemplificado na resposta: *“ Não. A água evaporada, que passou do estado líquido para o gasoso não voltará espontaneamente para a panela, pois uma vez destruída a força que unia a molécula de água, ela não voltará a se unir.* (M6Q₁)

As idéias de transformação no senso comum aparecem das seguintes formas:

o modelo substancialista de calor: “ a água recebe calor da chama, evapora, se a panela estiver tampada, depois de algum tempo o calor se dissipa e ela volta ao estado líquido.” Parece haver uma percepção intuitiva de que calor produz desagregação: “ ao se vaporizar, há quebra das forças entre as moléculas da água” . Ao se referir à “quebra das forças entre as moléculas”, o estudante mostra uma concepção que se aproxima das concepções da Termodinâmica e que podem ser aproveitadas como pontes na elaboração de estratégias para uma maior aproximação com o conceito de desagregação de Clausius, embora forneça, ainda, uma visão incompleta do fenômeno. Entretanto, tal aproximação pode ser utilizada como uma etapa do processo ensino-aprendizagem que prepara o estudante para incursões mais profundas posteriormente.

O retorno à condição inicial não ocorre de forma espontânea.

O senso comum apresenta uma noção de espontâneo atrelado a variações de várias variáveis de estado e em múltiplos sentidos como no exemplo: “ *de forma espontânea não, pois deveria ocorrer uma variação na pressão e na temperatura.*” A idéia revela grande distanciamento da Termodinâmica, uma vez que os processos espontâneos são irreversíveis e ocorrem apenas em um sentido e atrelado a à variação de temperatura entre os sistemas que interagem.

Em algumas respostas verifica-se alguma proximidade com a termodinâmica como por exemplo: “As temperaturas iniciais só voltarão a ser as mesmas com adição de energia externa através do calor. Quanto ao líquido propriamente dito, será quase impossível colocá-lo em sua totalidade, átomo por átomo, molécula por molécula”. As palavras **energia** e **calor** aparecem como conceitos diferentes junto com uma referência ao líquido como constituído de moléculas e átomos, revelando, implicitamente, que no equilíbrio termodinâmico tais partículas individualmente, estão numa situação muito diferente da inicial; isto pode ser entendido como uma idéia embrionária de probabilidade quando se refere a ser “quase impossível colocá-lo em sua totalidade” no estado inicial.

O que diz a Termodinâmica sobre transformação?

O raciocínio de Clausius, ao proceder à análise do ciclo elaborado por Carnot, introduziu uma idéia original: a de **transformação**. Em primeiro lugar, de **calor em trabalho**, que advém do estabelecimento de uma equivalência numérica entre eles, depois a de **calor de uma temperatura à de calor de outra temperatura** e por último à relacionada ao trabalho interno dos constituintes microscópicos dos corpos: a **desagregação**.

A partir da generalização do conceito de transformação, Clausius analisou a *equivalência* que é possível estabelecer entre as transformações no ciclo e a relação com as temperaturas envolvidas.

O valor equivalente das transformações constitui a origem do conceito de entropia no pensamento de Clausius, levando-o à descoberta da existência de uma direção preferencial para as transformações, o que implica em que só ocorra reversibilidade no caso em que estas transformações se compensem. Em sua discussão de processos não circulares, Clausius estabelece a diferença entre *trabalho externo*, aquele que diz respeito às forças que outros corpos exercem sobre o corpo em questão, e *trabalho interno*, aquele que é efetuado pelos constituintes moleculares do próprio corpo. Tratar com este último, requer trabalhar com quantidades desconhecidas e envolve, nas palavras de Clausius, “*crer em probabilidades*”(Aurani1985).

Na termodinâmica, são irreversíveis, como já foi discutido no capítulo II, aqueles fenômenos que ocorrem espontaneamente, onde há sempre um aumento de entropia mas, em muitos caso, o acoplamento com um sistema oportuno pode permitir o retorno ao estado inicial, embora ocorra um aumento de entropia do sistema auxiliar. Assim sendo, tratar com a idéia de probabilidade será essencial e no senso comum isto aparece de forma muito rudimentar.

Capítulo V

Conclusões e Implicações para o Ensino

“Não vejo maneira de ocorrer esse fenômeno! Uma hipótese que pode haver é a seguinte: junto com a água quente ou a outra água pode-se colocar uma espécie de corante, ou algo parecido, que demonstre a diferença. Mas acho pouco provável a veracidade deste fato”(M1Q₂)

Conclusões

A análise das três questões apresentadas permitiram o levantamento das idéias dos estudantes sobre fenômenos termodinâmicos que, relacionados com os trabalhos dos autores mencionados no levantamento bibliográfico e o confronto com as concepções da Termodinâmica, nos levassem, de volta, ao nosso problema de pesquisa: **Quais as barreiras conceituais dos estudantes que dificultam a compreensão da segunda lei da Termodinâmica?**

As questões que elaboramos como instrumento para obtenção de dados representativos das formas de conceber os fenômenos sobre calor revelaram-se bastante apropriados fornecendo nas respostas conteúdos significativos para a nossa questão.

Os modelos alternativos dos sujeitos analisados puderam ser caracterizados e nos levam aos resultados:

- As barreiras conceituais dos estudantes enfatizam as conclusões dos investigadores citados no levantamento bibliográfico, de que as concepções espontâneas dos estudantes são resistentes à mudança e reforça a idéia de que elas devem ser conhecidas para que sejam levadas em consideração quando se pretende que os alunos aprendam os conceitos científicos. O conhecimento do pensamento do aluno deve ampliar o repertório do professor, podendo levá-lo a uma atuação que

permita, por parte dos estudantes, uma apreensão significativa do conhecimento científico.

A comparação entre as barreiras e algumas possíveis ressonâncias os modos de pensar da ciência nos parecem permitir novas aberturas de possibilidades de explicações aos estudantes tanto para os fenômenos naturais quanto para aqueles que ocorrem nos produtos tecnológicos que profusamente são colocados à disposição do ser humano.

- O levantamento das concepções espontâneas feita neste trabalho entre alunos que já tinham estudado o conteúdo da Termodinâmica, tal a quantidades de lacunas reveladas, reforça a importância deste tipo de investigação e mais ainda, a consciência de que os seus resultados possam ser levados ao conhecimento dos professores, pois tais lacunas são indicadores de que o ensino, da forma como foi feito, não mostrou resultados significativos.
- As questões apresentadas produziram situações instigantes pois produziram respostas criativas e interessantes, sendo possível detetar no pensamento espontâneo situações onde se explicitam o prazer pelo conhecimento além de situações de conflito quando se procurava, através de levantamento de hipóteses, estabelecer relações causais na busca de soluções para os problemas.
- O alto teor de focalização de um fenômeno local, como pode ser visto na falta de correlação entre os fenômenos descritos nas questões Q_1 e Q_2 torna necessário reflexões sobre o desenvolvimento das estruturas cognitivas que levem a sistematizações com conseqüente generalização, criando-se condições que permitam a mudança conceitual.

Os exemplos encontrados reforçam as conclusões que já haviam sido apontadas pelos autores pesquisados quando dizem que é necessário que se dê atenção à qualidade das argumentações para que se procurem formas de torná-las consistentes com as leis científicas através de situações de ensino que levem os estudantes a perceberem a importância das sistematizações e os aspectos generalizantes destas leis.

- Elementos que evidenciam como pontos de partida relevantes para uma mudança conceitual a relação entre o desenvolvimento histórico das teorias científicas e a aprendizagem, como elementos que conduzem ao desenvolvimento pessoal.
- A idéia de desagregação parece estar mais próxima do senso comum do que a idéia do ciclo de Carnot, talvez porque os alunos estejam em contato com sistemas abertos no seu cotidiano.
- A noção de sistema fechado, por ser centrado no objeto impede que se perceba a importância do isolamento, dificultando a percepção do que se conserva e do que varia.
- Ausência de visão da estrutura da matéria, de aspectos que diferenciam movimentos ordenados e desordenados, falta de tratamento adequado e concepções errôneas existentes, sobre este assunto, entre professores, fazem com que os alunos não adquiram noções corretas sobre fenômenos termodinâmicos, o que leva a dificuldades para a percepção dos fenômenos irreversíveis.
- Não percebemos, nos nossos dados, diferenciação entre as concepções dos alunos do ensino médio e superior. Muitas respostas dos alunos do ensino médio apresentaram um grau de elaboração maior, mais coerência e ajustamento com os dados das questões, sem no entanto revelarem novas idéias.
- A noção de equilíbrio termodinâmico está ausente das concepções como fica evidente nas respostas da questão Q₂, revelando que o modo de pensar do aluno apresenta uma noção de realidade distante da realidade adotada pela ciência; é justamente esta ausência que coloca e valoriza o papel do investigador como fornecedor de dados e de subsídios ao professor, que alertado, poderá partir da construção de pontes e conflitos adequados.

A falta de uma noção mais ampla de fonte, de sistema isolado, de diferenciação entre calor e temperatura, impede a visão do sentido privilegiado das transformações e a constatação da irreversibilidade dos processos

espontâneos, pois a própria noção do conceito termodinâmico dos processos espontâneos fica comprometida.

Implicações para o ensino

Como mais um resultado importante desta pesquisa consideramos que as questões Q_1 , Q_2 e Q_3 que nos permitiram encontrar as idéias dos alunos constituem instrumentos pedagógicos importantes para trabalhar, em sala de aula, com os estudantes e possibilitar discussões acerca de modelos. Este instrumento constituem-se, portanto, em atividades para a sala de aula, com grande potencial para o professor discutir e levar os alunos a reelaborarem suas idéias.

O modelo dos estudantes é importante não só para se detectar as idéias que se aproximam ou que se distanciam dos conceitos da Termodinâmica mas também como um guia para estabelecer um diálogo pedagógico e possibilitar a introdução dos alunos na cultura científica, levando em conta que aprender ciências corresponde a uma evolução das idéias desde as concepções prévias até o conceito científico empírico e deste às leis e teorias. Acreditamos ser pouco provável que se aprenda sem relacionar o conhecimento novo com alguma idéia anterior, pois sem esta correlação, corre-se o risco dos estudantes repetirem frases que foram memorizadas e que não têm significado algum para quem as diz.

Piaget e Postel(1986) observaram, com relação à compreensão dos fenômenos térmicos: *“(...)O considerável intervalo entre a explicação da transmissão mecânica e o da transmissão térmica, se deve ao fato de que, com a finalidade de entender o fenômeno da mistura, a criança tem que construir um modelo probabilístico de mistura atribuído à realidade”.*⁵

Com relação à esta questão, é que consideramos de grande importância o conhecimento da teoria elaborada por Clausius em que se explicitam formas de se contornar estes aspectos probabilísticos ao utilizar a idéia de desagregação, com base no trabalho externo e interno realizado pelo calor e que culminaram na definição de entropia e o confronto que fizemos com os

⁵ Tal dificuldade foi encontrada por nós entre os estudantes, em nosso trabalho, como mostram as respostas que eles deram à questão Q_2 .

resultados do nosso trabalho: As idéias do senso comum apresentam alguma proximidade com a idéia de Clausius como pode ser verificado nas respostas dadas à questão Q₁. Esta constatação pode ser um primeiro passo na elaboração de estratégias que visem uma maior aproximação com o conceito científico de desagregação.

Por outro lado, os aspectos abordados por Clausius com relação às transformações, por serem mais complexos e exigirem a construção, pelo estudante dos modelos de sistema da Termodinâmica implica num conhecimento das barreiras apresentadas para que se possa buscar outras estratégias que induzam ao conflito cognitivo.

A abordagem das leis da Física, por seus aspectos de generalidade requer um processo de ensino-aprendizagem que leve o aluno a compreender que a elaboração de novas suposições científicas é uma tarefa difícil, porém possível. Em geral se parte da idéia de que “as descobertas” dos alunos só serão possíveis em condições de “ciência madura”. Esta deve resultar de condições efetivas que permitam a ocorrência de uma aprendizagem significativa, em que os novos conhecimentos se formem a partir de uma relação com outros que se formaram antes ou que vão se formando quase simultaneamente, levando à superação das pré-concepções. É por esta razão que os professores devem tomar conhecimento do raciocínio dos estudantes

Segundo Coll (1990), a atividade construtivista do aluno realiza-se sobre conteúdos já bastante elaborados e difundidos. O aluno reconstrói na escola conhecimentos que já foram construídos antes. O professor deve estar engajado no processo de construção do conhecimento de seus alunos, não de uma construção qualquer, aleatória, mas daquela aceita pela atual comunidade científica e cultural. Ele deixa de ser o transmissor de conhecimento para assumir o papel de um guia comprometido com um caminho.

Retomando as considerações iniciais feitas neste trabalho a respeito da importância de se ensinar de forma significativa os fenômenos que envolvem processos irreversíveis, podemos neste momento, enfatizar uma vez mais isto com base nos nossos dados ao retornar à resposta:

“Não vejo maneira de ocorrer esse fenômeno!” Uma hipótese que pode haver é a seguinte: junto com a água quente ou a outra água pode-se colocar

uma espécie de corante, ou algo parecido, que demonstre a diferença. Mas acho pouco provável a veracidade deste fato”

A resposta dada pelo estudante revela seu conhecimento; o professor, ao se inteirar deste conhecimento deve criar uma situação de ensino que permita a sua reelaboração numa direção que pode ser semelhante, por exemplo, à expressada por Carnot:

“ O calor pode passar do corpo quente para o corpo frio, mas é impossível fazê-lo retomar o caminho inverso, restabelecendo diferenças de temperatura que desapareceram”.

Este aspecto é interessante porque Carnot, mesmo com a concepção de “calórico” foi capaz de conceber a segunda lei da Termodinâmica.

Quando o estudante recorre ao corante e depois conclui que acha pouco provável que a diferença seja demonstrada, nos lembramos de uma afirmação de Poincaré(2007):

“Se uma gota de vinho cai num copo d’água, qualquer que seja a lei do movimento interno do líquido, logo veremos tingir-se de uma cor rosada uniforme e, a partir desse momento, por mais que agitemos o recipiente, o vinho e a água não parecerão mais poder separar-se. Assim, esse seria o tipo de fenômeno físico irreversível; esconder um grão de cevada num monte de trigo é fácil; encontrá-lo depois e tirá-lo de lá, é praticamente impossível. Maxwell e Boltzmann explicaram tudo isso, mas quem o percebeu com mais clareza, num livro pouco lido porque é um pouco difícil de ler foi Gibbs, em seus princípios de mecânica estatística”.

Um caminho para obtenção de uma mudança conceitual e re-elaboração das concepções do senso comum poderia ser:

- apresentação de questões do tipo Q_1 , Q_2 e Q_3 e fazer o levantamento dos pontos relacionados com os conceitos científicos a serem ensinados, sejam eles próximos ou distantes.
- Com base no levantamento feito anteriormente, criar situações que sirvam como ponte ou levem ao conflito cognitivo.
- Apresentação do conceito científico.

Nosso trabalho mostrou que as ressonâncias encontradas já evidenciam de algum modo que o conceito de desagregação está muito mais próximo dos estudantes, do que a aceitação do ciclo de Carnot. Assim sendo, diferentemente do que ocorre nos livros didáticos, o tratamento da segunda lei poderia ser iniciado estudando de início as situações de desagregação.

Um outro caminho seria comparar os raciocínios de Carnot e Clausius com relação à primeira lei, focalizando a idéia de calórico existente entre os estudantes e no raciocínio de Carnot. Aqui, o ponto central está em encontrar uma maneira de produzir situações em que o estudante rompa com esta concepção para se chegar à idéia de energia. O ponto chave seria a idéia de Transformação introduzida por Clausius, com os elementos: a de calor em trabalho, a de calor de uma temperatura à de outra temperatura e a desagregação. É fundamental, entretanto, como já foi discutido anteriormente, que se procure produzir situações de ensino que possibilitem o acesso, dos alunos, ao modelo de **sistema** e **processo** da Termodinâmica.

É preciso salientar, como observa Cafagne(1991) que o *saber do aluno* e o da Física situam-se em níveis hierárquicos diferentes de pensamento, mas não se distinguem quanto à natureza já que em ambos os casos trata-se de atribuir e aplicar operações à realidade e que, mesmo nos modelos mais elaborados dos sujeitos não se verifica a dissociação da forma e do conteúdo, mas que estas relacionam-se, favorecendo-se uma à outra, à medida que se desenvolvem.

A pesquisa também revelou outro aspecto muito significativo. Mesmo sendo um professor com longa experiência no ensino, enfrentei muitas dificuldades, principalmente na análise e interpretação dos dados. Encontrar as categorias adequadas, as idéias, os modelos e as barreiras, requer um longo tempo de reflexão para que o amadurecimento necessário possa surgir. Além disso, o

processo leva a uma revisão dos conteúdos científicos que se tornam mais reveladores e profundos devido ao grau de imersão no trabalho.

Nesta direção, por fim, cito Bachelard (2005), em *a formação do espírito científico*:

“(...)as forças psíquicas que atuam no conhecimento científico são mais confusas, mais exauridas, mais hesitantes do que se imagina quando consideradas de fora, nos livros em que aguardam pelo leitor. É imensa a distância entre o livro impresso e o livro lido, entre o livro lido e o livro compreendido, assimilado, sabido! Mesmo na mente lúcida, há zonas obscuras, cavernas onde vivem sombras. Mesmo no novo homem, permanecem vestígios do homem velho.(...)ninguém pode arrogar-se o espírito científico enquanto não estiver seguro, a qualquer momento, da vida do pensamento, de reconstruir todo o próprio saber. Só os eixos racionais permitem essa reconstrução.

Finalmente, achamos que toda ação deve ter um objetivo. Devemos sofrer, devemos trabalhar, devemos pagar nosso lugar no espetáculo, mas é para ver; ou ao menos para que um dia os outros vejam. Esperamos, então, que o conteúdo deste trabalho, para que não seja em vão, possa ser repassado aos professores, para, quem sabe, servi-los como subsídios de relevância pedagógica.

Bibliografia

AGUIAR Jr, O.; FILOCRE, J. O planejamento do ensino a partir de um modelo para mudanças cognitivas: um exemplo na física térmica. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**. Florianópolis, V. 19, n.3, p.314-340, 1992.

ALBERT, E. Development of the concept of heat in children. **Science Education**, 62(3): 389-399, 1978.

ALOMÁ, E.; MALAVER, M. Análisis de Los Conceptos de Energia, Calor, Trabajo, y el Teorema de Carnot en Textos universitarios de Termodinámica. **Enseñanza de Las Ciências** , 25(3): 387-400, 2007.

ASTOLFI, J. P. **El “Error”, um médio para ensinar** – Colección Investigación y Enseñanza. Espanha. Diada, 1999.

ASTOLFI, J. P. ; DEVELAY, M. **A Didática das Ciências**. Papirus, Campinas, 1991.

AURANI, K. M. **Ensino de conceitos: estudo das origens da segunda lei da termodinâmica e do conceito de entropia a partir do século XVIII**. 1985. 195f. Dissertação (Mestrado em ensino: modalidade Física) – Instituto de Física e Faculdade de Educação, Universidade de São Paulo, 1985.

BROOK, A. et Al. **Secondary Students’ Ideas About Particles**. Project, Centre for studies in Science and Mathematic Education, University of Leeds, 1983.

CAFAGNE, A. **Concepções alternativas em termodinâmica: a atribuição de causalidade**. São Paulo. Dissertação de mestrado. Instituto de Física/ Faculdade de Educação da USP, 1991.

CAFAGNE, A. **Concepções em termodinâmica: o senso comum e o conhecimento científico**. São Paulo. Tese para obtenção do título de doutor em didática. Faculdade de Educação, USP, 1996.

CALLEN, H. B. **Thermodynamics**. New York, London, Sidney. Ed. John Wiley and Sons, Inc., 2005.

CARVALHO ET AL *Ciências no ensino fundamental: o conhecimento físico*. São Paulo. Editora Scipione, 2005.

CARVALHO, A. P. C.; CAPPECHI, M. C. V. M. **Es posible introducir a los alumnos al universo de las ciencias ? Cambio conceptual y representacional em El aprendizaje y La enseñanza de La ciência**, cap.16. 265-285. Espanha. Machado Libros, 2008.

CLOUGH, E. E.; DRIVER, R. **Secondary students' conceptions of the conduction of heat: bringing together scientific and personal views**. *Physics Education*, 20(4): 176-182, 1985.

COLL, CÉSAR – **Psicologia e Currículo – Uma aproximação psicopedagógica à elaboração do currículo escolar**. São Paulo.Ática, 1987.

DRAGO, A. Machh's Thesis. *Thermodynamics as the Basic Theory for Physics Teaching*. **Science & Education** 3; 189-198, 1994.

DRIVER et al **Constructing Scientific Knowledge in the Classroom**.*Educational Reseach*. 23(7): 5-12, 1994.

ERICKSON, G. L. **Children's conceptions of heat and temperature**. *Science Education*, 63, 221-230, 1979.

FOUREZ, G. **Crise no ensino de ciências? Investigação em ensino de ciências** – ISSN 1518-8795, 2004.

GIBERT, A. **Origens Históricas da Física Moderna**. Lisboa, Fundação Calouste Gulbenkian, 1962.

INHELDER, B. PIAGET, J. P. **Da Lógica da Criança à Lógica do Adolescente**. São Paulo, Pioneira, 1976.

KHUN, T. S. **A estrutura das revoluções científicas**. São Paulo, Perspectiva, 1975.

LEMKE, J. L. Investigar para el futuro de la educación científica: nuevas formas de aprender, nuevas formas de vivir. **Ensenanza de las Ciências**. 24(1), p.5-12, 2006.

LEMKE, J. L. **Ensenar todos los lenguajes de la ciencia: palabras, símbolos, imágenes, y acciones**. In M. Benlloch (ed.), *La educación en ciencias*. Barcelona: Paidós. pp. 159-186. 2002.

LUDKE, M.; ANDRÉ, M. E. D. A. **Pesquisa em Educação: abordagens qualitativas**. São Paulo, EPU, 2007.

MACEDO, L. **Ensaio construtivistas**. São Paulo, Editora Casa do Psicólogo, 1994.

MENEZES, L. C. **A matéria: uma aventura do espírito**. São Paulo, Editora Livraria da Física, 2005.

OLIVEIRA, C. M. A.; CARVALHO, A. M. P. **O Conhecimento Físico e a Linguagem**. XV Simpósio Nacional de Ensino de Física. Curitiba. v. 1. p. 2680-2688, 2003.

PACCA, J. L. A. Anotações de aula da disciplina Construtivismo e aprendizagem significativa, 2006.

PACCA, J. L. A.; HENRIQUE, K. F. **Dificultades y estrategias para La enseñanza Del concepto de energia. Enseñanza de las Ciencias.** 22(1): 159-166, 2004.

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

PIAGET, J.; POSTEL, L. A. **Construccion y Validacion de las teorías Cientificas.** Paidós, Argentina, 1986.

POINCARÉ, H. **O Valor da Ciência.** Contraponto, Rio de Janeiro, 2007.

ROTH, W. M. & LAWLESS, D. **Science, Culture, and the Emergence of Language.** Science education, vol. 86, Issue 3, pp.368-385,2002.

ROTH, W. M. **Competent Workplace Mathematics: How Signs Become Transparent.** International Journal of Computers for Mathematical Learning, vol.8,N2, 2003.

ROZIER, S.; VIENNOT, L. Students' reasonings in thermodynamics. International. **Journal in Science Education**, 13(2): 159-170, 1991.

SHAYER, M.; WYLAM, H. The development of the concepts of heat and temperature in 10-13 years-old. **Journal of Research in Science Teaching**, 19(5): 419-434. (1981).

SILVEIRA, F. L. et al. **Um teste sobre calor, temperatura e energia interna.** Comunicação apresentada no IX Simpósio Nacional de Ensino de Física. São Carlos, 1991.

TIBERGHIE, A. The Development of ideas with teaching. **Children's Ideas in Science.** Milton Keynes, Open University Press, 1985.

TIBERGHIEU, A.; DELACOTE G., Resultats preliminaires sur la conception de la chaleur. **Physics Teaching in School**, London, Taylor & Francis, G., 1979.

VIENNOT, L. Spontaneous reasoning in elementary dynamics. **European Journal Science Education**, 1(2): p.205-221, 1979.

VIENNOT, L.; CHAUVET, F. Two Dimensions to Characterize research-based teaching strategies: examples in elementary optics. **International Journal Science Education**, 1997.

VILLANI, A.; PACCA J. L. A. Construtivismo, conhecimento científico e habilidade didática no ensino de ciências. **Revista da Faculdade de Educação**. Vol. 23 n. 1-2, 1997.

Anexo

As páginas a seguir mostram os Modelo das folhas dadas aos alunos com as questões Q₁, Q₂ e Q₃ e os espaços correspondentes para que eles colocassem as respostas.

NOME _____

Série _____

Questão 1

Uma panela com água foi colocada sobre uma chama que após algum tempo foi apagada. O volume de água inicialmente existente na panela diminuiu. É possível, que de forma espontânea, o volume original de água volte a existir?

Questão 2

Temos duas canecas com água até a metade; numa delas a temperatura da água é de 10°C e na outra é de 30°C . As quantidades de água são misturadas numa das canecas e a temperatura da mistura fica num valor intermediário. Como fazer para que os líquidos voltem a ficar separados e com as mesmas temperaturas iniciais?

NOME _____

Série _____

Questão 3

Em uma compressão adiabática de um gás perfeito, a pressão e a temperatura aumentam. Pensando no gás s como algo formado por partículas, explique porque isso ocorre.