

**ALÉM DA DETECÇÃO DE MODELOS MENTAIS DOS ESTUDANTES
UMA PROPOSTA REPRESENTACIONAL INTEGRADORA
(Beyond the detection of students' mental models. An integrative representational approach)**

Ileana Maria Greca [ilegreca@terra.com.br]

PPGCIEM-ULBRA, Canoas, RS

Marco Antonio Moreira [moreira@if.ufrgs.br]

Instituto de Física – UFRGS - 91501-970 Porto Alegre, RS

Resumo

Neste trabalho discutimos algumas limitações do referencial teórico dos modelos mentais para a pesquisa em Ensino de Ciências. A partir da análise da teoria dos campos conceituais de Vergnaud propomos uma abordagem que, integrando elementos de ambos referenciais, poderia permitir uma melhor compreensão de alguns processos cognitivos na aprendizagem de conceitos científicos. Finalmente indicamos possíveis implicações desta abordagem para a pesquisa e para o ensino de Ciências.

Palavras chaves: modelos mentais, campos conceituais, esquemas, invariantes operatórios, mudança conceitual.

Abstract

In this paper we initially discuss some limitations of the mental model theoretical framework for research in science education. Then, after an analysis of Vergnaud's conceptual fields theory we propose an approach that integrating elements of both theoretical frameworks could provide a better understanding of some cognitive processes involved in the learning of scientific concepts. Finally, we suggest possible implications of this approach for science teaching as well as for research in this area.

Key-words: mental models, conceptual fields, schemes, operational invariants, conceptual change.

Introdução

"As intuições sem conceitos são cegas e os conceitos sem intuições são vácuos"

I. Kant, *Crítica de la razón pura*, 1999, Alfaguara, Madrid.

Na última década temos assistido a um incremento considerável de pesquisas sobre as representações mentais dos estudantes. Assim como a década de 1970 tem sido identificada como a década da procura das concepções alternativas e a de 1980 como a década da mudança conceitual (Moreira,1994), os anos 1990 podem ser caracterizados pela utilização das contribuições da Psicologia Cognitiva, em particular em relação às representações internas dos estudantes. Este interesse decorre da necessidade de entender os processos que subjazem à cognição, a fim de poder elaborar estratégias instrucionais mais eficientes (Brown, 1995; Vosniadou, 1995), dada a insatisfação com os escassos resultados obtidos nas pesquisas sobre a mudança conceitual (Duit, 1993). Como indica Caravita (2001), uma teoria sobre a aprendizagem conceitual somente pode ser justificada na medida em que se enquadre dentro de teorias da mente e da cognição, onde as representações mentais tem um papel explicativo para estes processos. Dentre os diferentes construtos sobre as representações internas, o conceito de modelo mental tem alcançado uma grande importância na pesquisa em ensino de ciências a partir da segunda metade dos anos 1990 (Greca e Moreira, 2000). Como antecipavam Pintó et al. (1996), a potencialidade deste conceito para a

pesquisa em ensino de ciências radicaria, fundamentalmente, na possibilidade de servir de referencial teórico para interpretar as concepções e os modos de raciocínio dos estudantes e, desta forma, abordar com uma fundamentação mais sólida a didática das ciências, fundamentação esta nem sempre presente ou pouco clara tanto nas pesquisas sobre concepções alternativas como nas da mudança conceitual (Moreira, 1994; Marín, 1999; di Sessa e Sherin, 1999).

Além desta potencialidade intrínseca, a própria idéia de falar em modelos (ainda que com o qualificativo de "mentais") tem resultado particularmente atrativa na pesquisa em ensino de ciências. De fato, se o fazer científico constitui-se fundamentalmente na elaboração e uso de modelos, e a modelização o objetivo final do ensino em ciências (Hestenes, 1987, Halloun, 1996), para diversos autores pareceria natural estabelecer analogias entre os modelos científicos (representações externas) e os modelos mentais (representações internas) (Tiberghien, 1994; Gilbert e Boulter, 1998; Galawosky e Adúriz Bravo, 2001). Assim, por exemplo, se fala em *"um ensino de ciências baseado em modelos -- dos mentais aos científicos --"* (Pozo, 1999, p. 518). O estabelecimento destas analogias, em particular quando se pressupõe que existe um isomorfismo entre os modelos científicos acabados e os que as pessoas têm ou constróem nas suas cabeças, pode resultar problemático para a pesquisa (Greca e Moreira, 2000), na medida em que se confundem representações internas e externas. No entanto, ela tem tido um forte apelo na área.

Embora seu uso seja generalizado, não há uma definição geral ou única do que possa ser entendido como modelo mental; mais ainda, sua utilização na pesquisa em ciências tem se caracterizado pela vaguidade e diversificação de sentidos (Krapas et al. 1997; Greca e Moreira, 2000; Rodríguez Palmeiro, 2000), assim como pela ausência de definições explícitas. Isto, aliás, não é exclusividade da área de ensino, sendo um panorama semelhante já rastreado na própria área de origem, a Ciência Cognitiva (Rouse e Morris, 1986). Tomando só alguns exemplos recentemente publicados, e sem o intuito de sermos exaustivos, Galagovsky e Adúriz-Bravo (2001, p. 232) consideram que *"a apropriação de qualquer aspecto da realidade supõe que ele seja representado, ou seja, supõe a construção de um modelo mental da realidade"*; para Bao e Redish (2001, p. S46) modelos mentais são esquemas particularmente robustos e coerentes, que *"se embasado em um conjunto de idéias consistentes e coerentes acerca dos objetos físicos e suas propriedades é considerado como um modelo físico"*; Pozo (1999, p. 514) opõe os modelos mentais *"às representações esquemáticas, explicitamente presentes na memória do sujeito"*. Esta vaguidade e diversificação de sentidos tem levado a que praticamente tudo, ou qualquer tipo de representação, seja atualmente considerado como modelo mental na pesquisa em ensino de ciências, o que, nos parece, pode conduzir-nos perigosamente a que resultados de pesquisa possam ser resumidos, parafraseando Rouse e Morris (1986, p. 350), como dizendo que *"os estudantes têm que representar alguma coisa para poder realizar suas tarefas"*, o que não é um grande passo para o ensino de ciências. Ou seja, se não se pode diferenciar a funcionalidade e a estrutura desse construto em relação a outros tipos de representações internas para os processos de cognição -- dado que os modelos mentais tanto podem ser estruturas estáveis localizadas (presumivelmente) na memória de longo prazo (convertendo-se, neste caso, só em substitutos pouco felizes do "conhecimento" em geral) quanto estruturas dinâmicas e, portanto, instáveis, geradas frente a uma situação concreta; ou que internamente seja a mesma coisa a representação de uma imagem que a representação gerada para explicar e predizer o funcionamento de uma máquina -- se corre o risco de perder grande parte da potencialidade do construto.

Neste trabalho vamos adotar a visão de modelos mentais como estruturas cognitivas idiossincráticas, determinadas e concretas, que acontecem na memória de trabalho¹ do sujeito que

¹ Esta concepção de que os modelos mentais presentes na memória de trabalho difere, por exemplo, da concepção de modelo de Gentner e Gentner (1983), segundo os quais os modelos mentais resultam ser a estrutura das representações do conhecimento e, portanto, estariam na memória de longo prazo. Esta diferenciação, porém, não aparece em forma

quer compreender, explicar ou prever uma situação ou processo específico, atuando como análogos estruturais dessa situação ou processo. Podemos entendê-los como "simuladores" dessas situações, de forma semelhante a como os computadores analógicos simulam um sistema físico (Greca, 2000). Caracterizam-se por serem estruturas dinâmicas, geradas para resolver uma situação particular (muitas vezes nova), incompletas, recursivamente modificáveis ou atualizadas, na medida em que o sujeito detecta uma falta de correspondência entre as previsões geradas pelo modelo e os eventos externos ou precisa incorporar novas informações ao seu modelo, dependendo do uso que queira dar ao mesmo. Esse é o sentido de chamar esses modelos mentais de "modelos de trabalho" – ou seja, serem representações "descartáveis" cujo principal compromisso é a funcionalidade. A partir de um processo de tradução de processos externos em representações internas, a derivação de outros símbolos a partir de um processo inferencial e a re-tradução desses símbolos em ações, de forma a verificar se existe uma correspondência entre essas ações e os eventos externos, Johnson-Laird postula que estes mecanismos, que aconteceriam na "rodada" do modelo mental na mente do sujeito, podem dar conta do raciocínio, sem necessidade de invocar regras lógicas. Esta definição de modelos mentais pretende separar este tipo de representação de outros tipos de representações desde o ponto de vista de suas funções e estrutura: das imagens e representações proposicionais (Johnson-Laird, 1983), e de estruturas mais estáveis da memória de longo prazo, como os *scripts* (Markmann, 1999).

Suponhamos que efetivamente para compreender, explicar e prever os conceitos, problemas e modelos que lhes são apresentados nas aulas de ciências os estudantes precisam construir representações internas que podem ser caracterizadas como modelos mentais, de acordo com a definição adotada antes. Na medida em que se queira avançar em relação a uma simples detecção de modelos mentais dos estudantes para diferentes áreas de conhecimento (detecção que, embora necessária, não parece se diferenciar em muito em relação ao programa das concepções alternativas) as propostas existentes na área fazem surgir outras questões. Vejamos alguns exemplos.

Em um trabalho bastante conhecido, Vosniadou (1994; Vosniadou e Brewer, 1994) utiliza os modelos mentais para caracterizar as representações dinâmicas que os sujeitos geram para lidar com situações específicas. Estas representações estariam determinadas pelas teorias de domínio que os sujeitos têm sobre um determinado conjunto de fenômenos², que por sua vez, adotariam, de forma implícita, a estrutura de certos princípios ou supostos epistemológicos e ontológicos impostos pelas "teorias-marco" ou teorias implícitas (Pozo e Gómez Crespo, 1999). Estes supostos implícitos se constituiriam nos primeiros anos de vida do sujeito e não seriam compatíveis com os pressupostos das teorias científicas, convertendo-se assim no principal obstáculo para a aprendizagem de conceitos científicos. Um dos problemas desta abordagem é a falta de definição em relação à estrutura tanto das teorias de domínio como das teorias--marco, assim como as implicações teóricas da diferenciação entre as distintas representações (Caravita, 2001). Este problema é comum a uma série de enfoques que pressupõem analogias entre processos psicológicos cognitivos e processos de mudanças nas teorias científicas e que têm sido bastante questionado nos últimos anos tanto na psicologia como no ensino em ciências (Fodor, 1998; Marin, 1999; Caravita, 2001). Outra das questões que aparecem é ausência de definição dos mecanismos e relações entre as diferentes representações, assim como a relação entre estas e as variáveis externas que supostamente as influenciam.

clara na pesquisa em ensino de ciências, como indicamos antes, adotando-se, em pé de igualdade, estruturas pertencentes à memória de longo prazo e à memória de trabalho.

² O que seja exatamente um domínio é uma questão que varia de autor a autor. No trabalho de Vosniadou, ela parece identificar os domínios relacionados com certos conceitos (por exemplo, o domínio do conceito de força, de calor, de ciclo dia/noite). Os supostos epistemológicos de todos estes domínios formariam parte de uma teoria-marco sobre a física ingênua (Vosniadou, 1994).

Gutiérrez (2000) aponta também para a falta de definição nesta abordagem dos processos que monitorariam as mudanças de um modelo mental para outro. Sua proposta, embasada nos modelos mentais mecanicistas de de Kleer e Brown (1983), sugere que o primeiro passo para a construção de modelos mentais causais é a criação de uma representação interna da estrutura de um sistema físico. Neste estágio, pressupostos epistemológicos e ontológicos e os objetivos das pessoas para a criação do modelo mental, determinariam que objetos desse sistema devem ser escolhidos para serem representados, qual é o recorte que deve ser realizado sobre o sistema e as propriedades atribuídas aos mesmos. Estes pressupostos seriam mudados se o modelo mental resultante da primeira representação não se correspondesse com a realidade ou não fosse robusto. Segundo Gutiérrez (1999), este mecanismo (necessidade do indivíduo de construir modelos mentais coerentes, robustos e consistentes que permitam uma concordância entre seu pensamento e os dados do mundo externo) seria o responsável pelo monitoramento do processo de mudança conceitual no caso de sistemas físicos dinâmicos. Neste processo de reformulação de modelos, mudanças ontológicas aconteceriam com bastante facilidade. Embora esta abordagem resulte plausível, surgem algumas perguntas: qual é a estrutura ou a forma representacional desses pressupostos que determinam uma certa escolha? São estas representações guardadas na memória de longo prazo? Qual é a estabilidade das mesmas? Qual é a relação entre esta representação “descartável” dos modelos mentais e o uso sistemático por parte dos estudantes de certas “regras” e algoritmos ao resolver problemas dos sistemas físicos?

Greca e Moreira (2002), adotando o referencial dos modelos mentais de Johnson-Laird, encontraram nas suas pesquisas que os modelos mentais gerados pelos estudantes para a explicação e predição de situações físicas concretas e para a compreensão de conceitos físicos dentro do âmbito escolar são determinados tanto pelo conhecimento geral dos estudantes como por certos conceitos ou pressupostos mais fundamentais que funcionariam como núcleos desses modelos mentais. Esses núcleos seriam entidades mais estáveis da estrutura cognitiva e determinariam o conjunto de situações que são percebidas como semelhantes. Tais núcleos poderiam estar formados tanto por elementos relacionados com os modelos físicos como por outros vinculados aos modelos matemáticos. O processo de aquisição do conhecimento estaria dado por sucessivas reformulações dos modelos mentais dentro de uma mesma família de modelos (que teriam o mesmo núcleo) ou pela geração de novas famílias de modelos que permitiriam o estabelecimento ou aceitação de novos núcleos. Segundo esta perspectiva, se a informação à qual o estudante deve dar significado não lhe permite a elaboração de modelos mentais adequados para sua compreensão (que não sejam contraditórios com aquilo que sabe, seja via a reformulação do seus modelos ou através da geração de novos), ele não construirá modelos mentais e a informação passará a ser memorizada na forma de representações proposicionais isoladas não significativas. Esta proposta permite explicar um fato bastante conhecido nas aulas de ciências, que é o rápido esquecimento dos estudantes das idéias ensinadas em aula e aparentemente aprendidas. Os estudantes aprenderiam fórmulas, algoritmos de resolução e definições, não vinculadas a modelos mentais, que seriam mais facilmente esquecidas. Contudo, novamente, neste caso a estrutura do conhecimento geral do estudantes (representações proposicionais, imagens, núcleos, fórmulas, ...) não aparece claramente definida nem diferenciada assim como tampouco são explicados os mecanismos e relações entre esse conhecimento geral e os modelos mentais.

Além das questões relacionadas com os diferentes níveis representacionais, em nenhuma das propostas se define o que se está entendendo por conceito (embora as duas primeiras se apresentem como propostas para explicar a mudança conceitual e a terceira discuta questões vinculadas à aprendizagem de conceitos), problema aliás bastante difundido na área (di Sessa e Sherin, 1998). Este ponto é de particular relevância na hora de pensar o ensino de ciências pois, embora se argumente que o fim último do ensino não necessariamente é a aprendizagem de conceitos (Pozo, 1999, p. 516), a mudança de atitudes, procedimentos, princípios epistemológicos e ontológicos acontecem na medida da aprendizagem conceitual.

Neste trabalho nos propomos, justamente, a discutir a possibilidade de avançar em relação às propostas até agora elaboradas sobre os modelos mentais na pesquisa em ensino de ciências, integrando-as dentro de um marco mais amplo para tentar dar resposta a algumas das questões antes colocadas. Nosso modelo tomará elementos da teoria dos campos conceituais de Vergnaud, teoria bastante difundida dentro do âmbito da pesquisa em educação matemática, que apresentaremos a seguir.

A teoria dos campos conceituais de Vergnaud

Para Vergnaud (1983, 1987, 1990, 1996, 1998) o problema central da cognição é a conceitualização e sua teoria justamente aporta elementos neste sentido. Opondo-se à separação entre conhecimento procedimental e conhecimento declarativo, ele considera que o fator essencial da dificuldade dos estudantes com a resolução de problemas em Matemática (que pode ser estendido à resolução de problemas em Física) encontra-se vinculada não ao tipo de operação que um determinado problema requer por em prática e sim às "operações do pensamento" (Franchi, 1999) que os estudantes devem fazer para estabelecer relações pertinentes entre os dados do problema. Ou seja, o comportamento dos estudantes na resolução de problemas é guiado por hipóteses, analogias, metáforas, que dependem da conceitualização. Assim, embora na literatura a resolução de problemas seja muitas vezes vista como uma nova combinação de ações e regras a partir do conhecimento que se possui, e a formação de conceitos como a emergência de novas formas de conceitualizar o mundo, novos objetos e novas propriedades desses objetos, estes dois elementos formam parte, para Vergnaud, de uma mesma coisa, são duas faces de uma mesma moeda (Vergnaud, 1987). Não considerá-los desta forma subestima, segundo Vergnaud (1987, p. 1) a parte da representação simbólica e de conceitos presentes na resolução de problemas e a parte da resolução de problemas na formação de conceitos. Esta idéia é central na teoria dos campos conceituais, uma teoria que toma aportes de Piaget e de Vygostky (Moreira, 2002).

Segundo Vergnaud, o conhecimento se encontra organizado em *campos conceituais*, dos quais o sujeito se apropria ao longo do tempo. Campos conceituais podem ser definidos como grandes conjuntos, informais e heterogêneos, de situações e problemas cuja análise e tratamento requer diversas classes de conceitos, procedimentos e representações simbólicas que se conectam umas com outras (Vergnaud, 1990, p. 23). Um campo conceitual resulta em uma unidade de estudo cujas componentes -- situações, conceitos, procedimentos, etc -- podem ser tratados de forma independente em relação a outros conjuntos. Isto não quer dizer que os diferentes campos conceituais sejam conjuntos disjuntos e que uns não podem ser importantes para a compreensão dos outros, senão que, na medida em que possam ser consistentemente descritos, podem ser considerados como diferentes. O trabalho de Vergnaud, por exemplo, se centra no estudo dos campos conceituais das estruturas aditivas e das estruturas multiplicativas. Esta unidade de estudo, o campo conceitual, é definida desde a perspectiva do pesquisador, que a define para dar sentido às dificuldades observadas na conceitualização do real. Em Física, os campos conceituais seriam definidos a partir das dificuldades na conceitualização dos modelos e teorias que explicam e interpretam a realidade e, como tais, são aproximações do real. Assim, poderíamos falar dos campos conceituais da Mecânica, da Eletricidade, da Termologia, da Relatividade. A compreensão do movimento dos corpos rígidos, por exemplo, tem pouco a ver com a compreensão da entropia. Embora mantendo elementos em comum (princípios e teoremas mais gerais), a compreensão em um desses campos não é condição suficiente, nem mesmo necessária, para a compreensão do outro. Ou seja, os tipos de situações, problemas, procedimentos, conceitos e teoremas envolvidos nestes campos podem ser tratados independentemente, de forma consistente.

O domínio de um campo conceitual ocorre durante longos períodos de tempo, de forma que novos problemas e novas propriedades relacionados com ele devem ser estudados ao longo de

vários anos se quisermos que os estudantes o dominem progressivamente. Ou seja, as dificuldades conceituais enfrentadas pelos estudantes em relação a um determinado campo conceitual não podem ser contornadas de golpe -- algo assim como tentar a mudança conceitual a partir de uma única situação insatisfatória -- senão que elas seriam superadas progressiva e lentamente.

O conhecimento, então, pode ser imaginado como organizado em campos conceituais constituídos principalmente de conjuntos heterogêneos de situações e problemas. No processo de apreensão desses campos conceituais, os estudantes vão adquirindo concepções e competências. De fato, a maior parte de nossos conhecimentos são competências (ou seja, o saber fazer) que se formam, desenvolvem, diferenciam, melhoram ou pioram ao longo de nossas vidas (Vergnaud, 1996c, p. 200). Em relação ao conhecimento científico, as competências parecem estar mais vinculadas à resolução de problemas e as concepções, às expressões verbais ou escritas dos sujeitos (Vergnaud, 1985). Esta tendência em ressaltar as competências é o que levaria a ênfase em Física em considerar a resolução de problemas como a principal forma de medida do processo de aprendizagem. De fato, numerosas pesquisas constataam que os estudantes podem até resolver adequadamente os problemas, sendo porém incapazes de expressar verbalmente o raciocínio que os levou até o resultado ou a expressar concepções que entram em contradição com a resolução obtida (Greca, 2000; Costa e Moreira, 1998). Assim, a seguinte frase, de um estudante avançado de Física em relação a conteúdos de Mecânica Quântica descreve bem esta ênfase na competência:

"As vezes eu me faço algumas perguntas assim, ... e eu vejo que não sei responder umas questões básicas, sei fazer a conta, mas não sei porque estou fazendo, só sei operacionalmente " (Greca, 2000, p. 111).

No entanto, como já foi indicado, na teoria dos campos conceituais, estes dois aspectos -- o procedimental e o declarativo -- são considerados faces de uma mesma moeda. Assim, competências e concepções devem ser consideradas como ferramentas essenciais para a descrição e análise da lenta conquista da complexidade dos campos conceituais por parte dos estudantes.

Na definição de campo conceitual entra em jogo um conceito que é muito importante para a teoria dos campos conceituais (e que também será um conceito chave na nossa proposta): o conceito de *situação*. Para Vergnaud (1990, p. 146), uma situação é entendida como uma tarefa, sendo que toda situação complexa pode ser analisada como uma combinação de tarefas. Ou seja, os processos cognitivos e as respostas do sujeito são função das situações com a quais é confrontado (1990, p. 150) e é a partir do confronto com elas e do domínio que progressivamente alcança sobre elas que o sujeito molda os campos conceituais que constituem seu conhecimento³. Por isso, é importante a classificação das situações desde o ponto de vista da análise das tarefas cognitivas e dos procedimentos postos em jogo em cada uma delas. Vejamos as seguintes situações dentro do campo conceitual da Mecânica:

PROBLEMA 1 - Dois blocos estão interligados por um fio e um destes blocos é puxado sobre um plano horizontal. O que acontece com os blocos ?

PROBLEMA 2 - Dois blocos interligados por um fio são soltos no topo de um plano inclinado. O que acontece com os blocos?

³ Este é um dos pontos em que se pode ver a separação de Vergnaud em relação a Piaget. Ao enfatizar a construção do conhecimento matemático a partir de situações, se opõe a idéia piagetiana de que o conhecimento matemático decorre de um processo de abstração de propriedades e relações de operações. Para Vergnaud, o conhecimento matemático, pelo menos nos primeiros estágios, é uma forma de conceitualizar o real.

PROBLEMA 3 - Na situação 2, aumenta-se o ângulo de inclinação até chegar 90°. O que acontece com os blocos?

PROBLEMA 4 - Dois blocos são lançados em queda livre desde uma certa altura. O que acontece com ambos blocos?

Nestas quatro situações, os conceitos envolvidos e as operações que devem ser efetuadas desde o ponto de vista da Mecânica Clássica são muito semelhantes, no entanto para os estudantes elas apresentam diferentes graus de dificuldades: o problema 4 é considerado mais fácil que o problema 3 e o problema 1 mais fácil que o problema 2 e estes, mais difíceis que o 3 e o 4.

Ainda que o domínio das situações molde o conhecimento que o estudante alcança, o sentido atribuído pelo sujeito à situação não está na situação em si mesma, senão que decorre de uma relação entre a situação e a representação que dela faça o sujeito. Aqui é onde entra o conceito de esquema.

Frente a determinadas situações agimos de uma dada forma, determinada pelas representações que dela fazemos. O vínculo, segundo Vergnaud, entre a conduta e a representação é dado pelo conceito piagetiano de *esquema*. Vergnaud chama de *esquema a organização invariante do comportamento para uma determinada classe de situações* (1990, p. 136; 1998, p. 168). Segundo ele, é nos esquemas que se devem pesquisar os *conhecimentos -em-ação* do sujeito, ou seja, os elementos cognitivos que fazem com que ação do sujeito seja operatória. Um esquema então vai gerar ações, pelo que deve conter regras, porém não um estereótipo porque a seqüência de ações depende das particularidades da situação (1994, p. 53). Um esquema é um universal que é eficiente para enfrentar toda uma gama de situações e pode gerar diferentes seqüências de ação, de coleta de informações e de controle, dependendo das características de cada situação particular. Ou seja, não é o comportamento frente a situações semelhantes que é invariante, universal, mas a organização desse comportamento (1998, p. 172).

Vejamos um exemplo de um possível esquema em Física⁴. É o referente a como alguns estudantes universitários resolvem situações (problemas) de corpos em colisão. Independentemente da origem da colisão, existe um comportamento, uma organização da atividade que é invariante em vários estudantes: uma identificação dos corpos em situação de colisão, uma avaliação do estado de movimento dos mesmos (ou seja, se os dois estão em movimento, ou se um deles está em repouso, por exemplo) e uma avaliação posterior do tipo de movimento dos corpos após a colisão. Nesse processo, são identificadas algumas variáveis consideradas relevantes (massa, ângulos, velocidades), determinadas pelo conhecimento-em-ação do sujeito (os *invariantes operatórios*, *conceitos-em-ação* e *teoremas-em-ação*, que definiremos a seguir) e com estes elementos se leva adiante a resolução do problema. O esquema recorre a atividades perceptivo-motoras e a construções conceituais. Os conhecimentos-em-ação articulados nos esquemas não precisam ser verdadeiros, desde o ponto de vista científico, senão eficientes. Nesse esquema em particular os conhecimentos-em-ação que estavam detrás dos raciocínios e atividades destes estudantes não o eram. Por exemplo, identificavam a energia como alguma coisa que podia ser transferida, uma espécie de substância que passando de um corpo para outro provocava o movimento daquele que estava em repouso. Vejamos.

SITUAÇÃO: Considere dois pêndulos, ambos fixados num mesmo ponto, um deles inicialmente em repouso, que batem. Indique que acontecerá com os mesmos, considerando o caso em que ambos tem a mesma massa e o caso em que têm massas diferentes.

⁴ Este exemplo foi tomado de uma pesquisa sobre modelos mentais na área de Mecânica (Lagreca, 1997; Greca e Mallmann, 1997). Aliás, todos os exemplos em Física que utilizaremos neste trabalho são re-interpretações de resultados de pesquisas obtidos a partir de outro referencial teórico.

“... esta vai bater nesta, a energia mecânica vai se conservar, então a energia cinética desta aqui que é massa vezes velocidade ao quadrado sobre dois, vai ser igual a energia mecânica do sistema aqui, ou melhor, se esta está em repouso tenho mgh... A bola que bateu faz com que a que esteja parada se movimente porque... porque... transferência de energia.” (Sandra, Lagreca, 1997, p. 57)

“A energia desta bolinha que tá descendo vai ser transferida toda para esta daqui, então no caso a que desce bate e fica parada e essa outra sobe.” (Elias - ibid.)

“No segundo caso, como a massa dela é menor, ela vai voltar prá cá e não vai mexer com esta bola grande. Porque isto ocorre? ... Bom, ocorre uma transferência de energia. Quer dizer que a energia cinética que tem esta aqui vai passar prá esta aqui e a energia potencial que tinha esta aqui, vai ficar com esta aqui, então esta aqui fica parada e esta continua aqui.” (Gabriela - ibid.)

Outros estudantes, frente a situações semelhantes, pareciam ativar outros esquemas, onde o fundamental era a identificação de forças (Lagreca e Moreira, 1999).

Os esquemas evocados pelo sujeito numa dada situação ou frente a representações simbólicas é o que constitui o sentido dessa situação ou representação para esse indivíduo. (Vergnaud, 1990, p. 158). Frente a uma situação nova, vários esquemas podem ser evocados sucessiva ou simultaneamente a fim de dar-lhe sentido. O sentido inicial e, em decorrência, a conduta do sujeito, em uma dada situação se embasam sobre o leque de esquemas iniciais que ele possui. Por isso, para Vergnaud o desenvolvimento cognitivo consiste sobretudo, e principalmente, do desenvolvimento de um vasto repertório de esquemas (1996c, p. 203) que permitam aos sujeitos enfrentar e dominar a gama de situações que se lhe apresentem.

Segundo como "funciona" o esquema, Vergnaud (1993, p.2) distingue duas classes de situações: as classes de situações em que o sujeito dispõe, no seu repertório, em dado momento, e sob certas circunstâncias, das competências necessárias ao tratamento relativamente imediato da situação, e as que não dispõe das competências necessárias, o que obriga a um tempo de exploração e reflexão. Na primeira classe, entram em jogo condutas amplamente automatizadas, enquanto que na segunda, o sujeito deve por em jogo vários esquemas de seu repertório para tentar resolver a situação, e que deverão ser acomodados, descombinados ou recombinaados até atingir a meta.

Quatro são os ingredientes de um esquema (1990, p. 136):

- 1- objetivo do esquema ou as metas e antecipações: um esquema se dirige sempre a uma classe de situações nas quais o sujeito pode descobrir uma possível finalidade da sua atividade;
- 2- regras de ação e controle: são regras do tipo " se ...então" que permitem a geração e a seqüência de ações do sujeito;
- 3- invariantes operatórios (teoremas-em-ação e conceitos-em-ação): constituem os conhecimentos contidos nos esquemas, dirigem a busca da informação pertinente para a detecção de metas e das regras adequadas à ação;
- 4- possibilidades de inferência (ou raciocínios): permitem calcular as regras e antecipações em uma situação concreta.

Destes quatro elementos que constituem os esquemas, somente os invariantes operatórios são indispensáveis na articulação entre a prática e a teoria (Vergnaud, 1998), ou seja, entre uma situação que o sujeito enfrenta e o conhecimento-em-ação que possui para poder resolvê-la. (Isto será o ponto de articulação que utilizaremos entre esta teoria e os modelos mentais).

Centraremos agora nossa atenção nos invariantes operatórios, o conhecimento-em-ação contido nos esquemas. Segundo Vergnaud (1998, p. 168): um teorema-em-ação é uma proposição que se supõe verdadeira e um conceito-em-ação é um objeto, um predicado ou uma categoria de pensamento tida como relevante. Estes invariantes operatórios formam a articulação essencial entre a prática e a teoria, uma vez que a percepção, a procura e a seleção de informação se embasam por inteiro no sistema de conceitos-em-ação disponíveis pelo sujeito e os teoremas-em-ação subjacentes na sua conduta. Há uma relação dialética entre conceitos-em-ação e teoremas-em-ação, uma vez que os conceitos são ingredientes de teoremas e teoremas são propriedades que dão aos conceitos seus conteúdos. Embora os conceitos sejam integrantes das proposições eles não permitem derivações (inferências ou computações); as derivações requerem proposições. As proposições podem ser verdadeiras ou falsas e os conceitos podem ser apenas relevantes ou irrelevantes. Os dois são indispensáveis para guiar a ação do sujeito, porque para que ela aconteça é preciso derivar inferências sobre a representação e estas dependem das concepções adequadas que sobre ela se tenha. Vejamos algumas situações em campos conceituais da Física:

SITUAÇÃO A: *Um conjunto de sistemas atômicos, preparados todos do mesmo modo, é submetido a uma série de medidas de energia, obtendo-se para alguns sistemas E_1 , para outros E_2 , etc. Como se pode interpretar tal resultado?*

Resposta de um aluno: *"Significa que alguns átomos estavam em um estado de energia mais excitado que outros"* (Greca, 2000, p. 182)

Vários conceitos-em-ação implícitos distintos parecem terem sido usados pelo estudante: sistemas atômicos, estado de um sistema, estado inicial e final, medição, resultado de uma medição, níveis de energia. O raciocínio depende também de um forte teorema-em-ação -- verdadeiro para o mundo macroscópico -- que pode ser expressado como:

estado do sistema antes de uma medida = estado do sistema após uma medida,

ou, o que é equivalente:

resultado da medida = estado do sistema (antes e após a medida).

Como este teorema-em-ação somente vale no âmbito da Física Clássica a resposta do aluno não é correta. Mais ainda, este teorema-em-ação dificulta a compreensão do processo da medida no domínio microscópico (Greca e Herscovitz, 2000).

SITUAÇÃO B: *Descreva o movimento de dois blocos quadrados de diferentes massas unidos por um fio, que são colocados inicialmente em repouso sobre uma rampa inclinada.*

Resposta de um aluno: *"Para a velocidade ser constante, a aceleração tem que ser zero, né? Então a força tem que ser também zero, não pode ter forças externas ao sistema, a força mg teria que ser contrabalançada com a força de atrito e a somatória das duas ser zero, daí tenho velocidade constante."* (Gabriela - referente ao problema 2; Greca e Mallman, 1997)

Para compreender este raciocínio, temos que supor vários teoremas-em-ação implícitos. Um deles, possivelmente um dos mais fortes no estabelecimento de relações entre eventos no mundo decorre do princípio de causalidade:

"Para que um corpo esteja em movimento, deve existir um agente responsável".

Outro poderia ser expresso como a tríade

velocidade constante ? aceleração nula ? força nula.

Este exemplo, aliás, serve para estabelecer uma certa "classificação" dos esquemas. Como fora indicado anteriormente, a maioria dos esquemas são eficientes, embora não necessariamente efetivos. Os algoritmos resultam ser casos especiais de esquemas que são efetivos para o sujeito resolver certas classes de situações, efetividade que deriva da relação estabelecida entre as características dos problemas a serem resolvidos e o conjunto de regras estabelecidas para resolvê-lo (Vergnaud, 1998). Os esquemas podem virar algoritmos quando o sujeito se dá conta que o uso de certas regras, para determinados tipos de problemas, é efetivo. No exemplo acima, a tríade se converte em um algoritmo de resolução que os estudantes utilizam para certos problemas de mecânica. Os estudantes parecem ser bastante hábeis no estabelecimento de algoritmos de resolução para as classes de situações (exercícios) que lhe são apresentados em aula. Esses algoritmos são utilizados repetidamente para tratar as mesmas situações; eles se transformam em hábitos (1998, p. 176). É bom destacar que serem efetivos não necessariamente significa que sejam completamente corretos desde o ponto de vista científico.

O conhecimento contido nos esquemas, o conhecimento para a ação -- conceitos-em-ação e teoremas-em-ação -- permanece em geral totalmente implícito, pois ele se orienta para o desenvolvimento de competências, para o saber fazer, em vez do desenvolvimento de conceitualizações. Por isso os conceitos-em-ação e os teoremas-em-ação não são nem verdadeiros conceitos nem verdadeiros teoremas, pois na ciência, conceitos e teoremas são explícitos e pode-se discutir sua pertinência e sua veracidade, mas esse não é necessariamente o caso dos invariantes operatórios (1990, p. 144). No entanto, sem eles, a conceitualização não seria possível. Vergnaud (1990) compara os conhecimentos explícitos com a ponta de um *iceberg* da conceitualização: sem a parte oculta dos invariantes operatórios esta nada seria. E, por outra parte, sem a ajuda do conhecimento explícito, demonstrado no uso de proposições, funções proposicionais, não poderíamos conhecer os invariantes operatórios associados aos esquemas. Em geral, os alunos não são capazes de explicar ou mesmo expressar em linguagem natural, os teoremas e conceitos-em-ação que eles utilizam para a identificação dos elementos pertinentes e para o estabelecimento da seqüências de cálculos que devem ser efetuados. Este conhecimento permanece implícito e, desta forma, resulta difícil de ser modificado. Por isso, o objetivo do ensino seria a construção de conceitos e teoremas explícitos e gerais, sendo "*palavras e símbolos, sentenças e expressões simbólicas, instrumentos cognitivos indispensáveis para a transformação dos invariantes operatórios implícitos em teoremas e conceitos*" (1990, p. 21)⁵. No entanto, esta transformação de invariantes operatórios em palavras e texto ou em qualquer outro sistema semiótico (gráficos, diagramas, notação algébrica,...) não é direta, pois existem importantes lacunas entre aquilo que é representado na mente do indivíduo e o significado usual das palavras (Vergnaud, 1998).

Para finalizar esta seção é interessante vincular estes invariantes operatórios com outros construtos aparecidos na literatura em ensino de ciências para explicar o conhecimento "intuitivo" dos estudantes. Os invariantes operatórios se assemelham aos *p-prims* de diSessa (1993) (elementos do sistema cognitivo emergentes da organização de estratégias perceptuais para a compreensão do mundo e que constituem a causalidade da física intuitiva dos estudantes, organizados em forma limitada); aos *schemata* matemáticos de Sherin (1996) (conjunto de estruturas que envolvem só

⁵ Esta questão tem implicações interessantes para o tipo de ensino que caracteriza uma parte importante da abordagem tradicional ao ensino de Física. Como se sabe, sobretudo ao nível de graduação, este ensino se caracteriza por uma forte tendência formalista. Se o formalismo exige a expressão explícita de todos os conteúdos, então poderia ser uma forma interessante de ensino. Porém, o problema da tendência formalista reside na sua dificuldade para perceber que as idéias físicas e matemáticas crescem e mudam sobre longos períodos de tempo e que o conhecimento axiomatizado só pode aparecer graças à parte oculta do *iceberg* (Vergnaud, 1990), sendo, portanto, uma etapa fundamental no processo de conceitualização.

algumas poucas entidades matemáticas e um número pequeno de relações entre elas, que estariam na base da compreensão e geração de equações por parte de estudantes universitários) e aos *facets* de Minstrell (1992) ("pedaços" de conhecimento-- conceitual, estratégico e genérico -- dos estudantes, que estes utilizariam para enfrentar uma situação em particular)

Segundo o que temos apresentado até agora, os conceitos-em-ação do sujeito não são verdadeiros conceitos. O que são então os conceitos, os verdadeiros conceitos, nesta teoria? Vergnaud adere à visão de que os conceitos são basicamente relacionais e se referem a um conjunto de situações, invariantes operatórios e suas propriedades que podem ser expressas por diferentes representações lingüísticas e simbólicas (1998, p. 177). Assim, os conceitos podem ser definidos como um triplete de três conjuntos (1990, p. 145; 1997, p. 6),

$$C = (S, R, I), \text{ onde } :$$

S é um conjunto de situações que dão sentido ao conceito. Tais situações formam o *referente* do conceito;

I é um conjunto de invariantes operatórios associados ao conceito, que permitem ao sujeito analisar e dominar as situações do primeiro conjunto. Constituem o *significado* do conceito;

R é um conjunto de representações simbólicas (linguagem natural, gráficos e diagramas, sentenças formais, etc) que servem para representar de forma explícita os invariantes operatórios. Essas representações compõem o *significante* do conceito.

Segundo Vergnaud, é através das situações e dos problemas que um conceito vai, paulatinamente, adquirindo sentido para o sujeito, pois é a partir dessas situações e problemas que o sujeito vai abstraindo as propriedades que conformarão seus conceitos-em-ação e teoremas-em-ação. Na medida em que esses invariantes operatórios podem ser expressos em forma explícita, por meio de seus significantes, esses invariantes passam a conformar conceitos.

Consideremos, por exemplo, o conceito de superposição linear de estado na Mecânica Quântica. O significante do mesmo pode ser constituído das seguintes representações simbólicas:

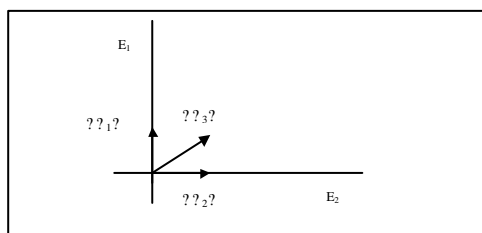
? Em linguagem vetorial - onde cada vetor representa um estado puro - o princípio de superposição pode ser expresso como segue:

Se os vetores $|?_1\rangle$ e $|?_2\rangle$ representam possíveis estados (puros) de um sistema, qualquer vetor $|?_3\rangle = c_1|?_1\rangle + c_2|?_2\rangle$ representa também um possível estado do sistema.

? Dado um certo sistema físico, é possível encontrar um estado em que esse sistema exista em uma configuração que resulta da superposição de dois (ou mais) autoestados diferentes de um dado operador.

? Qualquer vetor no espaço de estados pode representar possíveis estados físicos, e todos podem ser escritos como combinação linear de vetores do espaço $\sum_i c_i |?_i\rangle$.

? Representação gráfica do princípio de superposição linear em um espaço de duas dimensões



Pois bem, para que o conceito de superposição de estados adquira sentido para os estudantes, eles devem confrontar-se com diversas situações passíveis de serem explicadas a partir, ou junto com, o princípio de superposição, de forma que possam extrair os invariantes dessas situações. Algumas situações que poderiam ser apresentadas aos estudantes poderiam ser, entre outras, experiências como a de Young para objetos microscópicos, a de Stern-Gerlach, o paradoxo do Gato de Schrödinger, a computação quântica e a teleportação. A partir dos conceitos-em-ação e teoremas-em-ação extraídos dessas situações, o conceito pode começar a ter sentido para o estudante. Por exemplo, no caso do problema dos sistemas atômicos antes apresentado, a resposta do estudante resulta da aplicação de um esquema que o estudante tem como válido no âmbito macroscópico e que transfere para o âmbito microscópico. No entanto, a resolução correta dessa situação envolve a explicitação do princípio de superposição linear de estados dentro da Mecânica Quântica, ou seja, requer a construção e aplicação de um outro esquema.

Para estudar o desenvolvimento e uso de um conceito, ao longo da aprendizagem ou de sua utilização, é necessário usar esses três conjuntos simultaneamente. Por outro lado, não há em geral correspondência biunívoca entre significantes e significados, nem entre invariantes e situações (Franchi, 1999, p. 173), não se pode, portanto, reduzir o significado nem aos significantes nem às situações (1990, p. 146). Além disso, uma situação não pode ser analisada com um só conceito.

Quando os estudantes operam com determinados conceitos, por exemplo quando sabem calcular o movimento de um certo corpo, muitas vezes o que utilizam são somente os invariantes operatórios. Ou seja, os conceitos necessários para resolver essas situações são instrumentos da ação do sujeito. No entanto, saber dizer o que está fazendo, explicar qualitativamente o problema ou expressar o conceito de força, que tanto trabalho custa aos estudantes, leva a efetuar uma passagem do conceito como instrumento ao conceito como objeto de pensamento. *"Não requer o mesmo nível de conceitualização saber calcular a velocidade dividindo um espaço por um tempo, expressar em forma lingüística a idéia de que a velocidade é proporcional à distância quando a duração se mantém constante, ou que a distância é uma função bilinear da duração e da velocidade e expressar esta idéia por uma fórmula"* (Vergnaud, 1996c, p.204). Em alguma medida, na instrução se dá a relação dialética entre o desenvolvimento da forma operatória do conhecimento e a forma predicativa desse conhecimento, ou seja, saber explicitar os objetos, os conceitos e suas propriedades (Vergnaud, 1996b, p. 13)⁶.

Uma nova proposta

Os elementos dos esquemas contêm a informação que a pessoa tem acerca do mundo; mas como este conhecimento pode converter-se em uma representação suficientemente dinâmica de modo a formar um modelo do mundo que possa rodar e, portanto, predizer e explicar? A solução de Vergnaud é incluir dentro dos esquemas processos de inferência. *"Totalidade dinâmica e funcional, o esquema abrange regras de ação e antecipações. Isto, porém, só é possível, porque uma representação implícita ou explícita do real analisável em termos de objetos, categorias-em-ação (propriedades e relações) e teoremas--em--ação, é parte integrante do esquema. Tais invariantes operatórios organizam a busca da informação pertinente em função do problema a resolver ou do objeto a atingir, além de balizar as inferências"* (Vergnaud, 1993, p.25). O problema com essa idéia é que, novamente, aparecem misturados elementos de uma representação mais estável com elementos de representações mais dinâmicas.

⁶ No entanto, a ênfase em grande parte da abordagem tradicional privilegia a forma operacional (resolução de longas listas de exercícios) em detrimento da conceitual.

Acreditamos que uma saída viável seja articular os esquemas de Vergnaud com os modelos mentais. Nossa proposta propõe que enquanto os esquemas se mantêm como estruturas na memória de longo prazo, com os teoremas e conceitos em ação (sendo que estes teoremas e conceitos em ação contêm informação tanto de propriedades do mundo físico como de relações matemáticas), no momento de enfrentar-se com uma situação nova os sujeitos geram representações na memória de curto prazo, os modelos mentais da situação em questão, modelos de trabalho para a resolução da tarefa. Ou seja, partimos da idéia de considerar os modelos mentais como representações mediadoras entre a situação e o conhecimento que o sujeito possui. Os conceitos-em-ação e os teoremas-em-ação guiam o processo de construção dos modelos mentais, na medida em que determinam os elementos da situação que resultam relevantes para o sujeito – ou seja, os elementos da situação que devem ser representados -- e as propriedades que sobre eles podem ser aplicadas. O conhecimento-em-ação do sujeito determina aquilo que pode ser percebido da situação. Veja-se que o modelo mental⁷ pode ser resultante de invariantes operatórios de diferentes esquemas que, ao mesmo tempo, podem ser usados pelo sujeito para a compreensão de uma situação e sua ação sobre ela. Os teoremas-em-ação na nossa proposta determinam as relações fundamentais estabelecidas no momento da rodagem dos modelos mentais. Na linguagem computacional, esses teoremas--em-ação se corresponderiam com as sentenças ou comandos que em uma simulação guiam sua rodada. Os teoremas--em-ação se correspondem com as representações proposicionais do modelo de Johnson-Laird. Como elas, só podem ser verdadeiros ou falsos. Uma vez que os modelos mentais são gerados, manipulados e rodados, eles fornecem as regras de ação e controle que determinam as seqüências de ações do sujeito.

Ao considerar os esquemas como estruturas na memória de longo prazo, estamos colocando fora do esquema as inferências que são efetuadas frente a cada situação nova e, portanto, não fazem sentido estar guardadas. Essas inferências acontecem nos modelos mentais, sendo a tarefa fundamental dos modelos mentais a de fazer inferências e predições frente a cada situação nova em particular. Ou seja, os modelos mentais resultam no espaço em que os esquemas operatórios dos indivíduos manipulam as representações da realidade com o objetivo de agir sobre ela.

A relação entre os modelos mentais e os esquemas é uma relação dialética. Por uma parte, a leitura da realidade a partir do conhecimento-em-ação do sujeito determina os modelos mentais, mas o processo de "comparação" entre os resultados desses modelos (explicações, predições) e a solução, o resultado efetivo da situação em si pode levar a modificações nos invariantes do sujeito devido a inconsistências entre o modelo mental e a situação, ou na procura de coerência entre seu pensamento e os dados do mundo exterior. Quer dizer, quando um sujeito enfrenta uma situação nova, a discordância entre as inferências decorrentes do modelo mental que constrói a partir dos invariantes existentes em seus esquemas e a situação em si, pode levá-lo à modificação dos modelos. A detecção de invariantes nesses modelos mentais levará à construção de esquemas apropriados para a resolução dessas classes de situações, que então já não serão novas.

Na detecção de discordâncias que permitem aprimorar recursivamente os modelos mentais e, eventualmente, os esquemas subjacentes, a interação entre sujeitos -- pares ou professor -- tem um papel fundamental. A necessidade de compartilhar significantes e significados com estes "outros" permitiria detectar as discordâncias, atuando assim como apoios "metacognitivos" para a apropriação dos significados necessários para a formação dos verdadeiros conceitos. Sorzio (1995), a partir de uma abordagem sócio-cultural, indica que ainda que os modelos mentais sejam representações internas individuais e não possam ser diretamente compartilhadas, os modelos defeituosos e incompletos dos estudantes podem ser expressos e representados em um nível interpsicológico: *"O processo de representação recursiva, ao nível intermental, permite aos seres humanos compartilhar perspectivas de nível mais alto e é essencial para a aquisição do conhecimento, pois permite duvidar e descrer"* (Sorzio, op. cit., p. 22).

⁷ Estes modelos mentais podem ser analógicos ou parcialmente analógicos e parcialmente proposicionais.

Nesta abordagem, as situações podem, então, ser divididas em duas classes: 1) as situações já conhecidas pelo sujeito, que exigem uma ação automatizada (algorítmica) por ele e, portanto, não demandam do sujeito novas inferências, não requerem a formação de modelos mentais. Diretamente é possível aplicar as regras *se...então* que estão contidas nos esquemas. 2) as situações novas, desconhecidas, cuja conduta não está automatizada e que requerem inferências novas e, portanto, a formação de modelos mentais; e mesmo as conhecidas, desde que seja necessária a elaboração de inferências novas e, portanto, a elaboração de novas regras de ação.

Assim estamos propondo a existência de dois grandes tipos de representações, necessárias para a apreensão do mundo por parte do sujeito: os esquemas e os modelos mentais. Os mecanismos de construção dos modelos mentais resultariam, em boa medida, da aplicação das regras contidas nos esquemas -- os teoremas-em-ação -- e os mecanismos de modificação dos esquemas -- como o mundo externo influencia nas representações internas do sujeito --, estariam dados pela procura de consistência e coerência dos resultados dos modelos mentais (predições, inferências, explicações) em relação aos acontecimentos do mundo. Além destas duas representações, o sujeito disporia dos algoritmos, dos hábitos e das regras *se ... então*, como representações ainda mais estáveis que os esquemas e características de condutas total ou parcialmente automatizadas.

Em relação às imagens mentais, que formam parte da estrutura dos modelos mentais na teoria de Johnson-Laird, poder-se-ia pensar que elas proveriam uma espécie de quadro simplificado da realidade externa (ou interna), a partir dos elementos escolhidos pelos conceitos--em--ação da situação em si. As imagens mentais seriam construídas então a partir da "leitura" da situação através das lentes dos conceitos-em-ação do esquema que o sujeito considera apropriado aplicar⁸. Dessa forma a imagem se converteria no foco onde o sujeito se concentraria para analisar as propriedades particulares dos objetos ou situações reais ou imaginárias. Os esquemas dos indivíduos, em particular seus teoremas-em-ação, operariam sobre esta representação da realidade para produzir um modelo mental, i.e., um modelo de trabalho. Dessa operação resultariam as inferências que o sujeito realiza. Ou seja, as imagens mentais não possuiriam a capacidade de gerar ações sobre as situações; elas fornecem o "espaço" a partir do qual os teoremas-em-ação do sujeito transformam a própria imagem em um modelo de trabalho (uma espécie de autotransformação), representação, esta sim, com a capacidade de gerar inferências, que guiarão a ação do sujeito. Assim propomos a articulação de diferentes tipos de representações internas que o sujeito utilizaria para a compreensão do mundo: esquemas, modelos mentais, *scripts*, representações proposicionais, imagens, regras "se...então", cada uma delas tendo uma função e uma gênese particulares.

Uma forma de pensar nossa proposta é compará-la com o que acontece com os computadores analógicos⁹. Os computadores analógicos são dispositivos que dependem das relações analógicas que existem entre a quantidade física associada a um computador e as quantidades físicas associadas ao problema particular que se quer estudar, podendo ser pensados como "simuladores" do sistema físico envolvido no problema. Esta é uma ferramenta muito valiosa quando os sistemas em estudo são tão complexos e não lineares que a formulação de modelos matemáticos para descrevê-los é muito difícil. Os computadores analógicos são criados para resolver classes de problemas semelhantes sendo que cada classe de problemas estabelece um determinado isomorfismo com o dispositivo que a resolve e são contínuos. Os computadores analógicos são construídos a partir dos modelos físicos que, em uma primeira aproximação, servem para descrever uma situação particular, utilizando para isso isomorfismos entre aquilo que

⁸ De forma semelhante, poder-se-ia pensar que ao lembrarmos de uma situação antiga na forma de imagens mentais a lembrança resulta também da leitura dessa situação à luz de esquemas com os quais estamos nos lembrando. Quando revisamos nossas lembranças a partir de outros esquemas, as imagens que obtemos são diferentes.

⁹ Na verdade, a comparação que vamos a utilizar é válida para qualquer tipo de modelos de sistemas físicos, não só para os analógicos. No entanto, utilizamos este em particular pela sua analogia com os modelos mentais (Greca, 2000).

efetivamente mede e as variáveis físicas que simulam. Pense-se no preditor de marés de Kelvin, que utiliza um sistema de engrenagens, alavancas e roldanas para modelar as forças gravitacionais que afetam a altura das ondas e as horas das marés. O computador analógico simula o comportamento do sistema e permite leituras das variáveis. Se os resultados obtidos no modelo analógico em uma situação particular não coincidem com os conhecidos do sistema que simulam, o modelo é modificado. Se estas não coincidências acontecem de forma sistemática, podem levar a mudanças também no modelo físico que está por trás da simulação. Nosso "computador analógico" são os modelos mentais que construímos para resolver uma dada situação, a partir de invariantes operatórios, do "modelo físico" e dos dados percebidos, "lidos" da situação. Da coincidência ou não do confronto entre as inferências resultantes do modelo mental e os acontecimentos do mundo exterior, os modelos podem ser mudados. Se essa mudança acontece de forma sistemática, levará a que os próprios esquemas sejam mudados, desde que novos invariantes possam ser derivados das situações enfrentadas.

Em resumo, o conhecimento encontra-se organizado em campos conceituais, cujo domínio, por parte do aprendiz, acontece ao longo do tempo. Este domínio está vinculado em parte ao repertório de esquemas operatórios que o sujeito pode construir para resolver distintas situações; estas situações formam, em boa medida, o campo conceitual. A explicitação dos invariantes operatórios do sujeito, em alguma linguagem simbólica, determina o que se define como conceito, sendo que o conceito adquire significação a partir das situações que o sujeito enfrenta e que lhe permitem detectar os invariantes. Este processo de detecção e mudança dos invariantes acontece no âmbito dos modelos mentais, que são o espaço em que os esquemas operatórios dos indivíduos manipulam as representações da realidade com o objetivo de agir sobre ela.

O que essa proposta explica

Nesta seção vamos, rapidamente, indicar o que, no nosso entender, pode-se ganhar com esta proposta (campos conceituais + modelos mentais) em relação às abordagens já existentes na área, ou seja, indicaremos que tipo de problemas já estudados por outras propostas ela pode explicar e em que avança em relação às mesmas.

? Em primeiro lugar, a proposta aqui apresentada identifica, em forma clara, distintos níveis de representação e diferentes classes de representações, estabelecendo os mecanismos que guariam o uso e a mudança dos mesmos. Nesse sentido, ela avança em relação aos enfoques de Vosniadou ou das teorias implícitas. Aqui caberia perguntar-se o porque da necessidade de discriminar as diferentes formas representacionais. Por exemplo, para Sherin (2001) é mais importante conhecer os conteúdos das diferentes representações em vez de estudar ou discutir as formas representacionais em que tais conteúdos estão representados. No entanto, consideramos que esta identificação permite distinguir entre diferentes comportamentos detectados nas explicações dos estudantes ou nas formas de resolução de problemas, permitindo-nos assim entender com maior clareza algumas características do conhecimento envolvido nestes processos como por exemplo, os diferentes graus de dificuldade para aplicar ou aprender certos conceitos científicos. Possivelmente a primeira destas propriedades seja justamente a necessidade de considerar, ao estudar os processos cognitivos dos sujeitos, múltiplas representações, cada uma delas necessárias para compreender as variadas habilidades que os mesmos apresentam (Markman, 1999)

? Outra vantagem desta abordagem é localizar no espectro das representações aquelas que guiam a compreensão dos procedimentos matemáticos, os algoritmos e fórmulas, que os estudantes usam, o que nenhum dos enfoques antes descrito atende de forma explícita. Assim como Vergnaud, aderimos à idéia que, pelo menos nos primeiros estágios, a compreensão matemática não difere da compreensão do mundo físico; ambas decorrem do processo de conceitualização do real. Desta

forma, os *schematas* que estudantes universitários utilizariam para a compreensão e elaboração de equações matemáticas (Sherin, 2001) seriam os invariantes resultantes desse processo de conceitualização do real. Por outra parte, é muito freqüente que, na resolução de problemas, os estudantes não utilizem nenhuma estratégia em particular, senão fórmulas indiscriminadamente, simplesmente por terem identificado no problema o nome de alguma variável que aparece em alguma fórmula (Costa e Moreira, 2002). Nestes casos, não existiriam esquemas eficientes para o estudante solucionarem a situação, usando fórmulas aprendidas de memória, sem significado para eles.

? Parece-nos também que esta proposta define melhor o que seja um conceito, pelo menos conceitos científicos (como dizem di Sessa e Sherin, 1998, conceitos como pato e campo elétrico não parecem ser da mesma espécie)¹⁰. Aparece em forma explícita o que se está entendendo por conceito, separando o saber o que um conceito significa (mediante a expressão em algum sistema simbólico) da competência que pode se ter para aplicá-lo, problema largamente detectado no ensino de ciências, assim como são explicitados os mecanismos de aprendizagem destes conceitos e de mudança dos mesmos. Em pesquisas desenvolvidas junto ao referencial dos modelos mentais (Greca e Moreira, 1997, 1998; Greca, 2000) encontramos que, tanto no âmbito da Eletricidade e do Magnetismo, quanto no caso da Mecânica Quântica existiam estudantes que, embora aparentemente conseguindo compreender os conceitos, no sentido de aplica-los corretamente às situações, ou seja, tendo a competência necessária para usa-los adequadamente, só conseguiam explicitar os mesmos desde que atrelados a situações específicas. O saber o que os conceitos significavam estava preso a certas situações particulares, enquanto que outros estudantes conseguiam uma explicitação aparentemente independente do problema. Assim, no exemplo a seguir, em relação ao conceito de distribuição de probabilidades em Mecânica Quântica, o primeiro estudante dá uma definição vinculada à forma em que calcula a distribuição de probabilidades do observável posição para o elétron, enquanto que para o segundo, a função de probabilidade é associada a qualquer observável de qualquer sistema microscópico.

"A distribuição de probabilidades me permite saber onde é mais provável que o elétron se encontre. Assim, existe uma certa probabilidade de se encontrar o elétron em uma caixa (elétron confinado). Assim como existe uma probabilidade de que uma partícula atravesse um potencial. A densidade de probabilidade é dada por $\psi(x)^2$."

"A função de onda, que descreve o comportamento de uma partícula quântica, dá a densidade de probabilidades de resultados de medições a respeito de determinada característica da partícula." (Greca, 2000, p. 135 e 155)

Dentro desta abordagem, isto pode ser explicado na medida em que podemos enunciar que estes conceitos dos estudantes são ainda conceitos e propriedades-em-ação, que lhes permitem dar sentido a diferentes situações, porém ainda não conseguem, no processo de explicitação, se desvincular do conceito como instrumento para considerá-lo como objeto do pensamento. Isto restringe o âmbito de aplicabilidade do conceito.

? Esta abordagem consegue compatibilizar dois dados aparentemente contraditórios. Gutierrez (2001) relembra que alguns autores -- entre eles, Chi et al. (1994) -- consideram a mudança conceitual como difícil devido à dificuldade de mudança dos pressupostos ontológicos¹¹ dos sujeitos, enquanto que os dados por ela obtidos mostrariam que a modificação destes princípios nos modelos mentais é uma tarefa relativamente fácil. Vemos aqui o porque da necessidade de

¹⁰ Aliás, a definição de Vergnaud sobre os conceitos é quase idêntica à proposta dos conceitos como classes coordenadas de di Sessa e Sherin (1998).

¹¹ Os pressupostos ontológicos estariam encapsulados nos teoremas-em-ação dos esquemas.

separação entre estruturas dinâmicas e estruturas mais fixas. Certamente, os modelos mentais podem ser modificados de forma relativamente fácil, tendendo a eliminar as diferenças entre as suas predições e os acontecimentos do mundo. No entanto, isso não é um processo que automaticamente modifique os conceitos e teoremas--em-- ação dos sujeitos. Dependendo da estabilidade desses conhecimentos em ação, eles poderão ser mudados de forma mais ou menos rápida. Por isso, as duas evidências não são contraditórias, senão que se referem a processos de mudança em classes diferentes de representações.

? Esta relação permite também entender porque a aprendizagem de novos esquemas, surgidos da reestruturação, é uma tarefa difícil. Como indicamos anteriormente mudanças nos modelos mentais, destinadas a compatibilizar as predições e explicações dos sujeitos em relação a certas circunstâncias, não levam necessariamente a uma reestruturação de esquemas. Para que isto aconteça, os modelos gerados devem ser repetidamente não satisfatórios para que possam ser detectados invariantes nos mesmos e, com isso, possibilitar a mudança dos esquemas. Possivelmente isto exija o desenvolvimento de ferramentas metacognitivas que monitorem as inconsistências e incoerências dos modelos mentais e associem as mesmas a determinados teoremas ou conceitos-em-ação. A isto se soma a dificuldade de verificação das inconsistências dos modelos mentais em Ciência em geral, e em Física em particular, pois esta verificação envolve, além da verificação da representação das entidades e das relações entre elas, a dos elementos conceituais. Ou seja, a percepção, que surge de certos esquemas e que determina os comportamentos dos sujeitos (a forma de resolução de problemas, as explicações, as predições) no caso dos conhecimentos científicos tem que ser mediada por elementos conceituais -- conceitos como sistema, estado, interação, transferência... (Vergnaud, 1990; Moreira, 2002). A percepção em Ciências é mediada por estes elementos conceituais, que fogem à forma intuitiva de percepção. A detecção das inconsistências entre os modelos mentais formados pelo sujeito para dar uma explicação sobre uma situação e a explicação da mesma desde os modelos cientificamente aceitos passa pelo reconhecimento destes elementos conceituais, o que não é, como temos discutido, uma tarefa simples.

? O fato que situações semelhantes desde o ponto de vista científico podem ser vistas a partir de diferentes esquemas pelo sujeito e, portanto, levá-lo a construir diferentes modelos mentais e fazer diferentes inferências, pode explicar a falta de coerência encontrada nas respostas dos alunos ante situações aparentemente semelhantes propostas pelos pesquisadores.

? Alguns autores, como di Sessa (1993), em contraposição à grande tendência na pesquisa em ensino de ciências, têm encontrado evidências de que certos conhecimentos intuitivos dos estudantes servem de âncora para novos desenvolvimentos e, portanto, dever-se-ia insistir na evolução dos mesmos e não na sua mudança. Ele aliás encontra rastros de alguns desses *p-prims* em especialistas em Física. Isto é compatível com a proposta aqui apresentada na medida em que os esquemas podem ser úteis e são a base dos desenvolvimentos posteriores.

Implicações didáticas e para a pesquisa em ensino de Ciências

Como indicamos na Introdução, a questão do ensino embasado em modelos hoje é uma estratégia muito discutida na área de ensino de Ciências e, em particular, no ensino de Física. Dentro do enfoque aqui apresentado, a aprendizagem de modelos físicos e matemáticos, poderia ser entendido da seguinte forma: um determinado modelo físico é útil para resolver uma certa classe de situações à que ele se refere. Se as classes de situações que, desde o ponto de vista científico, seriam resolvidas com a utilização desse modelo físico, são apresentadas aos estudantes em uma seqüência que lhes permita extrair os invariantes que fazem da explicação deles decorrer desse modelo físico, os teoremas e conceitos-em ação que o estudante abstraia dessas situações poderiam se

corresponder com as propriedades do modelo em questão. Ou seja, para que o estudante aprenda um determinado modelo, não basta que seja apresentado a ele, senão que deveriam de ser-lhe apresentadas uma série de situações que lhes permitissem perceber os conceitos, relações e propriedades dos modelos físicos que correspondem aos invariantes operatórios. No mesmo sentido vai a aprendizagem dos modelos matemáticos. Como indica Vergnaud, os campos conceituais da Matemática só podem ser adquiridos mediante um processo de conceitualização do real. Isto aliás coincide com os resultados (poucos) da compreensão das equações em Física. Os estudantes bem sucedidos adquiririam uma compreensão conceitual em relação ao que elas se referem, compreensão embasada em certas relações qualitativas que são vistas através das equações (Sherin, 2001).

No entanto, deve se levar em conta que os modelos físicos, que servem para explicar os fenômenos físicos e cuja compreensão é um dos objetivos do ensino de Física, são simplificações extremas da realidade à luz dos princípios de uma dada teoria. Poder detectar invariantes nas situações que eles se aplicam é um processo muito complexo porque o repertório de esquemas que o estudante possui, e que é a base para a construção dos modelos mentais iniciais, são derivados da sua ação sobre o mundo desde o nascimento e, portanto, muito ricos. Isso pode fazer com que para eles cada situação, explicada desde um determinado modelo físico, seja uma situação diferente e, assim, apliquem às mesmas, esquemas diferentes. Isto aliás é um dos resultados da pesquisa em resolução de problemas (Costa e Moreira, 2001). Como poder detectar regularidades nas situações ou regularidades nas inconsistências entre seus modelos mentais e o mundo, se cada caso é um caso? Quanto mais perto da vida cotidiana sejam as situações apresentadas aos estudantes mais esquemas e hábitos ele deve ter, sendo nestes casos muito difícil conseguir que eles cheguem a formar um conceito científico. Embora não dentro desta proposta, nós elaboramos uma estratégia didática para a aprendizagem de conteúdos de Mecânica Quântica, cuja característica principal residia na apresentação seqüenciada de diferentes situações passíveis de serem resolvidas com o mesmo conjunto de conceitos chaves, com o objetivo de ensiná-los a visualizar os fenômenos microscópicos desde o modelo cientificamente aceito. Propositadamente a unidade didática não tentava estabelecer analogias com o mundo clássico. Esta estratégia, que denominamos de fenomenológica-conceitual, foi, segundo a nossa avaliação, bem sucedida (Greca, Moreira e Herscovitz, 2001; Greca e Freire Jr, 2002).

Dentro desta perspectiva, a modelização, que vem sendo descrita como a estratégia didática por excelência (entre outros, Halloun, 1996; Pozo, 1999; Greca e Moreira, 2002) pode ser entendida como um dos possíveis mecanismos de explicitação dos conceitos e teoremas-em-ação, estágio indispensável para a aquisição dos verdadeiros conceitos científicos. Para modelizar uma situação, os estudantes devem escolher as entidades que formarão parte do modelo e estabelecer as relações entre eles, que servirão de base para as equações que o descrevem. Nesse processo devem, necessariamente, explicitar os conceitos e teoremas-em-ação que possuam. Neste sentido o uso de simulações no ensino de Física, pelo menos em nível de graduação, com programas que permitam aos estudantes escrever as equações que descrevem o modelo pode ser uma ferramenta eficiente na construção dos conceitos científicos. Estas simulações exigem do estudante a explicitação das relações entre os elementos escolhidos para descrever um fenômeno e fornecem o resultado desta sua simulação. A partir deste resultado, que expressa em forma explícita a forma como o estudante percebe e entende o fenômeno, ele pode detectar inconsistências entre seu modelo e o modelo cientificamente aceito.

Outra estratégia bastante difundida no ensino de Física é a utilização de problemas abertos em contraposição aos problemas tradicionais em Física. Nos parece que as duas podem se complementar em tempos diferentes, pois seus objetivos são diferentes. Enquanto na primeira, as situações dos problemas tradicionais estariam direcionadas à detecção dos invariantes por parte dos estudantes e, nesse sentido seriam essenciais ao processo de significação, os problemas abertos, na

verdade, se corresponderiam com o processo de explicitação. Desta forma, os problemas abertos resultam assim estratégias de modelização (Hestenes, 1987)

Em relação à pesquisa, parece interessante, no que se refere aos campos conceituais, determinar quais seriam os mais relevantes de serem apropriados pelos estudantes -- lembrando que o processo de aquisição dos mesmos é um processo complexo, longo e demorado --, a detecção dos conhecimentos em ato que os estudantes desenvolveriam, assim como observar os processos de explicitação dos mesmos. Um cuidado que deve ter-se nesta procura é que frente a uma determinada situação nova, proposta pelo pesquisador, o estudante pode utilizar elementos de diferentes esquemas para 'compor' seu modelo mental.

Outra questão de pesquisa importante é a que se refere ao papel das equações no ensino de ciências, em particular da Física. Se os conceitos e teoremas-em-ação estão fortemente amarrados na percepção, como os estudantes percebem os problemas desde o ponto de vista da Matemática?

Conclusão

A idéia de que a compreensão significativa de situações novas implica a construção de modelos mentais nos parece adequada como premissa de uma visão representacional computacional funcionalista da mente. Esse pressuposto tem fortes implicações para o ensino e a aprendizagem de ciências. Por exemplo, na resolução de problemas, a compreensão significativa do enunciado, que é um requisito indispensável para chegar a uma solução não mecânica, requer a construção de um modelo mental adequado da situação problemática.

Contudo, não nos parece apropriado pensar que o construto modelo mental dê conta de muito mais do que acontece, de imediato, quando o sujeito se depara com uma situação problemática nova. Quer dizer, a idéia de modelo mental que nos parece adequada é a de modelo de trabalho, isto é, algo construído na memória de trabalho: uma representação interna construída, recursivamente, a partir de conhecimentos prévios e novas percepções, cujo único compromisso é a funcionalidade segundo critérios de seu construtor. Uma vez atingido o objetivo da compreensão funcional¹², o modelo mental torna-se descartável, dispensável, pois já cumpriu seu papel. Esta concepção de modelo mental, que é a de Johnson-Laird (1983), tem a grande vantagem de evitar confusões, encontradas com freqüência na literatura com outros construtos representacionais como os *scripts* e as redes semânticas, propostos na Psicologia Cognitiva, com os esquemas de assimilação de Piaget, ou com as chamadas concepções alternativas. Os *scripts*, as redes semânticas, os esquemas de assimilação, têm um certo grau de estabilidade cognitiva, não sendo, portanto, comparáveis com os modelos mentais. Chamar de modelos mentais ao que antes se chamava de concepção alternativa, ou o que psicólogos cognitivos chamam de *scripts*, ou, ainda, o que Piaget chamou de esquema de assimilação não contribui em nada para o avanço da pesquisa em ensino de ciências e para as decorrências didáticas dessa pesquisa. É apenas modismo inconseqüente.

Mas se os modelos mentais só existem na memória de trabalho, seguramente faltam-nos outros construtos e, sobretudo, articulações entre os modelos mentais e esses outros construtos, para uma visão mais compreensiva, ainda que sempre incompleta, do funcionamento cognitivo, em particular na aprendizagem de conceitos científicos. Ou seja, embora hoje se use muito o construto "modelo mental", e o mesmo tenha se mostrado muito útil como instrumento heurístico para explicar a compreensão de uma determinada situação problemática nova, não se pode prescindir de

¹² Obviamente, como professores queremos que essa compreensão seja cientificamente correta, mas da perspectiva do sujeito a funcionalidade do modelo não exige isso.

outros construtos como os *scripts*, as concepções alternativas e os esquemas de assimilação como instrumentos heurísticos adicionais, diferenciando-os, articulando-os e integrando-os teoricamente.

Essa articulação e integração teórica é fundamental se queremos ir além da detecção de modelos mentais dos estudantes. Quer dizer, não basta ficar tentando detectar modelos mentais, assim como não bastou, no passado, ficar detectando concepções alternativas dos alunos.

Nossa proposta articula os esquemas de assimilação de Piaget, tal como são definidos na teoria dos campos conceituais de Vergnaud, com os modelos mentais de Johnson-Laird. Acreditamos que os invariantes operatórios (teoremas e conceitos-em-ação) de Vergnaud, componentes essenciais dos esquemas, são também componentes dos modelos mentais de Johnson-Laird. Contudo, isso não significa que estejamos, inadvertidamente, confundindo esquemas e modelos mentais, ou que estejamos sugerindo que possam ser a mesma coisa. Não, nossa proposta distingue claramente modelos mentais e esquemas, mas os articula e integra através dos invariantes operatórios e da idéia de que são construtos representacionais com distintos grau de estabilidade cognitiva: consideramos que os esquemas são estruturas representacionais com um certo grau de estabilidade na memória de longo prazo, enquanto que os modelos mentais são análogos estruturais de estados de coisas de mundo construídos na memória de trabalho e, por definição, instáveis e funcionais. Para Vergnaud, esquema é a organização invariante da conduta para uma determinada classe de situações. Isso significa que quando o sujeito se depara com situações dessa classe ele já dispõe de padrões de conduta que podem ser evocados (se esses padrões estão automatizados temos *scripts*). Caso contrário, é preciso acomodar (no sentido piagetiano), mas a acomodação não ocorre instantaneamente, nem automaticamente. Deve haver algum mecanismo mediador entre o mundo e o novo esquema de assimilação que resulta da acomodação. Cremos que esse mecanismo é a construção de modelos mentais na memória de trabalho. Ou seja, quando a situação é nova o sujeito constrói modelos mentais para fazer inferências e predições, quer dizer, para compreender e dominar a situação. Quando a situação faz parte de uma classe de situações conhecidas (i. e., já dominadas) o sujeito evoca esquemas de assimilação existentes na memória de trabalho. Nessa linha de raciocínio, diríamos eu frente a uma situação similar a que era nova o sujeito construirá um modelo mental semelhante ao que construiu para a situação nova, mas na medida em que situações similares passam a constituir uma classe de situações o sujeito não está mais construindo "modelos mentais semelhantes" mas sim evocando um esquema (estável) de assimilação construído a partir de modelos (instáveis) mentais iniciais. Pareceria existir um contínuo cognitivo entre modelos mentais e esquemas de assimilação, o que não significa que todo modelo mental dê origem a um esquema de assimilação, nem que a construção de esquemas e modelos sejam processos simples ou que a evolução de modelo para esquema seja trivial. Ao contrário, como diz Vergnaud, o problema central da cognição é a conceitualização e esta se caracteriza pela complexidade.

Nossa proposta não tem a pretensão de resolver tal complexidade, mas sim a de prover um referencial teórico potencialmente útil para nela adentrar, deixando claro que a pesquisa em ensino de ciências não pode limitar-se à detecção daquilo que está em voga, como os modelos mentais, nem ao uso de novas terminologias para velhos construtos como é o caso de chamar de modelos mentais as conhecidas concepções alternativas.

Referências

- Bao, L. e Redish, E. R. (2001). Concentration analysis: a quantitative assessment of student states. *Physical Education Resources, American Journal of Physics Supplement*, 69(7), pp. S45-S53.
- Brown, A. (1995) Advances in learning and instruction, *Educational Researcher*, 23(8), pp. 4-12
- Caravita, S. (2001). Commentary: a re-framed conceptual change theory? *Learning and Instruction*, 11 (4-5), pp. 421-429.

- Chi, M., Slotta, J. & Leeuw, N. (1994) From things to processes: the theory of conceptual change goes learning science concepts. *Learning and Instruction*, 4, pp.27-43.
- Costa, S.S.C. E Moreira, M.A. (1998) Modelagem em resolução de problemas: estudo preliminar. *Atas do VI Encontro de Pesquisa em Ensino de Física*. Florianópolis (CD-ROM), 26 a 30 de outubro, 11 p.
- Costa, S.S.C. E Moreira, M.A.(2001) A resolução de problemas como um tipo especial de aprendizagem significativa. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, 18 (3), pp. 263-277.
- Costa, S.S.C. E Moreira, M.A. (2002). O papel da modelagem mental dos enunciados na resolução de problemas em Física. Aceito para publicação na *Revista Brasileira de Ensino de Física*.
- diSessa, A. (1993) Towards an epistemology of physics. *Cognition and Instruction*, 10 (2&3), 105-225.
- diSessa, A. e Sherin, B. L. (1998) What changes in conceptual change? *International Journal of Science Education*, 20(10), pp.1155-1191.
- Duit, R. (1993) Research on students'conceptions: developments and trends. Proceedings of the 3rd International seminar on Misconceptions and Educational strategies in Science and Mathematics. Cornell University, Ithaca, N.Y.
- Franchi, A. (1999). Considerações sobre a teoria dos campos conceituais. In Alcântara Machado, S.D. et al. (1999). *Educação Matemática: uma introdução*. São Paulo. EDUC. pp. 155-195.
- Galagovsky, L. e Adúriz-Bravo, A. (2001). Modelos y analogías en la enseñanza de las ciencias naturales. El concepto de modelo didáctico analógico. *Enseñanza de las ciencias*, 19(2), pp. 231-242.
- Gentner, D. and Gentner, D. R. (1983). Flowing waters or teeming crowds: mental models of electricity. En D. Gentner e A. L. Stevens (Eds), *Mental Models*, Hillsdale, N. J. : Erlbaum, pp. 99-129.
- Gilbert, J. e Boulter, C. (1998) Aprendendo ciências através de modelos e modelagem. In D. Colinvaux (Org.), *Modelos e educação em ciências*. Rio de Janeiro: Ravel, 12-34.
- Greca, I. M. e Mallmann, L. (1997) Modelos mentais do conceito de força. In ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA EM ENSINO DE CIÊNCIAS, Águas de Lindóia. MOREIRA, M. A et al. (Orgs.) *Atas*. Porto Alegre: Instituto de Física - UFRGS, pp.280-293.
- Greca, I.M. and Moreira, M.A. (1997). The kinds of mental representations — models, propositions and images — used by college physics students regarding the concept of field. *International Journal of Science Education*, 19(6), pp. 711-724.
- Greca, I. M. e Moreira, M. A. (2000). Mental models, conceptual models, and modelling. *International Journal of Science Education*, 22 (1), pp. 1-11
- Greca, I. M.; Moreira, M. A (2002) Mental, physical and mathematical models in the teaching and learning of physics. *Science Education*, 86, pp. 106-121.
- Greca, I. M., Moreira, M. A. e Herscovitz, V. E. (2001) Uma proposta para o ensino de Mecânica Quântica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 1(23), pp. 444-457.
- Gutiérrez, R. (2000) Mental models and the fine structure of conceptual change. In: Proceedings of the INTERNATIONAL CONFERENCE PHYSICS TEACHER EDUCATION BEYOND 2000, 2000, Barcelona.: R. Pints & S. Suriqach- Cd-Rom.
- Fodor, J. (1998). *Concepts. Where cognitive science went wrong*. New York: Oxford University Press
- Halloun, I. (1996). Schematic modelling for meaningful learning of physics. *Journal of Research in Science Teaching*, 14(2), pp. 1019-1041.
- Hestenes, D. (1987) Toward a modeling theory of physics instruction. *American Journal of physics*, 55 (5), pp. 440-454
- Johnson-Laird, P. N. (1983). *Mental Models*. Cambridge, M. A., Harvard University Press.
- Krapas, S., Queiróz, G., Colinvaux, D. & Franco, C. (1997). Modelos: Uma análise de sentidos na literatura de pesquisa em ensino de ciências. *Investigações em Ensino de Ciências*, 2(3), pp.

- Lagreca, M. (1997). *Tipos de representações mentais utilizadas por estudantes de Física Geral na área de Mecânica Clássica e possíveis modelos mentais nessa área*. Dissertação de Mestrado. IF-UFRGS.
- Lagreca, M. & Moreira, M. A. (1999) Tipos de representações mentais utilizadas por estudantes de física geral na área de mecânica clássica e possíveis modelos mentais nessa área. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 21, n. 1, p. 202-215.
- Marín, N. (1999). Delimitando el campo de aplicación del cambio conceptual. *Enseñanza de las Ciencias*, 17 (1), pp. 80-92
- Markman, A. (1999). *Knowledge representation*. Mahwah, N. J.: Lawrence Erlbaum Associates, Publishers.
- Moreira, M. A. (1994). Cambio conceptual: crítica a modelos y una propuesta a la luz de la teoría del aprendizaje significativo. In: Science & mathematics Education for the 21st. Century: Towards innovatory approaches. Concepción, Chile. Atas de...pp. 81-92
- Moreira, M. A. (2002) A teoria dos campos conceituais de Vergnaud, o ensino de ciências e a pesquisa nesta área. Submetido a publicação.
- Pintó, R., Aliberas, J. Gómez, R. (1996) Tres enfoques de la investigación sobre concepciones alternativas. *Enseñanza de las Ciencias*, 14(2), pp. 221-232.
- Pozo, J. I. (1999). Más allá del cambio conceptual: el aprendizaje de la ciencia como cambio representacional. *Enseñanza de las Ciencias*, 17 (3), pp. 513-520.
- Pozo, J. I. e Gómez Crespo, M. A. (1998) *Aprender y enseñar ciencia*. Madrid: Morata
- Rodríguez Palmero, M. L. (2000). Modelos mentales de célula. Una aproximación a su tipificación con estudiantes de COU. Tesis Doctoral. Departamento de Didáctica e Investigación Educativa y del Comportamiento. Universidad de La Laguna.
- Rouse, W. B. e Morris, N. M. (1986). On looking into the black box: prospects and limits in the search for mental models. *Psychological Bulletin*, 100 (3), pp. 349-363.
- Sherin, B. L. (1996). The symbolic basis of physical intuition: a study of two symbol systems in physics instruction. Doctoral Dissertation, University of California, Berkeley.
- Sherin, B. L. (2001). How students understand physics equations. *Cognition and Instruction*, 19 (4), pp. 479-541.
- Sorzio, P. (1995). Cultural representation and individual understanding. *Journal of Russian and East European Psychology*, p. 16-23.
- Tiberghien, A. (1994). Modeling as a basis for analyzing teaching-learning situations. *Learning and Instruction*, vol. 4, pp.71-87.
- Vergnaud, G. (1983). Quelques problèmes théoriques de la didactique a propos d'un exemple: les structures additives. *Atelier International d'Eté: Recherche en Didactique de la Physique*. La Londe les Maures, França, 26 de junho a 13 de julho
- Vergnaud, G. (1987). *Problem solving and concept development in the learning of mathematics*. E.A.R.L.I. Second Meeting. Tübingen.
- Vergnaud, G. (1990). La théorie des champs conceptuels. *Recherches en Didactique des Mathématiques*, 10 (23), pp. 133-170.
- Vergnaud, G. (1993). Teoria dos campos conceituais. In Nasser, L. (Ed.) Anais do 1º Seminário Internacional de Educação Matemática do Rio de Janeiro. pp. 1-26.
- Vergnaud, G. (1994). Multiplicative conceptual field: what and why? In Guershon, H. and Confrey, J. (1994). (Eds.) *The development of multiplicative reasoning in the learning of mathematics*. Albany, N.Y.: State University of New York Press. pp. 41-59.
- Vergnaud, G. (1996b). A trama dos campos conceituais na construção dos conhecimentos. *Revista do GEMPA*, Porto Alegre, Nº 4, pp. 9-19.
- Vergnaud, G. (1996c). Algunas ideas fundamentales de Piaget en torno a la didáctica. *Perspectivas*, 26(10), pp. 195-207.
- Vergnaud, G. (1998). A comprehensive theory of representation for mathematics education. *Journal of Mathematical Behavior*, 17(2), pp. 167-181.

- Vosniadou, S. (1994). Capturing and modeling the process of conceptual change. *Learning and Instruction*, 4, pp. 45-69.
- Vosniadou, S. (1995). Towards a revised cognitive psychology for new advances in learning and instruction. *Learning and Instruction*, 6(2), pp. 95-109.
- Vosniadou, S. & Brewer, W. (1994) Mental models of the day/night cycle. *Cognitive Science*, 18, pp. 123-183.

Recebido em 17.05.2002

Aceito em 28.06.2002