



**COBENGE 2005**

**XXXIII - Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia**

"Promovendo e valorizando a engenharia em um cenário de constantes mudanças"

12 a 15 de setembro - Campina Grande Pb

Promoção/Organização: ABENGE/UFPG-UFPE

## **ESTRATÉGIAS DE ENSINO DE RADIAÇÃO TÉRMICA PAUTADAS NA TEORIA DA MUDANÇA CONCEITUAL**

**Míriam Tvrzská de Gouvêa** – miriamtg\_br@yahoo.com

Universidade Presbiteriana Mackenzie

Departamento de Engenharia de Materiais

R. da Consolação, 896, prédio 06

CEP 01302-907 - São Paulo- SP

**Esleide Lopes Casella** – ecasella@uol.com.br

**José Plácido** – j\_placido2003@yahoo.com.br

**Regina Maria Matos Jorge** - rjorge@ufpr.br

Universidade Federal do Paraná

Departamento de Engenharia Química

Centro Politécnico - Jardim das Américas

CEP 81531-990- Curitiba – PR

**Resumo:** Neste trabalho são apresentadas algumas propostas de práticas docentes para o ensino da radiação térmica na graduação, as quais promovem uma aprendizagem significativa e participativa do estudante de engenharia. Discute-se a importância de conhecimentos prévios dos alunos e a correção de suas concepções errôneas em relação ao conhecimento científico. Ressalta-se também a necessidade de criação de um conflito conceitual, de forma a destacar que conhecimentos prévios referentes à condução e convecção não são suficientes para explicar todos os processos de transferência de calor. As estratégias propostas são baseadas em questionamentos feitos aos alunos e na observação de experimentos. Adicionalmente, recomenda-se que os alunos realizem um experimento em que o mecanismo da radiação seja modelado conjuntamente com o mecanismo de convecção. Deste modo, espera-se que os alunos, a partir da análise comparada dos resultados da simulação do modelo proposto por eles com os dados experimentais, possam se aperceber da importância da etapa de levantamento de hipóteses e dos empecilhos reais a uma modelagem rigorosa. Os experimentos realizados na Universidade Presbiteriana Mackenzie e na Universidade Federal do Paraná são apresentados.

**Palavras-chaves:** Radiação térmica, Mudança Conceitual, Fenômenos de Transporte, Construtivismo, Experiências de radiação

## **1. INTRODUÇÃO**

A rapidez no progresso tecnológico e científico demanda a formação de engenheiros críticos com sólida acomodação de inúmeros conceitos científicos. Mais ainda, devem os engenheiros ser capazes de se exprimirem na forma oral e escrita. Estas exigências de formação apresentam-se claras no artigo 4 da resolução do MEC CNE/CES11, segundo o qual o engenheiro ao sair da faculdade deve ter adquirido as atribuições de saber: aplicar conhecimentos matemáticos, científicos, tecnológicos e instrumentais à engenharia; projetar e conduzir experimentos e interpretar resultados; identificar, formular e resolver problemas de engenharia; desenvolver e/ou utilizar novas ferramentas e técnicas; comunicar-se eficientemente nas formas escrita, oral e gráfica.

Ao mesmo tempo em que há a necessidade de se ter engenheiros capazes para promover o desenvolvimento tecnológico, a procura pelos cursos de engenharia apresenta uma queda significativa e inúmeros são os alunos que adentram a universidade com deficiências conceituais. Assim, o desafio docente em promover a adequada capacitação do estudante de engenharia em termos do artigo 4 da resolução do MEC CNE/CES11 é grande e tanto maior quanto mais abstrato e mais afastado do senso comum for o conteúdo programático a ser aprendido pelo estudante de engenharia. Este é o caso da aprendizagem da radiação térmica. Embora o emprego do termo radiação esteja presente no cotidiano moderno, a concepção científica de radiação não faz parte do conhecimento do senso comum e grandes são as dificuldades dos alunos em adequadamente entender e modelar o fenômeno da radiação.

Neste trabalho, analisamos algumas práticas docentes que facilitam a aprendizagem significativa da radiação por parte dos estudantes. A exposição enfoca tanto estratégias de discussão dos fundamentos e conceitos da radiação nas aulas teóricas, como experimentos que visam à análise qualitativa e quantitativa do fenômeno da radiação. As estratégias propostas para as aulas teóricas baseiam-se em primeiro lugar auferir os conhecimentos prévios dos alunos, tornando-os conscientes dos mesmos. Situações são criadas em que os alunos não são capazes de usar apenas os seus conhecimentos prévios para explicar e quantificar um dado fenômeno. Concepções indevidas são corrigidas e novos conceitos científicos são introduzidos. A partir da apresentação de um novo modelo de pensamento científico, propõe-se ao aluno uma atividade de laboratório, em que o aluno é convidado a modelar o fenômeno físico e interpretar os resultados obtidos da simulação do modelo face aos resultados experimentais. A fundamentação da proposta realizada é pautada nas Teorias do Construtivismo (COLL ET AL., 1996) e da Mudança Conceitual (POSNER ET AL., 1982), as quais são brevemente comentadas no item 2 e contrapostas ao Paradigma da Transmissão de Conhecimentos. A apresentação das práticas docentes é feita nos itens 3 a 5, sendo que nestes itens, respectivamente, são discutidas atividades realizadas em sala de aula e no laboratório. No item 6 o artigo é concluído.

## **2. TEORIAS DE PROCESSOS DE ENSINO-APRENDIZAGEM**

A teoria pedagógica ainda predominante nos cursos de Engenharia está vinculada à Pedagogia Tradicional, também denominada de Modelo de Transmissão de Conhecimento, em que prevalece a aula expositiva, ainda que apoiada em recursos da informática como “data show”, vídeos, entre outros. Há o predomínio da aula expositiva como forma para disseminar informações associando-se esta à postura passiva dos alunos frente às indagações do conhecimento de forma a serem privilegiadas a memorização, a repetição e procedimentos de resolução de problemas (TYNJÄLÄ, 1999). O processo de avaliação tipicamente usado dificilmente consegue captar o real entendimento do aluno e suas mudanças conceituais, uma vez que prevalece a avaliação sobre o acúmulo de informações que o estudante possa

reproduzir, implicando em uma aprendizagem superficial. O Construtivismo, ao contrário, consiste num processo contínuo de construção de conhecimentos tendo como estratégia de ensino as concepções pré-existentes dos alunos (COLL ET AL., 1996). O foco da aprendizagem está direcionado ao processo de entendimento ao invés da simples memorização e reprodução de informação. A grande meta consiste na substituição do enfoque superficial em relação à aprendizagem para o enfoque significativo, de forma a permitir que ocorram mudanças conceituais qualitativas no conhecimento dos alunos. Isto não significa que as aulas expositivas devem ser excluídas do programa de ensino, mas que os alunos sejam capazes de aprender através do questionamento de conceitos e de conflitos que são desenvolvidos em atividades e projetos coordenados por professores. Verifica-se que com o envolvimento dos alunos, as atividades desenvolvidas em classe tornam-se mais efetivas, especialmente se houver engajamento do professor e destaque para a reflexão de conceitos (WAKS & SABAG, 1994).

Pela proposta da Teoria da Mudança Conceitual de POSNER ET AL. (1982) um novo conceito passa a ser mais facilmente compreendido quando a necessidade de sua construção surgiu pelo conflito de um conhecimento prévio com uma realidade concreta, normalmente relacionada às experiências do senso comum. Educadores devem procurar entender conceitos simplistas dos estudantes e trabalhar em conjunto para que estes últimos consigam acomodar conceitos científicos.

### **3. ESTRATÉGIAS DE ENSINO DA RADIAÇÃO EM AULAS TEÓRICAS**

A definição acadêmica de radiação não é facilmente digerida, sobretudo em suas particularidades de modelagem. Aparece em livros universitários de forma mais sucinta ou pormenorizada como por exemplo na proposta de VAN HEUVEN ET AL. (1999, p. 230): “Radiação térmica são ondas eletromagnéticas ( $0.1 < \lambda < 100 \mu\text{m}$ ) irradiadas por um corpo devido à agitação térmica de seus constituintes moleculares. Entre duas superfícies haverá transporte de energia por radiação se o espaço entre estas superfícies for diatérmico para todo ou parte do espectro eletromagnético. Haverá, então, transporte de calor em ambas as direções se as temperaturas entre as superfícies forem diferentes e a taxa resultante de transferência de calor será a diferença entre estas taxas.” A definição apresentada justifica o equacionamento da radiação, tanto em termos das equações constitutivas como a forma com que estas são introduzidas num balanço de energia. Ainda, a definição apresentada contém uma proposta de significação física. Assim, trata-se de uma ótima síntese e uma estratégia de ensino poderia simplesmente requerer que o aluno por si só buscasse entender os seus pormenores. Mas, é justamente neste ponto que surge o problema, particularmente se o aluno em mente é um aluno de graduação, ainda não habituado a uma extensa pesquisa bibliográfica. Por exemplo, recorrendo à excelente obra de BIRD ET AL. (2004), o aluno encontrará à página 465: “a teoria eletromagnética é necessária para a descrição da natureza essencialmente oscilatória da radiação, em particular, a energia e pressão associadas às ondas eletromagnéticas; a termodinâmica é necessária para a determinação de algumas relações entre as propriedades globais de um recipiente contendo radiação; a mecânica quântica é necessária para a descrição em detalhes dos processos atômicos e moleculares que ocorrem quando a radiação é produzida dentro da matéria e quando é absorvida pela matéria; e a mecânica estatística é necessária para a descrição do modo de distribuição da radiação pelo espectro de comprimento de onda”. A síntese à preleção de BIRD ET AL. (2004) pode ser encontrada em outro excelente livro como: “O mecanismo físico da radiação ainda *não foi totalmente esclarecido*. Algumas vezes, a energia radiante é tratada como se fosse transportada por ondas eletromagnéticas; outras vezes como se fosse transportada por fótons.” (KREITH & BOHN, 2003, p. 481). Em síntese, transfere-se a dificuldade em se entender a radiação para o domínio

dos físicos. E que o aluno não se aventure a procurar em um livro de física de graduação a resposta a suas dúvidas, pois poderá encontrar no que se refere aos conceitos fundamentais algo como “*supomos que o leitor já tenha algum conhecimento dos fenômenos elementares*” (PURCELL, 1973, p. 4). Desta forma, acreditamos que seja necessária a intervenção do docente para deixar explícitas as dificuldades em se entender a radiação e a de discutir claramente o estado da arte da modelagem da radiação segundo o atual paradigma científico. Para tanto, observamos, ao longo da nossa prática docente, que a maneira mais eficaz de introduzir a radiação é através de um questionário a ser respondido e discutido em sala de aula. Esta metodologia já foi aplicada na disciplina de Fenômenos de Transporte II em três turmas do curso de engenharia de materiais e em quatro turmas do curso de engenharia elétrica da Universidade Presbiteriana Mackenzie. As questões fornecidas impressas aos alunos são:

1. É possível se queimar tomando banho de sol?
2. Qual a temperatura do ar na praia?
3. Quem é responsável pelo aquecimento da pele que pode levar à sua queima?
4. O sol emite energia? Justifique.
5. Estima-se que a temperatura do espaço seja da ordem de 4K. Existe matéria no espaço?
6. Qual a distância entre o sol e a terra?
7. Quem recebe a energia solar? Com a mesma intensidade?
8. É comum o uso de lareiras, resistências elétricas ou de aquecedores a carvão para aquecer residências em dias de inverno. Estes três sistemas têm em comum o fato de a lenha, o carvão e o metal sofrerem alteração de cor no momento da ativação do sistema de aquecimento. O carvão, a lenha e o metal tornam-se vermelhos. Por quê?
9. A partir das questões anteriores, quais as principais características da radiação térmica?
10. Analise as definições de radiação apresentadas nos livros textos.

A questão de número 1 pode parecer muito trivial, mas é significativo o número de alunos que não tem consciência de que é o sol e não o ar atmosférico que provoca as severas queimaduras nos banhistas. Assim, além de chamar a atenção do aluno a como observar os fenômenos (basta perguntar aos alunos porque ninguém se queima à noite...), pode-se avaliar através desta pergunta quantos alunos apresentam severas deficiências conceituais, alunos estes provenientes de um Ensino Médio de qualidade científica discutível. A segunda questão visa a distinguir o assunto que será iniciado com uma análise anteriormente vista sobre a convecção. O objetivo é fazer com que o aluno não passe a justificar os fenômenos de troca térmica apenas usando-se os mecanismos de condução e convecção. Para tanto, pedimos que o aluno se recorde de um exercício feito anteriormente em que ele deveria calcular a temperatura da água de uma piscina e do ar atmosférico em um dia sem vento que provocariam a queima da pele. Os alunos neste ponto começam a ficar incomodados porque nitidamente percebem que é necessária a existência de um terceiro mecanismo de transferência de calor. Isto é tornado claro na discussão da terceira questão. Embora os alunos entendam que é o sol o responsável pelas queimaduras, muitos discutem porque não seria também a areia da praia. Mas após algum tempo, todos entendem que é necessário explicar como a energia é transportada do Sol à Terra e que eles ainda não estão aptos a fazê-lo. É o que os alunos são levados a concluir quando tentam responder à questão 4. Assim, eles passam a ser convidados de uma forma sutil, mas extremamente eficaz, a apreciar as atuais propostas científicas. As questões 5 a 7 visam à aceitação de que não existe a necessidade de matéria para o transporte de radiação e que apesar da elevada distância entre a Terra e o Sol, parte da energia emitida pelo sol é absorvida pela Terra. A questão da relação das áreas superficiais da Terra e Sol que participam desta transferência de energia é abordada e assim

pode-se introduzir o conceito de fator de vista ou de forma da radiação. A questão 8 visa a chamar a atenção do aluno para o fato de que associada à emissão da radiação pode haver transições eletrônicas o que faz pensar que a radiação térmica pode ser explicada em termos de fenômenos que ocorrem na eletrosfera atômica. E desta forma conclui-se que para se entender a capacidade de emissão de corpos é necessário analisar o que ocorre internamente na matéria. Na questão 9, os alunos são convidados a escrever uma síntese da discussão realizada e então passamos à análise das definições acadêmicas de radiação. O ponto a ser discutido em seguida com os alunos é a questão da modelagem de radiação através do conceito de ondas eletromagnéticas. Para tanto, iniciamos a discussão apresentando as causas conhecidas para a emissão de radiação térmica, a saber, as transições eletrônicas, os movimentos de vibração e rotação molecular (BIRD ET AL., 2004). Fica claro para o aluno que a cada um destes efeitos corresponde uma quantidade de energia diferente e que simultaneamente diversos efeitos podem ocorrer. Associamos a cada um destes efeitos um determinado valor de energia  $E(\lambda)$  que por definição estará associado a um número, denominado, inicialmente e provocativamente, de comprimento de onda  $\lambda$ . Assim, a emissão total ( $E_{tot}^e$ ) poderá ser equacionada como:

$$E_{tot}^e = \int_0^{\infty} E(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

Assim, a discussão em seguida é focada na caracterização de  $E(\lambda)$ . A primeira preocupação é de atribuir um significado ao caráter ondulatório associado à definição das ondas eletromagnéticas, qual seja, “uma onda eletromagnética é constituída pela propagação de um campo elétrico e de um campo magnético, oscilantes no tempo” (MIRADOR, 1976). A questão da natureza oscilatória pode ser interpretada em termos dos fenômenos que ocorrem na estrutura da matéria. Quando transições eletrônicas ocorrerem, um elétron emitirá uma certa quantidade de energia e esta emissão ocorrerá num tempo característico. Similarmente, ao receber energia, um elétron qualquer poderá passar a um estado mais energético e depois voltar a um estado de menor energia. Estes fenômenos tornam-se cíclicos e a cada tipo de efeito estará associado um período em que a energia passará do valor máximo para o mínimo. O inverso deste período caracterizará a frequência de propagação da energia ( $\nu$ ) e sabe-se do atual paradigma científico que as ondas eletromagnéticas propagam-se no vácuo na velocidade da luz ( $c$ ) de forma que fica atribuído um significado ao comprimento de onda como na equação  $c = \lambda \nu$ .

Comentam-se os desenvolvimentos de Planck com mais ou menos pormenores dependendo da carga horária disponível e apresenta-se a proposta de modelagem de Planck para o máximo fluxo de energia ( $E''(\lambda)$ ) que pode ser emitido por um corpo para cada comprimento de onda, como na equação (2), a qual integrada na equação (1) fornece a equação (3) com a definição da constante de Stefan-Boltzmann como na equação (4). Ressaltamos que, na exposição das equações neste trabalho, não estamos preocupados em descrever como as equações ora apresentadas surgiram cronologicamente. A ênfase que queremos dar é no fato de existir um significado físico para as equações que descrevem a radiação térmica e que a forma das equações tem uma razão científica.

$$E''(\lambda) = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5} \frac{1}{e^{ch/\lambda\kappa T} - 1} \quad (2)$$

sendo,  $h$  a constante de Planck e  $\kappa$  uma constante da radiação advinda da Mecânica Estatística.

$$E_{tot}'' = \sigma T^4 \quad (3)$$

sendo,  $E_{tot}''$  o fluxo de energia que pode ser emitido por um corpo negro à temperatura  $T$ .

$$\sigma = \frac{2}{15} \frac{\pi^5 k^4}{c^2 h^3} \quad (4)$$

Apresentada a equação (4), fica aberta a discussão para a metodologia de modelagem da emissão enquanto fenômeno de superfície, ou nas palavras de INCROPERA & DE WITT (2003, p. 496) “na maioria dos sólidos e líquidos, a radiação emitida das moléculas internas é fortemente absorvida pelas moléculas adjacentes. Assim sendo, a radiação que é emitida de um sólido ou um líquido se origina das moléculas que se encontram a uma distância não superior a  $1\mu\text{m}$  da superfície exposta. É por esta razão que a emissão de um sólido ou um líquido no interior de um gás adjacente ou do vácuo é vista como um fenômeno de superfície”. Não entraremos neste momento em mais discussões sobre as análises realizadas em sala de aula, uma vez que a partir do momento em que a apresentação da metodologia de modelagem é iniciada, tem-se uma apresentação expositiva dos atuais paradigmas científicos, exposição, esta, sempre feita de forma crítica e inquisitiva. A ênfase pretendida, a ser ressaltada, é na forma de introdução destes assuntos de modo a tornar significativa a exposição dos conceitos científicos aos alunos, de fazê-los partícipes do processo de ensino-aprendizagem e de criar neles situações de conflito de modo que eles estejam disponíveis à nova aprendizagem. Ainda que a apresentação da metodologia de modelagem seja feita de forma significativa e que os alunos entendam que devem localizar todas as fontes emissoras de radiação para poder caracterizar sobre um volume de controle as radiações absorvidas e a radiação emitida, a aplicação destes conceitos em problemas concretos não é uma tarefa trivial para os alunos. Neste ponto, além da realização de exercícios, a realização de experimentos é de suma importância, como salientaremos no item 5.

#### **4. USO DE EXPERIMENTOS EM SALA DE AULA PARA O DESENVOLVIMENTO DO SIGNIFICADO TEÓRICO**

Uma abordagem complementar ao questionamento de aspectos teóricos para a criação do conflito conceitual, necessário para a acomodação dos conceitos de radiação pode ser a observação de experimentos simples a serem realizados em sala de aula. Um experimento bastante interessante é a utilização de um radiômetro. Este último vem sendo utilizado nas aulas teóricas da disciplina de Fenômenos de Transporte II do curso de engenharia química da Universidade Federal do Paraná.

O radiômetro utilizado está ilustrado na Figura 1. O primeiro radiômetro foi desenvolvido por William Crookes na metade do século dezenove. O radiômetro é um dispositivo cujo formato externo é semelhante a um bulbo de vidro de uma lâmpada incandescente contendo no seu interior um objeto semelhante a um cata-vento, cujas superfícies planas, aqui denominadas por “placas”, são distribuídas em um círculo e fixadas a um aro de anel metálico disposto sobre uma cápsula de vidro alocada sobre uma haste similar a uma agulha de costura, com a extremidade superior extremamente fina a fim de reduzir ao máximo o atrito entre as partes móvel e fixa do equipamento.



Figura 1: fotografia de um radiômetro

A atmosfera no interior do radiômetro é quase um vácuo perfeito. Mais de 99% das moléculas constituintes do ar foram retiradas, restando apenas alguns milhões de moléculas no interior do radiômetro comparado com os trilhões de moléculas presentes na atmosfera externa. A densidade menor no interior do radiômetro permite que as moléculas no interior do radiômetro sejam capazes de se mover mais livremente. Os lados opostos de cada placa do cata-vento são alternadamente pintados com tinta negra e tinta branca. À medida que a luz incide sobre as superfícies pintadas, lembrando aqui que o vidro é um meio opaco à radiação na faixa do infra-vermelho (ÖZISIK, 1990) sendo esta a causa do efeito estufa num espaço fechado por vidro, o lado claro reflete a radiação incidente enquanto que o lado escuro a absorve. À medida que o lado escuro absorve a energia radiante, é criada uma diferença de temperatura entre as placas. Na superfície das placas negras ocorre a formação de correntes convectivas devido à diferença de temperatura local entre a superfície aquecida e o ar nas vizinhanças da superfície. As moléculas de ar se aquecem ao colidir, e se afastam da superfície negra com uma quantidade de energia superior. Ao se afastarem da superfície negra elas formam correntes convectivas e ocorre uma transferência de momento causando o giro do cata-vento, sempre originado com o deslocamento da superfície negra.

Se a fonte de energia for substituída por uma fonte de potência superior, uma maior quantidade de energia radiante será absorvida, e as moléculas de ar irão se afastar mais rapidamente causando uma velocidade de giro maior, o que implica numa transformação da energia radiante em energia mecânica e energia térmica.

O radiômetro foi desenvolvido para medir qualitativamente a intensidade de energia radiante. A utilização do radiômetro auxilia no entendimento dos princípios da transformação da energia, mostrando ainda que a energia mecânica e térmica são produtos da conversão de energia radiante absorvida.

No contexto de uma aula teórica de transferência de calor por radiação, o radiômetro foi utilizado, permitindo a visualização da absorção seletiva da energia radiante por superfícies negras e brancas, com a posterior transformação desta em energia térmica tendo como consequência o aquecimento das superfícies negras. Na sequência ocorre a transferência de energia por convecção em um meio rarefeito e a subsequente transformação desta energia em outras formas de energia.

A atividade em sala de aula consiste num experimento em regime transiente contemplando as seguintes etapas:

- A partir de um estado de completo repouso o radiômetro é exposto a uma fonte luminosa, para este fim direciona-se um feixe de luz gerado por um retro-projetor sobre uma das faces do radiômetro. Admitindo-se como hipótese que para fins de engenharia o ar atmosférico é considerado transparente à radiação, é solicitado aos alunos que observem o comportamento do sistema e respondam às seguintes questões:
- 1) Descreva o fenômeno observado;
- 2) Quantos e quais são os mecanismos de transferência de calor observados?
- 3) Como você explica o fenômeno observado considerando a conservação da energia?
- 4) Quais são as formas de energia envolvidas?

A princípio os alunos têm uma certa dificuldade em identificar a causa do movimento das pás. Durante os primeiros momentos de observação os alunos acreditam que o cata-vento girava em virtude da incidência da luz sobre as pás. Este fenômeno seria possível e estaria relacionado ao comportamento dual da radiação, hipótese que seria razoável caso o atrito entre a parte móvel (cata-vento) e a haste fixa fosse desprezível e ainda se a atmosfera interior fosse vácuo absoluto. Caso esta fosse a situação experimentada o sentido de giro seria o oposto ao identificado no experimento, onde se observou que a superfície negra sempre se afasta da sua posição inicial. Após serem feitos estes esclarecimentos, os alunos compreendem o processo de aquecimento da superfície negra e as causas do movimento do cata-vento. Também são identificadas as formas de energia envolvidas, que são: após uma pequena fração da energia radiante incidente ser absorvida pelo bulbo de vidro, a energia incide sobre as superfícies das placas brancas e negras. A energia incidente na superfície das placas brancas é refletida, re-incidindo sobre a superfície de vidro do bulbo, onde parte desta é refletida novamente para o interior do radiômetro e uma fração é difratada escapando para fora do radiômetro. Já a radiação incidente sobre a superfície negra, é absorvida provocando um aumento da temperatura na superfície. O fato da superfície apresentar uma temperatura superior à das moléculas de ar proporciona o surgimento de correntes convectivas, havendo uma transferência de momento para a superfície negra, provocando o deslocamento da estrutura do cata-vento. O movimento da estrutura do cata-vento evidencia inicialmente a transformação da energia radiante em energia térmica, e posteriormente grande parte desta energia é transformada em energia cinética. Para permitir comparar a potência da fonte de energia radiante do retro-projetor, o radiômetro é exposto quando possível à radiação solar. Os alunos podem observar o instantâneo aumento na velocidade de giro do cata-vento, ficando surpresos com a diferença das duas potências.

A principal conclusão apresentada pelos alunos, além dos objetivos inicialmente pretendidos com a atividade, é a constatação de que a energia radiante tem um grande potencial para ser aplicada a outras finalidades além daquelas tradicionalmente exploradas em nosso país, como por exemplo a aplicação da energia radiante solar no aquecimento de água para fins domésticos.

## **5. USO DE EXPERIMENTOS PARA A ACOMODAÇÃO DO PROCEDIMENTO DE MODELAGEM DA RADIAÇÃO**

Uma das tarefas mais árduas nos dias de hoje é ensinar os alunos a descreverem os fenômenos da natureza por meio de equações. Além da dificuldade intrínseca à abstração matemática necessária para a confecção de um modelo, está o fato de que, na elaboração de um modelo matemático, hipóteses devem ser postuladas e no início de sua aprendizagem da arte da engenharia o aluno se sente frustrado em não poder descrever os fenômenos em sua totalidade. Assim, a realização de um experimento que dever ser descrito quantitativamente é fundamental para que o aluno perceba que é muitas vezes impossível descrever rigorosamente

um fenômeno, até por falta de medidas experimentais e que apesar disso, é possível a postulação de um modelo matemático que explique os principais fenômenos envolvidos. Neste item, descrevemos um experimento de laboratório, conduzido pelos alunos da disciplina de Fenômenos de Transporte II dos cursos de engenharia civil, elétrica e de materiais da Universidade Presbiteriana Mackenzie.

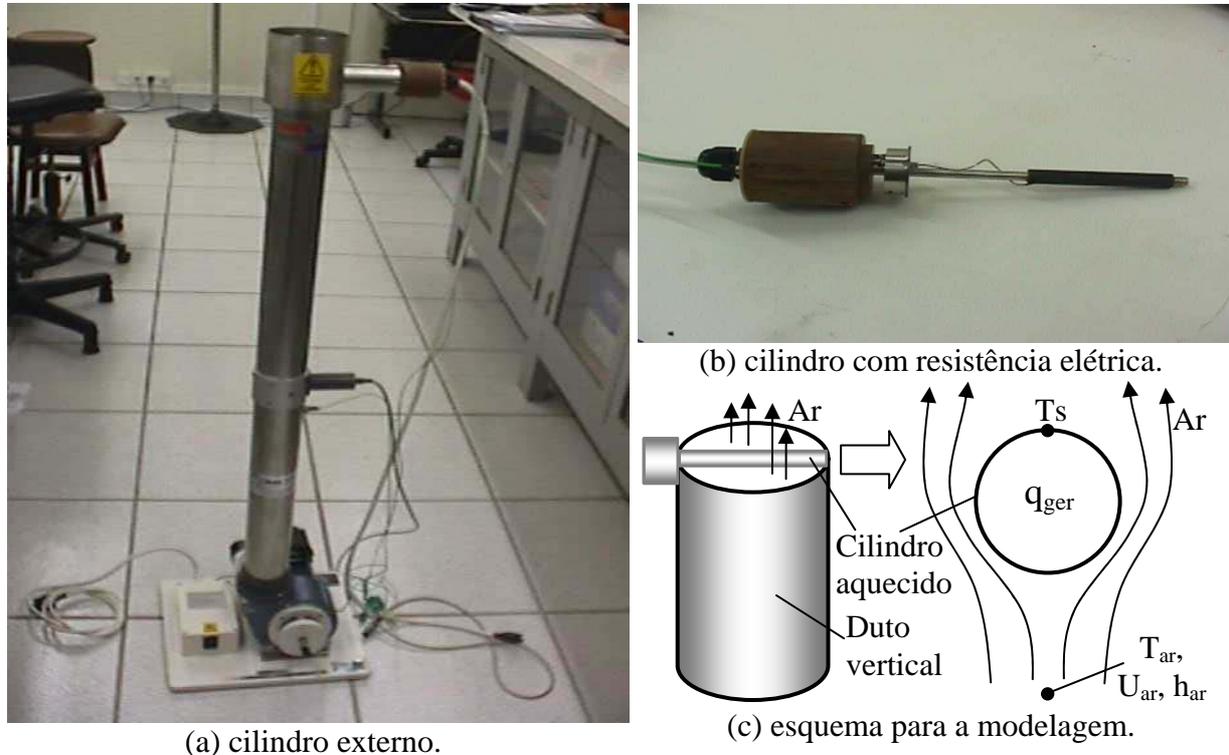


Figura 2: equipamento da Armfield para a realização de um experimento envolvendo a radiação e convecção.

A Figura 2(a) mostra uma foto do aparato experimental existente no laboratório de Fenômenos de Transporte da Universidade Presbiteriana Mackenzie, o qual consiste, basicamente, em um duto cilíndrico vertical que permite a passagem de ar sobre um pequeno cilindro aquecido horizontal situado próximo ao topo desse duto. Na Figura 2(b) esse cilindro aquecido é mostrado em detalhe, sendo que apenas uma fração da parte cilíndrica enegrecida fica diretamente exposta ao ar ascendente do duto vertical. O restante fica projetado para o interior de um cilindro horizontal externo ao duto, o qual pode ser visto no topo da Figura 2(a) juntamente com um volante cilíndrico de madeira. Este volante permite girar o cilindro aquecido de modo que é possível medir a temperatura  $T_s$  de sua superfície externa em diferentes posições angulares. Um soprador existente na base do duto vertical proporciona a circulação de ar quando se deseja realizar estudos de transferência de calor por convecção forçada e por radiação. Um parafuso estrangulador acoplado a esse soprador permite o ajuste da velocidade do ar enviado ao cilindro aquecido. Essa velocidade é lida por meio de um anemômetro posicionado à meia altura do duto vertical.

O aquecimento do cilindro é feito por meio da dissipação de energia em uma resistência elétrica situada em seu interior. Um sistema de aquisição de dados coleta medidas da temperatura  $T_s$ , da temperatura do ar  $T_{ar}$  após a descarga do soprador de ar; da velocidade  $U_a$  do ar no duto vertical; da tensão elétrica  $V$  aplicada à resistência elétrica existente no cilindro aquecido e da respectiva corrente elétrica  $I$  circulante através dessa resistência. O conhecimento destes dois últimos valores permite avaliar a potência gerada  $q_{ger}$  no interior do

cilindro aquecido. Durante a experiência seleciona-se a tensão elétrica a ser aplicada, e a vazão de ar que circulará sobre o cilindro aquecido. Para o estudo da convecção natural o soprador de ar é mantido desligado com o parafuso estrangulador em sua abertura máxima. Dependendo das condições operacionais a temperatura  $T_s$  pode chegar a cerca de 500°C. Todas as emdidas são registrados para análise posterior.

As dificuldades de modelagem, encarregada aos alunos, surgem a partir do momento em que um sistema físico real deve ser representado por um esquema idealizado, como, por exemplo, o mostrado na Figura 2(c), em que na falta de outras medidas é sugestiva uma hipótese de assumir a temperatura da vizinhança idêntica à do ar abaixo do cilindro aquecido. Ainda, sugere-se que o cilindro seja totalmente enxergado pela vizinhança, assumida como sendo uma só. Tais idealizações são parte integrante do modelo que será adotado para a representação da realidade fenomenológica, e serve como suporte para a elaboração da discussão das hipóteses restritivas aplicáveis. O modelo típico confeccionado pelos alunos é mostrado na equação (5), sendo que os alunos assumem a vizinhança como sendo um corpo negro. Alguns alunos assumem que o cilindro seja um corpo cinza, outros procuram na literatura por dados de absorvidade. Uma outra discussão freqüente é com relação à temperatura da vizinhança. Nem todos os alunos aceitam que a temperatura da vizinhança ( $T_{vz}$ ) seja tomada idêntica à temperatura do ar abaixo do cilindro. Alguns alunos tentam estimar a temperatura da parede do duto cilíndrico e tomam a temperatura da vizinhança como uma média dos valores de  $T_{ar}$ , da temperatura estimada para a parede do duto cilíndrico e da temperatura ambiente do laboratório. Outros alunos tentam estimar a perda de calor pela superfície do duto acoplado ao duto cilíndrico e para tanto estimam a temperatura desta superfície. O cálculo do coeficiente de película para as situações de convecção natural ou forçada é obtido de correlações para as quais os alunos devem ainda estimar as propriedades do ar adjacente ao cilindro aquecido.

$$q_{dis} = A_{cil} \left( h(T_s - T_{ar}) + \varepsilon_s \sigma T_s^4 - \alpha_s \sigma T_{vz}^4 \right) \quad (5)$$

Com relação à execução da experiência durante o laboratório e tendo em vista ao desenvolvimento da autonomia educacional, o estudante é inicialmente solicitado a refletir sobre o experimento a ser realizado por meio de um questionário. Assim, o aluno deve ser capaz de explicar questões tais como: princípio de funcionamento dos medidores envolvidos; perdas de energia envolvidas; volume de controle a ser adotado na modelagem; detalhes relativos a cada variável envolvida na modelagem (temperaturas, velocidade do ar, potência dissipada), como, por exemplo, sua adequação às correlações existentes para o cálculo do coeficiente de película; cuidados a serem tomados durante a realização da experiência e assim por diante. Em nenhum momento o aluno recebe um roteiro do que deve ser feito, ao contrário, o aluno recebe apenas um problema a ser resolvido (previsão da dissipação de calor, cálculo do coeficiente de película a partir das medições realizadas, etc.) Como já está inferido da discussão anteriormente realizada, é o aluno que é responsável pela apresentação de um modelo para representar o processo de transferência de calor sob estudo, bem como todas as hipóteses adotadas na elaboração do mesmo. Além disto, deve discutir como esse modelo pode ser utilizado para a obtenção de resultados que possam ser comparados com as medições experimentais a serem obtidas no laboratório. Como subsídio para a compreensão da complexidade do problema, o aluno é ainda questionado a refletir sobre fatores tais como: a) dissipação de calor no interior do ventilador centrífugo e estabilização da temperatura do ar; b) uniformidade de escoamento versus escoamento preferencial de ar ao longo da tubulação vertical e na passagem pelo cilindro aquecido; c) aquecimento não uniforme da parede interna do cilindro aquecido pelo elemento de aquecimento; d) distância vertical entre a tomada para a medição da temperatura do ar e o cilindro aquecido; e) possível influência,

nos resultados da experiência, de: janelas abertas, ventilador da sala ligado ou desligado, número de pessoas presentes versus tempo de realização da experiência, aquecimento do ar ambiente externo ao laboratório versus tempo de realização da experiência; f) influência da parede interna do duto vertical nas proximidades do cilindro aquecido sobre a distribuição angular de temperaturas ao longo desse cilindro etc.

Tudo isto ressalta aos alunos a complexidade inerente a todo fenômeno físico real, e a necessidade de se restringir a modelagem através de idealizações e da elaboração de hipóteses. O aluno é levado a perceber, por exemplo, a importância dos diversos modos pelos quais a energia pode ser “perdida” nesse processo, ou seja, a importância daquelas perdas não consideradas na modelagem, responsáveis por imprecisões extras nos resultados experimentais. Com essa compreensão do fenômeno, espera-se que o aluno seja capaz de propor melhorias ao roteiro experimental no sentido de, por exemplo, reduzir a margem de erro através da realização de medições extras de temperatura ao longo do aparato experimental, em novos pontos estrategicamente selecionados.

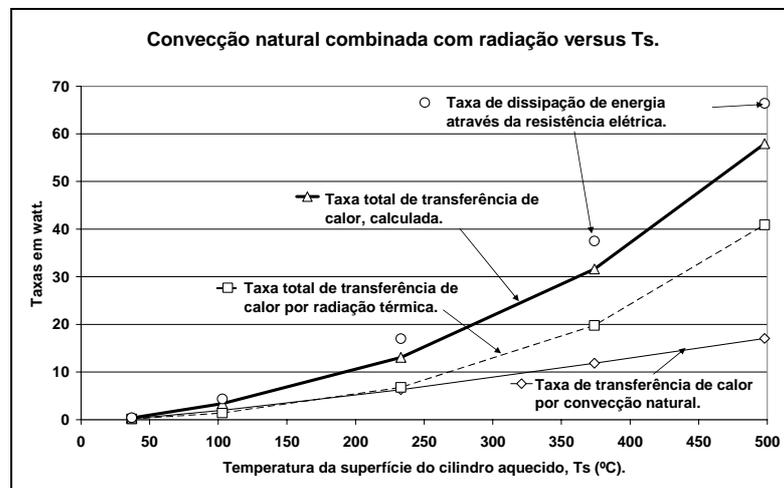


Figura 3: resultados experimentais típicos envolvendo convecção natural e radiação.

A magnitude dos erros experimentais envolvidos nesse aparato pode ser melhor apreciada por meio da Figura 3, que apresenta alguns resultados típicos envolvendo radiação e convecção natural. Esta figura apresenta os resultados de simulação da equação (5) com as seguintes hipóteses adicionais:  $\alpha_s = \epsilon_s$  e  $T_{vz} = T_{ar}$ .

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base na confrontação entre teoria e experimentação, o aluno deve ser capaz de construir uma visão crítica entre os resultados de seus cálculos em sua vivência profissional, e sua aplicação ao fenômeno real sob estudo. Nisto reside a arte do engenheiro, ou seja, a capacidade de gerar tecnologia e desenvolvimento otimizados para fenômenos complexos, por meio de modelagens simplificadas mas ultimamente relevantes para o processo de tomada de decisão a que venha a ser solicitado. Não é a sofisticação de sua modelagem que vai fazer a diferença em seu dia a dia, mas sim o conhecimento de suas limitações e de suas implicações práticas para os objetivos almejados. Em uma palavra, é o **conhecimento significativo** que adquiriu que o tornará um profissional competente, criativo e útil à sociedade. É isto que queremos para os nossos futuros engenheiros e neste trabalho apresentamos algumas propostas para se alcançar a aprendizagem significativa.

### **Agradecimentos**

As duas primeiras autoras são pesquisadoras subsidiadas pelo Instituto Presbiteriano Mackenzie por intermédio do MACKPESQUISA.

### **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- BIRD, R.B.; STEWART, W.R.; LIGHTFOOT, E.N. **Fenômenos de Transporte**. LTC, 2004
- COLL, C.; MARTÍN, E.; MAURI, T.; MIRAS, M.; ONRUBIA, J.; SOLÉ, I.; ZABALA, A. **O construtivismo na sala de aula**. Ática, 1996
- ENCICLOPÉDIA MIRADOR. Espalhamento. 1976
- KREITH, F.; BOHN, M. S. **Princípios de transferência de calor**. Thompson, 2003
- INCROPERA, F.P.; DEWITT, D.P. **Fundamentos em transferência de calor e massa**. LTC, 5ª edição, 2003
- POSNER, G.J.; STRIKE, K.A.; HEWSON, P.W.; GERTZOG, W.A. Accommodation of a scientific conception: toward a theory of conceptual change. **Science education**. v. 66, p. 211-227, 1982
- PRUCCELL, E. M. **Curso de física de Berkeley: eletricidade e magnetismo**. v. 2, Edgard Blücher, 1973.
- TYNJÄLÄ, P. Towards Expert Knowledge? A Comparison between a Constructivist and a Traditional Learning Environment in the University. **Int. Journal of Educational Research**, v.31, p.357-442, 1999
- VAN HEUVEN, J.W.; BEEK, W.J.; MUTTZALL, K.M.K. **Transport phenomena**. John Wiley & Sons, 1999
- WAKS, S.; SABAG, N. Technoly project learning versus lab experimentation. **J. of Science Education and Technology**, v. 13, n. 3, p.333-342, 2004

### **THERMAL RADIATION TEACHING STRATEGIES BASED ON THE THEORY OF CONCEPTUAL CHANGE**

**Abstract:** *This work presents some proposals for thermal radiation teaching strategies to be applied in undergraduate courses, which develop a meaningful and participating learning of engineering students. It is discussed the importance of establishing the student's previous knowledge in order to aloud both the correction of misconceptions and the development of a solid basis for students getting new concepts. It is also highlighted the necessity of creating a conceptual conflict in such a way the students can perceive that their previous knowledge concerning conduction and convection are not sufficient to explain all the heat transfer processes. The proposed strategies are based both on questions addressed to the students and observation of experiments. Furthermore, the teaching proposal recommends the students to perform an experiment where the phenomena of radiation must be modeled jointly with the convection phenomena. In this way it is hoped that the students, from a compared analysis between the simulating results obtained from their proposed model and experimental data, may realize the importance of the hypothesis formulation step and the existing hindrances for rigorous modeling. The experiments performed in the Universidade Presbiteriana Mackenzie and in the Universidade Federal do Paraná are presented and discussed.*

**Key-words:** thermal radiation, conceptual change, transport phenomena, constructivism, experiments in radiation