

Aprendizagem significativa de imagens virtuais formadas por espelhos esféricos côncavos através de experimentos cativantes

Meaningful learning of virtual images formed by concave spherical mirrors through captivating experiments

D.G.G. Sasaki¹, V.L.B. de Jesus²

¹Centro Federal Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca CEFET-RJ - Unidade Maracanã, sasaki@cefet-rj.br ²Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio de Janeiro – IFRJ - Campus Nilópolis, vitor.jesus@ifrj.edu.br

Resumo

É apresentada uma proposta constituída de dois experimentos cativantes com o intuito de propiciar a aprendizagem significativa de imagens virtuais formadas por espelhos esféricos côncavos e a dependência de seu tamanho relativo com a posição do observador, levando ao desenvolvimento do conceito de ângulo visual. Com a finalidade de produzir uma interação efetiva entre os subsunçores relevantes e as experiências, foi elaborado um material escrito na forma de questionário, usando a metodologia POE (Predizer - Observar - Explicar) criada por White e Gunstone. Para avaliar os diferentes tipos de reação dos estudantes perante aos dados anômalos apresentados pela primeira experiência, foi utilizada a taxonomia criada por Chinn e Brewer. Os resultados obtidos levam a conclusão de que a estratégia adotada foi eficaz em propiciar uma aprendizagem significativa da relevância da posição do observador na visualização dos tamanhos relativos entre objetos e a sua relação com as propriedades das imagens virtuais produzidas por espelhos esféricos côncavos.

Palavras chave: Aprendizagem significativa, experimentos didáticos, espelho esférico côncavo, imagem virtual.

Abstract

It is presented a proposal make up by two captivating experiments in order to provide the meaningful learning of virtual images formed by concave spherical mirrors and the dependence of its relative size to the position of the observer, leading to the concept of visual angle. In order to produce an effective interaction between the relevant subsumers and the proposed experiences, it was prepared a questionnaire using the POE methodology (Predict - Observe - Explain) created by White and Gunstone. To evaluate the different types of students' reaction towards the anomalous data presented by the first experiment, it was used the taxonomy created by Chinn and Brewer. The results lead to the conclusion that the adopted strategy was effective to promote a meaningful learning concerning the relevance of the observer's position in the visualization of the relative sizes between objects and its relation to the properties of the virtual images produced by concave spherical mirrors.

Key words: Meaningful learning, didactic experiments, concave spherical mirror, virtual image.

Introdução

A aprendizagem significativa é um processo cognitivo que ocorre através de algumas condições. O material instrucional deve ser potencialmente significativo, isto é, por um lado ele deve ter um significado lógico que lhe permita uma conexão com a estrutura cognitiva do aluno, que seja não arbitrária e não literal. Por outro, é preciso que existam ideias de ancoragem (subsúncos) adequadas no sujeito de tal forma que permita a interação com o conteúdo novo apresentado (MOREIRA, 2006).

Com o intuito de despertar no aluno a curiosidade e o interesse fundamentais para propiciar a aprendizagem significativa, foram desenvolvidos dois experimentos cativantes baseados no apelo à satisfação de alto nível (LABURÚ, 2006). Entretanto, é preciso que o material seja potencialmente significativo. Com essa finalidade foi elaborado um material escrito na forma de questionário, usando a metodologia POE (Predizer - Observar - Explicar) criada por White e Gunstone (WHITE, 1992). Originalmente, a metodologia POE foi concebida para ser empregada concomitantemente a um experimento demonstrativo apresentado pelo professor em sala de aula. Porém, existem pesquisas que comprovam a eficiência do método também com simulações computacionais (TAO, 1999) (REIS, 2002) e vídeos (KEARNEY, 2001).

Para avaliar a reação dos estudantes quando submetidos a evidências que extrapolam ou contrariam suas concepções, Chinn e Brewer (CHINN, 1998) criaram um referencial para classificar os diferentes tipos de reação dos estudantes perante experiências cujos resultados são anômalos. Essa taxonomia dos tipos de resposta dos estudantes é muito importante para a compreensão dos benefícios e limites de qualquer metodologia baseada na criação de conflitos cognitivos. Ademais, ela é uma ferramenta extremamente útil para avaliar a eficácia desse tipo de metodologia em promover uma aprendizagem significativa.

Metodologia

Foram selecionadas quatro turmas de ensino médio do turno da tarde do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET-RJ). Os alunos foram divididos em grupos contendo entre 3 e 6 membros. Cada bancada recebia, no início da aula, um questionário dividido em duas seções: experimento 1 e experimento 2. Por sua vez, cada experimento era subdividido em três partes: predição, observação e explicação, de acordo com a metodologia POE. Através apenas de perguntas predominantemente conceituais, instigou-se os alunos a estabelecerem conexões lógicas entre suas concepções os resultados obtidos em cada etapa das experiências, apontando semelhanças e diferenças e reconciliando discrepâncias. Nas questões chaves era necessário uma ou mais justificativas por parte do grupo, o que permitia organização e a síntese das ideias dos alunos, em tempo real, antes de seguir para a etapa seguinte. Esse procedimento também foi útil porque possibilitou um registro formal do desenvolvimento dos modelos dos alunos ao longo de todo o processo.

Na primeira experiência utilizou-se um banco óptico, uma régua milimetrada, um espelho esférico côncavo grande (espelho de maquiagem), uma vela, uma webcam e um computador conectado ao projetor multimídia, permitindo aos estudantes visualizar o que eles observariam se estivessem ali posicionados. Esse experimento fornece um resultado que é discrepante daquele que o aluno aprende nas aulas de óptica geométrica. De fato, se forem substituídos os seguintes valores da posição da vela (objeto) $p = +25$ cm e da distância focal do espelho $f = +50$ cm, nas equações de Gauss, obtém-se a posição da imagem $p' = -50$ cm e AL igual a 2.

Porém, tal conclusão é precipitada, pois colocando um observador na posição $x = 50$ cm sobre o eixo principal, este não verá uma imagem duas vezes maior como “previsto” pelo AL, mas,

ao contrário, verá uma imagem duas vezes menor, pois o ângulo visual da imagem é a metade do ângulo visual do objeto (DE JESUS, 2013).

No segundo experimento, retirou-se o espelho côncavo e realizou-se uma simulação do que o observador (webcam) enxergaria caso o espelho côncavo ainda estivesse presente. Para isso, usamos uma segunda vela de tamanho compatível com aquele previsto pelo aumento linear transversal e ocupando a posição da imagem prevista pela equação dos pontos conjugados

Inicialmente, o professor apresentou o primeiro experimento e depois entregou os questionários. Os alunos responderam questões qualitativas preliminares, tais como desenhar a imagem usando os raios principais, classificar a sua natureza (real ou virtual), dizer como seria a imagem visualizada caso o observador estivesse no lugar da webcam e justificar a sua resposta. Depois, na parte quantitativa, foram solicitados os cálculos dos valores da posição da imagem e do aumento linear transversal.

Na segunda etapa, que se refere à observação, o professor realizou a experiência e projetou a imagem capturada pela webcam na parede da sala, para todos os alunos observarem o resultado simultaneamente (Figura 1). Nesse momento, os alunos foram confrontados com um resultado que é claramente divergente da sua previsão. Eles então retornaram ao questionário e responderam a uma pergunta simples para descrever aquilo que eles observaram, apontando as diferenças (caso existam) em relação à sua previsão. Por fim, a última etapa corresponde à explicação, onde eles responderam uma pergunta única sobre os motivos que podem justificar o fato de a observação ter sido diferente da previsão. As respostas dadas nessa fase foram posteriormente tabuladas segundo a taxonomia proposta por Chinn e Brewer (CHINN, 1998).



Figura 1: Na parte inferior da foto, a vela (objeto) está colocada entre o vértice e o foco do espelho, na posição $p = 25$ cm. A webcam (observador) está sobre o eixo principal na posição $x = 50$ cm. O aumento linear transversal (AL) da imagem vale 2. Porém, percebe-se que a imagem (em segundo plano na projeção na parede) é duas vezes menor do que o objeto (em primeiro plano na projeção na parede).

A segunda experiência serviu como um contraponto da primeira. De fato, o seu resultado é na maioria dos casos previsto corretamente pelos alunos, ou seja, não é um experimento discrepante (Figura 2). Por outro lado, proporcionou o *insight* que o aluno necessita para compreender os resultados anômalos do primeiro experimento. Notamos que, após a execução do primeiro experimento, os alunos ficam ansiosos para saber a “resposta correta”. Contudo, acreditamos que eles próprios podem desenvolver um modelo teórico consistente com os dados anômalos, desde que eles empreguem os conceitos de tamanho relativo e de distância do observador em relação ao objeto e a imagem, que são os subsunçores para o entendimento de ângulo visual. Esses conceitos vêm naturalmente à tona durante a etapa de previsão do segundo experimento e são mais bem compreendidos nas etapas de observação e explicação.



Figura 2: Na parte inferior da foto, vemos a vela da esquerda (“vela-objeto”) e a vela a direita (“vela-imagem”). A “vela-imagem” tem o dobro da altura e da largura da “vela-objeto”, como previsto pela equação do aumento linear transversal para os parâmetros usados na experiência. Porém, a “vela-imagem” (em segundo plano na projeção da parede) é visualizada com a metade da altura e da largura da “vela-objeto” (em primeiro plano na projeção da parede). Isso ocorre devido ao efeito do ângulo visual.

Ao finalizar essas etapas, os grupos são submetidos à última pergunta do questionário, que é exatamente responder novamente o porquê dos resultados anômalos no experimento 1. Nossos objetivos são verificar se o experimento 2 serviu para modificar a resposta inicial do grupo e, em caso afirmativo, se os alunos conseguiram elaborar um modelo teórico novo coerente com os resultados. Novamente, essas respostas são classificadas segundo o referencial de Chinn e Brewer (CHINN, 1998).

Resultados

Na fase de previsão do experimento 1, todos os grupos responderam que a imagem teria um tamanho maior do que o objeto, reproduzindo aquilo que eles aprenderam, nos livros textos e nas aulas teóricas. Na etapa de observação, os alunos ficaram extremamente perplexos. Por fim, na etapa de explicação do experimento 1 verificamos que todas as respostas recaem perfeitamente em 6 das 8 classificações propostas por Chinn e Brewer (tabela 1).

Como esperado, não houve nenhuma resposta que se enquadrasse na categoria “ignorar”, pois a discrepância era tão flagrante que não havia como ser desprezada. Além disso, também não houve nenhum caso do tipo “incerteza”, pois foi permitido aos alunos incrédulos pudessem se aproximar do experimento, posicionar os olhos junto à câmera e visualizar diretamente o espelho, o objeto (vela) e a sua imagem conjugada.

Uma análise quantitativa dos resultados revelou que a grande maioria dos grupos (69,2%) não interpretou a divergência como um indicativo da necessidade de reverem seus modelos conceituais de forma fundamental. Portanto, o conflito cognitivo não se mostrou, isoladamente, uma ferramenta eficiente para promover a reconciliação integrativa entre os conceitos de ângulo visual e a percepção do tamanho relativo entre objeto e imagem virtual produzida em um espelho esférico côncavo. Destacam-se pelo maior número percentual, os grupos que rejeitaram os dados anômalos (30,8% do total), divididos entre aqueles que alegavam erros metodológicos: *a webcam é diferente do olho humano e, além disso, está num nível abaixo da vela* (grupo 6 – turma A) e entre os que acusavam algum tipo de fraude: *falcatrua da webcam ou o espelho não é côncavo e sim convexo* (grupo 1 – turma D).

	A	B	C	D	Tot./Perc.	Exemplos transcritos
Ignorar	0	0	0	0	0/0	
Rejeição	4		1	3	8/30,8%	<p><i>A lente da câmera influencia no resultado final (grupo 4 – turma A).</i></p> <p><i>A webcam é diferente do olho humano e, além disso, está num nível abaixo da vela (grupo 6 – turma A).</i></p> <p><i>O espelho pode não ser côncavo ou ter uma lente acoplada (grupo 3 – turma C).</i></p> <p><i>Falcatrua da webcam ou o espelho não é côncavo e sim convexo (grupo 1 – turma D).</i></p>
Incerteza	0	0	0	0	0/0	
Exclusão	2	1			3/11,5%	<p><i>Não podemos provar a prática com a teoria já que na teoria não há intervenção do meio sobre a imagem (grupo 3 – turma A).</i></p> <p><i>A teoria é diferente da prática. Não dá para ensinar óptica na teoria (grupo 2 – turma A).</i></p> <p><i>Contas no papel são inexatas, pois não equivalem à realidade (grupo 7 – turma B).</i></p>
Abstenção		1		1	2/7,7%	<p><i>Não temos teorias válidas (grupo 1 – turma B).</i></p> <p><i>O professor falou na sala que o espelho côncavo a imagem formada seria maior (grupo 3 – turma D).</i></p>
Reinterpretação		1	2		3/11,5%	<p><i>Temos uma imagem virtual sobre uma real. Nós somos a imagem e o que está no espelho é real (grupo 5 – turma B).</i></p> <p><i>Porque observamos o objeto e a imagem atrás deles, ou seja, de um ponto diferente do local do objeto, o que modifica o resultado final (grupo 1 – turma C).</i></p>
Mudança periférica	2				2/7,7%	<p><i>A distância entre o observador e o vértice é o dobro da distância entre a vela e o vértice, logo pela fórmula do AL = $-p_{vela}/p_{obs} = -1/2$. A nova imagem foi reduzida 2 vezes (grupo 7 – turma A).</i></p> <p><i>A distância da webcam ao espelho é duas vezes maior que a distância do objeto ao espelho, fazendo com que a imagem refletida seja menor (grupo 8 – turma A).</i></p>
Mudança essencial	0	4	1	3	8/30,8%	<p><i>Observamos a imagem mais longe que o objeto e conseqüentemente esta parece menor (grupo 4 – turma B).</i></p> <p><i>Não foi considerado observador na previsão. Na experiência, a distância entre o observador e a imagem altera a observação (grupo 3 – turma B).</i></p> <p><i>Apesar da imagem formada ser o dobro do tamanho do objeto, ele está mais próximo da câmera. Quanto mais próximo dos olhos o objeto está, maior este aparenta (grupo 2 – turma C).</i></p> <p><i>A ilusão de que a imagem é menor do que o objeto se deve à distância do observador à imagem e ao objeto, pois uma distância é o quádruplo da outra (grupo 6 - turma D).</i></p>

Tabela 1. Tabulação dos tipos de respostas dos grupos para a etapa explicação do experimento 1, em cada turma, segundo a taxonomia de Chinn e Brewer.

O tipo “exclusão” corresponde a 11,5% do total de grupos. É interessante salientar que os três grupos que optaram pela “exclusão” exibiram um padrão típico de resposta que não se limitou a criticar o seu modelo específico. Dois grupos duvidaram que a experiência pudesse ser modelada, como no seguinte exemplo: *não podemos provar a prática com a teoria já que na*

teoria não há intervenção do meio sobre a imagem (grupo 3 – turma A). Outro grupo assumiu a posição de refutar a premissa de que é possível construir modelos teóricos matemáticos: *contas no papel são inexatas, pois não equivalem à realidade* (grupo 7 – turma B).

Também com 11,5% do total, tivemos o tipo “reinterpretação”. Nessa categoria houve duas classes de respostas distintas. A primeira é quando ocorre uma adaptação ou mesmo uma distorção dos dados de modo a encaixá-los no modelo teórico, como por exemplo: *Temos uma imagem virtual sobre uma real. Nós somos a imagem e o que está no espelho é real* (grupo 5 – turma B). Outra situação é a inserção de uma hipótese *ad hoc*, às vezes com o sacrifício da coerência interna com as outras hipóteses originais, mas que tem a vantagem de ajustar os dados ao modelo: *porque observamos o objeto e a imagem atrás deles, ou seja, de um ponto diferente do local do objeto, o que modifica o resultado final* (grupo 1 – turma C).

A “abstenção” representou somente 7,7% dos resultados. O caso mais comum desse tipo ocorre quando o aluno deixa as respostas em branco. Contudo, também podem ser consideradas respostas vagas que mostram, de forma inequívoca: *o professor falou na sala que o espelho côncavo a imagem formada seria maior* (grupo 3 – turma D).

O tipo “mudança periférica” também ficou com apenas 7,7% das respostas. Um grupo propôs alterar a expressão matemática do Aumento Linear transversal (AL): *a distância entre o observador e o vértice é o dobro da distância entre a vela e o vértice, logo pela fórmula do $AL = -p_{vela}/p_{obs} = -1/2$. A nova imagem foi reduzida 2 vezes* (grupo 7 – turma A). Certamente, os alunos dos grupos simplesmente encaram o AL como se fosse uma hipótese secundária passível de alteração, ignorando que a fórmula modificada por eles é, na verdade, proveniente de uma demonstração geométrica.

Por fim, o tipo “mudança essencial” ocorreu em 30,8% dos grupos. Os alunos foram capazes de perceber que a visualização da imagem não é uma característica intrínseca, mas depende da posição do observador. Isso claramente se deduz das seguintes respostas: *Não foi considerado observador na previsão. Na experiência, a distância entre o observador e a imagem altera a observação* (grupo 3 – turma B). *Observamos a imagem mais longe que o objeto e conseqüentemente esta parece menor* (grupo 4 – turma B).

O segundo experimento desempenhou um papel vital na reversão desse quadro. Na sua etapa previsão, por ser uma experiência mais simples e intuitiva, devolveu à confiança dos alunos em suas concepções e ao mesmo tempo, resgatou os subsunçores pertinentes relacionados com o conceito de tamanho relativo devido à distância do observador aos objetos. A maioria esmagadora dos grupos (92,3% do total) conseguiu prever corretamente o resultado e justificar de forma adequada. Na etapa explicação, o experimento 2 proporcionou uma reconciliação integrativa conectando os subsunçores recuperados no experimento 2 com os dados anômalos do experimento 1. Aqueles grupos que conseguiram estabelecer essa conexão atingiram uma compreensão integrada das duas experiências, reformularam os seus modelos teóricos e lograram uma explicação coerente dos dados anômalos.

Ao final do primeiro experimento, 69,2% dos grupos se distribuíram em tipos de respostas que não significavam mudança essencial de suas teorias. Após o segundo experimento, 73,3% dos grupos assumiram uma mudança essencial para descrever os dados anômalos do experimento. Essa constatação quantitativa, por si mesma, já é um indicativo de que houve uma aprendizagem significativa por parte dos alunos. Contudo, existem também indícios qualitativos importantes que endossam essa conjectura.

	A	B	C	D	Tot./Perc.	Exemplos transcritos
Ignorar					0/0	
Rejeição	1				1/3,8%	<i>A câmera inverte a imagem e o objeto (grupo 4 – turma A).</i>
Incerteza					0/0	
Exclusão	1				1/3,8%	<i>Só foram usados os conhecimentos teóricos (grupo 7 – turma A).</i>
Abstenção		1	1	1	3/11,5%	<i>A presença do espelho causou uma resposta diferente do que esperávamos (grupo 5 – turma B)</i>
Reinterpretação	1				1/3,8%	<i>Observamos a imagem antes do objeto e não a partir dele (grupo 3 – turma A).</i>
Mudança periférica				1	1/3,8%	<i>Devido à distância do objeto em relação ao espelho (grupo 1 – turma D).</i>
Mudança essencial	5	6	3	5	19/73,3%	<p><i>A distância da câmera faz com que a imagem pareça metade do seu tamanho e o objeto pareça 2 vezes maior, quando na realidade a imagem mede duas vezes o objeto (grupo 5 – turma A).</i></p> <p><i>Por questão de perspectiva! A imagem na realidade estava a 100 cm de distância da câmera, estando mais distante do objeto, por isso vemos o tamanho da vela maior que a imagem (grupo 4 – turma B).</i></p> <p><i>Pois tanto o olho como a webcam possui um “anteparo” onde a imagem é projetada. O ângulo de visão da vela é grande dando a ilusão que ela é maior do que a imagem (o grupo também colocou um desenho mostrando as distâncias, os tamanhos e os ângulos visuais) (grupo 2 – turma C).</i></p> <p><i>A vela pequena será maior porque mesmo com o tamanho da vela maior sendo o dobro, a distância entre ela e o observador é 4 vezes maior que a distância do observador à vela pequena. Logo, a vela grande parecerá metade da vela pequena (grupo 6 – turma D).</i></p>

Tabela 2. Tabulação dos tipos de respostas dos grupos para a etapa explicação do experimento 1 após a realização do experimento 2, em cada turma, segundo a taxonomia de Chinn e Brewer.

A comparação das respostas desses grupos antes e depois do experimento 2, evidencia um aumento no refinamento conceitual e operacional de seus argumentos, como podemos constatar nos exemplos transcritos abaixo:

Grupo 6 da turma D

(Explicação do experimento 1 antes do experimento 2): *a ilusão de que a imagem é menor do que o objeto se deve à distância do observador à imagem e ao objeto, pois uma distância é o quádruplo da outra.*

(Explicação do experimento 1 depois do experimento 2): *a vela pequena será maior porque mesmo com o tamanho da vela maior sendo o dobro, a distância entre ela e o observador é 4 vezes maior que a distância do observador à vela pequena. Logo, a vela grande parecerá metade da vela pequena.*

Grupo 4 da turma B

(Explicação do experimento 1 antes do experimento 2): *observamos a imagem mais longe que o objeto e conseqüentemente esta parece menor .*

(Explicação do experimento 1 depois do experimento 2): *por questão de perspectiva! A imagem na realidade estava a 100 cm de distância da câmera, estando mais distante do objeto, por isso vemos o tamanho da vela maior que a imagem.*

Conclusões

A taxonomia de Chinn e Brewer mostrou-se adequada para classificar as diferentes respostas dos alunos frente aos dados anômalos do primeiro experimento. Além disso, essa classificação desempenhou um papel relevante na avaliação do desenvolvimento da aprendizagem dos alunos.

A estratégia de gerar um conflito cognitivo através de um experimento cujos resultados são discrepantes com as concepções dos aprendizes foi eficiente em fomentar a reflexão, mas não foi por si só suficiente para provocar uma mudança essencial nos seus modelos teóricos. A realização da segunda experiência foi fundamental para propiciar uma reconciliação integrativa entre os subsunçores correspondentes aos conceitos de ângulo visual com as propriedades de uma imagem virtual produzida em um espelho esférico côncavo, de modo a explicar os resultados surpreendentes do primeiro experimento.

Quantitativamente, a comparação dos percentuais dos tipos de respostas dos grupos, depois do primeiro experimento 1 e após o experimento 2, demonstrou uma reversão da distribuição percentual dos grupos que apresentaram uma mudança essencial. No primeiro experimento, a grande maioria dos grupos (69,2%) se dividiu em tipos de respostas que não representavam mudança essencial de suas teorias. No segundo experimento, 73,3% dos grupos assumiram uma mudança essencial. Do ponto de vista qualitativo, constatou-se um aprimoramento tanto conceitual quanto operacional dos modelos teóricos produzidos pelos alunos.

Uma possível implicação deste trabalho é indicar uma estratégia de ensino que combine a metodologia POE de inspiração construtivista em um contexto escolar de caráter tecnicista, cujo objetivo é promover uma educação profissional de nível médio. De fato, os resultados sugerem que a aplicação da metodologia POE como fio condutor da proposta experimental foi auspiciosa em viabilizar uma aprendizagem significativa dos conceitos envolvidos.

Referências

- CHINN, C. A.; BREWER, W. F. An empirical test of a taxonomy of responses to anomalous data in science. **Journal of Research in Science Teaching**, 35 (6), 623–654, 1998.
- DE JESUS, V. L. B.; SASAKI, D. G. G. Utilização do conceito de aumento angular para interpretar imagens observadas em espelhos esféricos côncavos. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, Vol.35, n.1, 2013.
- KEARNEY, M.; TREAGUST, D. F. Constructivism as a referent in the design and development of a computer program which uses interactive digital video to enhance learning in physics. **Australian Journal of Educational Technology**, 17(1), 64–79, 2001a.
- LABURU, C. E. Fundamentos para um experimento cativante. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, Florianópolis, Vol. 23, n.3, 382-404, 2006.
- MOREIRA, M. A.; MASINI, E. A. **Aprendizagem significativa: a teoria de aprendizagem de David Ausubel**. 2ª ed. São Paulo: Centauro Editora, 2006.
- REIS, M.A.F.; SERRANO, A. A. N. Simulação de colisões dirigidas ao ensino de física. **Acta Scientiae**, Vol. 4, n.2, 7-19, 2002.
- TAO, P. K.; GUNSTONE, R. F. A process of conceptual change in force and motion during computer-supported Physics instruction. **Journal of Research in Science Teaching**, 37, 859-882, 1999.
- WHITE, R. T.; GUNSTONE, R. F. **Probing understanding**. London: Falmer, 1992.