

Palestra Millikan de 1990: O que ensinamos e o que é aprendido – diminuindo a lacuna^{ab}
(Millikan Lecture 1990: What we teach and what is learned-Closing the gap)

Lilian Christie McDermott (www.phys.washington.edu/groups/peg/)
Dep de Física, Universidade de Washington, Seattle, Washington 98195 (EUA)

Tradução do artigo “Millikan Lecture 1990: What we teach and what is learned-Closing the gap”, *American Journal of Physics* 59(4),301-315, 1991.

Translation of the paper “Millikan Lecture 1990: What we teach and what is learned-Closing the gap”, *American Journal of Physics* 59(4), 301-315, 1991

I INTRODUÇÃO

Hoje o Ensino de Ciências está novamente **desfrutando** de um período de crise. O verbo desfrutar foi deliberadamente escolhido devido a sua conotação positiva. Apropriado ou não, a referência freqüente nos meios de comunicação sobre a crise educacional gerou um ambiente que é altamente encorajador à melhoria do ensino de ciência e de matemática. Para o nível pré-universitário, uma infinidade de projetos tenta causar uma mudança, tanto por meios formais, através das instituições acadêmicas, como informais, com os museus e a mídia. Embora menos dramática, a situação no nível superior também passa por certa crise. Há um considerável entusiasmo para o desenvolvimento de novos materiais instrucionais para uma grande variedade de estudantes e professores universitários, variando desde o ensino para estudantes de ciências e engenharias até cursos mais gerais voltados a estudantes de artes e humanidades.

Esta euforia atual de atividade não é sem precedentes. No passado, períodos recorrentes de insatisfação com a situação do Ensino de Física motivaram o desenvolvimento de novos currículos. Geralmente o padrão tem sido o mesmo: um período inicial de adoção entusiástica é seguido por uma diminuição de interesse. Com o passar do tempo, o entusiasmo diminui e a desilusão se estabelece. Eventualmente, a situação se degenera tanto que gera outro turno de preocupação, e outro ciclo começa novamente. O movimento de reforma atingiu seu ápice no lançamento do satélite Sputnik em 1957.

Até o final da década de 50 e na década de 60, o ensino de ciências no primeiro grau consistia basicamente de leitura e memorização. No segundo e terceiro graus o ensino constituía de um livro-texto, coleção de problemas padrão e um conjunto de experimentos de laboratório pré-determinados. Motivados pelo desafio do Sputnik, os físicos e outros cientistas iniciaram projetos para o desenvolvimento de novos materiais instrucionais para o primeiro grau. O suporte financeiro foi fornecido pela NSF (*National Science Foundation*^c) Todos os projetos tinham em comum o reconhecimento da importância não apenas do conteúdo mas também do método de ensino. O objetivo dos pesquisadores que desenvolveram estes projetos, não era escrever novas versões de textos nos quais os estudantes poderiam aprender fatos e verificar experimentalmente os conteúdos previamente conhecidos. O objetivo era produzir currículos inovadores, voltados para a investigação e centrados em atividades, de tal forma que os estudantes tivessem a experiência da participação ativa na empreitada científica.

Apesar da alta qualidade e da promessa inicial, o impacto nacional dos materiais desenvolvidos foi muito menor que o esperado. Ainda ficaram lembranças do tranqüilo período de progresso pós-Sputnik e o abrupto término do financiamento da NSF para todos os programas, com exceção dos de pós-graduação. As comparações com a prática nos dias atuais são desanimadoras. Atualmente os currículos originais estão sendo usados apenas em pequena escala. Deixaram um legado, porém, na forma das atividades do tipo "mão na massa" (*hands-on*) incluídas em alguns livros atuais. Infelizmente, o espírito de investigação, praticamente desapareceu da maior parte dos programas contemporâneos, os quais tendem a ter um caráter enciclopédico pela abrangência de seu conteúdo.

A intensa atividade no desenvolvimento do currículo de Física pré-universitário durante a era Sputnik foi acompanhada pelo trabalho em escala menor no nível de graduação (Física Geral). Uma série de conferências nacionais incentivou alguns professores universitários a produzir individualmente novos materiais educacionais para o ensino de **Física Geral** (o curso introdutório de Física para os primeiros dois anos do ensino superior). Entretanto, as restrições foram tantas que a maior parte do ensino continuou da maneira tradicional.

^a Tradução por Gláucia Grüniger Gomes Costa, *EE Prof. José Juliano Neto, São Carlos, SP, Brasil* (gggcosta@gmail.com) e Tomaz Catunda, *Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, SP, Brasil* (tomaz@ifsc.usp.br). Os tradutores agradecem a revisão de Maria A. Cecília Catunda.

^b As notas de rodapé foram inseridas pelos tradutores.

^c Fundação para o apoio da ciência nos Estados Unidos.

II. A INADEQUAÇÃO DO CURRÍCULO

Como professores de Física, podíamos achar que não deveríamos renunciar à oportunidade atual de mudança, mas também temos a tendência a ser céticos quanto à possibilidade de mudança. A partir da experiência passada, há uma base para acreditar que podemos ser mais eficazes no futuro? Começamos tentando responder esta pergunta sugerindo que muitos dos problemas do Ensino de Física têm sido acirrados por um currículo inadequado aos estudantes, aos professores, ou a ambos. A seguir faremos uma análise do último grande ciclo de desenvolvimento curricular.

A. O ensino pré-universitário

A maneira pela qual os materiais para o ensino fundamental^d foram desenvolvidos durante a era do pós-Sputnik aumentou as chances deles serem apropriados para a população em questão. Testados continuamente na sala de aula durante todo o período do projeto, ESS, SCIS, e SAPA^e[1] eram totalmente adequados aos interesses e às habilidades das crianças. A principal razão da falha desses currículos ao serem ampla e continuamente adotados, foi a inadequação entre o professor e o currículo. Pouca atenção foi dada à preparação dos professores. A crença de que os materiais instrucionais eram "à prova de professor", isto é, de que não era necessário o professor dominar previamente um determinado tópico antes de ensiná-lo, se comprovou errônea. A expectativa de que os professores aprenderiam junto com seus estudantes, se mostrou irrealista. A discrepância entre as demandas intelectuais da matéria e a preparação em ciências da maioria dos professores de ensino fundamental era muito grande para ser sanada sem a ajuda de instrutores bem preparados. Os livros de auto-aprendizado do tipo "mão na massa" e manuais para professores não foram suficientes.

A importância da preparação adequada do professor também foi subestimada nos projetos de desenvolvimento do currículo para a segunda parte do ensino fundamental (5^a a 8^a séries) e do ensino médio^f. Uma pesquisa recente mostrou que nos EUA aproximadamente um terço dos professores de Física no Ensino Médio não são formados em Física ou não ensinam esta disciplina como sua atribuição principal por tempo suficiente para dominar seu conteúdo [2]. Não é válida a suposição comum de que professores despreparados podem adquirir, por meio de aulas expositivas, a base que lhes falta. Para ser capaz de ensinar ciências através da investigação, os professores necessitam ter a oportunidade de aprender exatamente da mesma maneira que seus estudantes.

A defasagem com o professor (caso de professores do pré-universitário) foi somente uma das facetas do problema encontrado na escola de ensino fundamental (5^a a 8^a séries) e ensino médio, na implementação dos currículos desenvolvidos com o suporte do NSF. Embora desenvolvidos e muito respeitados pela comunidade de Física, foi provado muitas vezes que esses currículos estavam além da capacidade da maioria dos estudantes para quem foram planejados. Por exemplo, o **IPS** (*Introductory Physical Science*^g) planejado para o sétimo e oitavo graus [3]. Entretanto, ele mostrou-se mais adequado às habilidades de estudantes do nono grau. O projeto **PSSC** (*Physical Science Study Committee*^h) e o Projeto de Física (*Project Physics*) não foram tão eficazes como era esperado porque ambos os programas, especialmente o PSSC, se mostraram adequados apenas aos estudantes mais capazes [4].

B. O curso básico de Física no ensino superior

No nível superior, a adequação entre o professor e o currículo sempre foi extremamente boa. Em sua maior parte, o currículo tem sido projetado por professores que acham que os estudantes são como eles mesmos eram (quando estudantes). O curso introdutório de Física tradicional deu certo para eles, assim como funciona para muitos estudantes de Física, ou seja, tipicamente na ordem de 1 para cada 30 estudantes de uma turma. Um número razoável de alunos de ciências e engenharias são aprovados nesses cursos com notas razoáveis. Entretanto, há uma considerável evidência de que o currículo não se ajusta a muitos dos estudantes de Física Básica (ou Física Geral). Muitos chegam à universidade sem a preparação adequada para o curso (especialmente aqueles pertencentes às minorias). Desconhece-se o número de Físicos e outros cientistas, em potencial, que são perdidos porque os estudantes não estão aptos a entender o material didático no nível de complexidade e velocidade em que os cursos são ministrados. Entretanto, sabe-se que, muitas vezes, os mais bem preparados abandonam seus cursos de ciências ou engenharia não porque considerem o curso muito difícil, mas o consideram chato ou de pouco valor [5]. Ou seja, há evidências de que o currículo pode não ser apropriado nem para os estudantes bem preparados nem para os mal preparados. Os

^d Nos EUA *elementary e middle school*

^e ESS (*Elementary Science Study*), SCIS (*Science Curriculum Improvement Study*), SAPA (*Science – a Process Approach*)

^f Nos EUA o ensino fundamental é dividido em *elementary school* (1^a a 4^a) e *middle school* (4^a a 8^a). O ensino médio é chamado *high school*.

^g Projeto sobre física introdutória abrangendo o conteúdo equivalente a todo o nosso ensino básico de Física pré-universitário (fundamental e médio)

^h Projeto iniciado em 1956 nos EUA (M.I.T.), publicado em 1960 nos EUA no Brasil em 63 (versão traduzida).

licenciandos, ficam em posição particularmente difícil. Espera-se deles que ensinem um currículo para o qual eles não estão bem preparados como instrutores, depois de terem aprendido com um currículo inadequado a eles enquanto estudantes.

III. OS OBJETIVOS DO ENSINO

O projeto de um curso eficaz requer a identificação de objetivos instrucionais. Isso depende do conhecimento e aspirações dos estudantes: se o curso é planejado para os que fazem o curso de Física ou de Engenharia ou para aqueles matriculados em Física como disciplina de formação básica. Muitas universidades também oferecem outros cursos para estudantes com diferentes graus de preparação matemática. Entre aqueles matriculados em cursos introdutórios estão estudantes que serão professores de Física no ensino médio assim como alguns que ensinarão (ou evitarão ensinar) ciências Físicas no ensino fundamental.

Embora variem as necessidades das diferentes populações de estudantes, existe um núcleo comum de tópicos que são importantes no planejamento de todo o ensino à nível introdutório. Ainda mais importante do que a escolha dos tópicos específicos são as seguintes questões: qual valor deve-se atribuir à aquisição do conhecimento descritivo em comparação com as habilidades de raciocínio científico? Esperamos que nossos estudantes desenvolvam a proficiência suficiente de raciocínio qualitativo para poder interpretar novas situações Físicas nos termos dos conceitos que foram desenvolvidos? Nós queremos que nossos estudantes vejam a ciência como um conhecimento estático – um conjunto de fatos estabelecidos, ou como um processo dinâmico - uma maneira de descobrir a natureza? Quanta ênfase nós devemos atribuir a como sabemos em distinção a o que sabemos? Quão importante é que os estudantes aprendam a distinguir o que é e o que não é uma evidência científica, o que é e o que não é uma explicação científica? Não é fácil dar respostas definitivas a tais perguntas. A maneira pela qual nós tentamos resolvê-las determina o equilíbrio entre o conteúdo e o processo, e conseqüentemente a natureza do currículo.

A. Os objetivos intelectuais

A maioria dos professores concordaria que existem alguns objetivos básicos para um curso introdutório de Física. Tendo completado tal curso, os estudantes devem ter adquirido uma sólida compreensão de determinados conceitos físicos básicos que eles podem definir operacionalmente e conectar de maneira significativa a princípios importantes. Eles devem ter desenvolvido uma habilidade com representações formais (diagramas, gráficos, equações, etc.) e ser capazes de descrever em detalhes a relação entre um conceito e o formalismo usado para representá-lo. Devem ter desenvolvido proficiência suficiente em raciocínio científico (baseado em modelos, analogias, proporcionalidade, etc..) para aplicar os conceitos e as representações da Física na análise e interpretação de fenômenos simples. Devem ser capazes de fazer uma correspondência explícita entre um conceito ou uma representação e um objeto real ou evento real no mundo real. Naturalmente, também é necessário que em um curso introdutório, os estudantes aprendam a resolver problemas de Física. Entretanto, descobrimos que objetivos intelectuais importantes são freqüentemente ignorados quando o ensino é focado na resolução de problemas. Os estudantes tendem a se concentrar em algoritmos mais que no assunto do conteúdo da matéria.

B. Resultados alcançados pelo estudante

Será que o currículo tradicional de Física promove o tipo de compreensão que delineamos acima? Será que a aprendizagem significativa ocorre no sentido dos estudantes poderem aplicar os conceitos e habilidades de raciocínio em situações similares mas não idênticas às do contexto em que foram desenvolvidos? Existe uma considerável evidência indicando que para muitos estudantes os cursos introdutórios tradicionais não são eficazes para ajudar a atingir os objetivos intelectuais em discussão. A facilidade de usar o vocabulário técnico não necessariamente significa compreensão conceitual. A habilidade de seguir determinados procedimentos prescritos para resolver problemas padrões não indica o desenvolvimento de habilidades de raciocínio científico. Embora seja freqüentemente dito que a Física ajuda os estudantes a desenvolverem a habilidade de pensamento crítico, o currículo tradicional parece cumprir esta função somente com estudantes que já tiveram uma boa base antes de começar o curso.

Geralmente, as dificuldades que os estudantes apresentam em Física não são devidas a falhas dos professores em apresentar o conteúdo correta e claramente, pelo menos enquanto a transferência de informação é vista da perspectiva de um físico. Normalmente, o que é ensinado não é errado, embora ocasionalmente esse possa ser o caso. Infelizmente, até mesmo as apresentações mais lúcidas podem não ser bem sucedidas. O que o professor diz ou infere e o que o estudante interpreta ou infere como sendo dito ou concluído não são a mesma coisa. Frequentemente existem diferenças significativas entre o que o professor pensa que os estudantes aprenderam em um curso de Física e o que os estudantes realmente aprenderam.

IV. O DESENVOLVIMENTO DO CURRÍCULO

Um currículo, para ter sucesso, deve atingir os estudantes no estado de seu desenvolvimento intelectual do momento e ajudá-los a, gradualmente, aprofundar seu entendimento. A incompatibilidade entre o currículo e os estudantes na Física Introdutória dificulta seriamente a eficácia do ensino.

A. A abordagem tradicional

A abordagem tradicional na Física, tanto no ensino médio quanto no superior, tem se baseado na visão que o professor tem da matéria e na sua percepção dos estudantes. Os mesmos materiais didáticos podem parecer muito diferentes aos professores e aos estudantes. A maior atração da Física para um físico é a capacidade de generalização e síntese sobre o mundo natural que uma compreensão do assunto possibilita. Os físicos freqüentemente acham divertido o sentido de poder intelectual que resulta da capacidade de prever a mudança de um sistema físico, seja ela gerada internamente ou imposta por fatores externos. Há uma satisfação estética em poder explicar uma grande variedade de fenômenos, aparentemente não relacionados, em termos de alguns princípios básicos. Recordando sua própria experiência de como foram inspirados pela Física Básica, muitos professores tem a tendência de ver os estudantes como versões mais novas deles mesmos. Na realidade, tal descrição se aplica somente a um grupo muito pequeno de estudantes.

A maioria dos professores de Física é conscienciosa e tem um forte compromisso com sua matéria. Estão ansiosos para transmitir seu conhecimento e seu entusiasmo aos estudantes. Tendo compreendido um determinado problema após horas, dias, meses, ou talvez anos de esforço intelectual, eles querem compartilhar este conhecimento com seus estudantes. Para poupar seus estudantes de percorrer o caminho árduo que eles próprios percorreram, freqüentemente os professores de Física ensinam de cima para baixo, do geral ao particular. Na maioria das vezes, as generalizações são inteiramente formuladas quando são apresentadas aos estudantes e mostra-se como aplicá-las a exemplos bem específicos. Muito pouco pensamento indutivo é envolvido; o raciocínio é quase totalmente dedutivo; o estudante não é ativamente engajado no processo de abstração e de generalização. Apresentando aos estudantes alguns princípios gerais e mostrando como estes podem ser aplicados em alguns casos especiais, os professores esperam ensiná-los a fazer o mesmo em novas situações. Como resultado dessa experiência, espera-se que os estudantes adquiram não somente o conhecimento e habilidades específicas, mas também venham a apreciar a beleza e o poder que os físicos veem na Física.

O desenvolvimento do currículo, para o ensino médio e superior, geralmente reflete as atitudes e práticas que tipicamente caracterizam a ensino de Física. O problema com a abordagem tradicional é que ela ignora a possibilidade de que a percepção dos estudantes possa ser muito diferente daquela do professor. Talvez no seu estágio de desenvolvimento, a maioria dos estudantes não esta preparada para aprender o que nós queremos que eles aprendam do currículo de Física que nós criamos.

B. Recursos novos

Hoje estamos numa posição melhor do que nunca, de tentar resolver o problema, tarefa de aprimorar a adequação entre estudantes e currículo. Desde o último ciclo da reforma, existem duas propostas que nos deixam otimistas com a possibilidade de sucesso.

No Ensino de Física, a diferença mais significativa entre a situação atual e a era do pós-Sputnik é o crescente volume de conhecimento sobre a compreensão do estudante. O estudo da aprendizagem e ensino de Física, enquanto tema acadêmico, é um campo relativamente novo de pesquisa. Nas últimas duas décadas temos visto o crescimento de uma comunidade internacional engajada na pesquisa do Ensino de Física [6]. Físicos, psicólogos cognitivistas e os professores de ciência têm se envolvido. Cada um destes grupos tem uma perspectiva diferente (veja a Figura 1). Devido ao seu papel na preparação de professores de ensino pré-universitário, os educadores em ciências focalizam a sua atenção no desenvolvimento e teste de métodos para ensinar ciências. Embora os físicos possam fornecer o contexto, provavelmente o objetivo dessa pesquisa é buscar uma estratégia instrucional ou uma teoria do ensino não específica à Física. Já os psicólogos cognitivistas têm uma abordagem diferente. Eles investigam como os estudantes resolvem problemas de Física para aumentar seu conhecimento sobre os processos do pensamento humano. Algumas vezes a modelagem por computador é usada como um auxílio para análise do comportamento na resolução de problemas. O objetivo final pode ser o desenvolvimento de uma teoria da cognição. Para psicólogos cognitivistas e professores de ciência, geralmente o interesse na Física enquanto disciplina não é a força motriz. Não obstante, estes grupos podem contribuir para o nosso conhecimento das dificuldades do estudante.

O terceiro grupo engajado na pesquisa em ensino de Física consiste de professores de Física, cuja motivação principal vem de um compromisso intelectual com o próprio conteúdo do assunto. O principal estímulo para suas pesquisas é o desejo de melhorar o ensino de Física, embora possam, também, estar periféricamente interessados em teorias de cognição ou educação. Os físicos, muito provavelmente, são mais capazes do que professores de ciência ou

psicólogos cognitivistas, de explorar a compreensão do estudante de Física em profundidade. Possuem o embasamento necessário para reconhecer e interpretar habilmente, as diferenças sutis, entretanto, importantes entre o que ensinamos e o que é aprendido. O resultado da pesquisa por aqueles que conhecem bem o conteúdo do assunto pode ser uma fonte valiosa de informação para o desenvolvimento do currículo.

Um segundo desenvolvimento importante, desde a era da reforma curricular pós-Sputnik, foi o enorme avanço tecnológico. Hoje, o computador oferece a possibilidade de novas formas de ensinar Física, ao lado de ou conjuntamente com outras ferramentas, tais como, videodisco ou uma ferramenta de laboratório baseada em microcomputador. É possível que este novo recurso permita individualizar o ensino em aulas expositivas para grandes audiências. Muitos professores apóiam o aumento do uso do computador no ensino de Física. Rapidamente, eles estão produzindo uma grande quantidade de programas (softwares) educacionais. Entretanto, a experiência tem mostrado que muitos programas de computador não são bem adequados às necessidades ou habilidades dos estudantes. Para poder compreender todo o potencial desta nova tecnologia, nós precisamos compreender como os estudantes aprendem Física e qual a melhor maneira do computador auxiliar neste processo. Há necessidade de pesquisa para ajudar a assegurar que os materiais instrucionais via computador se transformarão em um recurso útil para o ensino da Física.

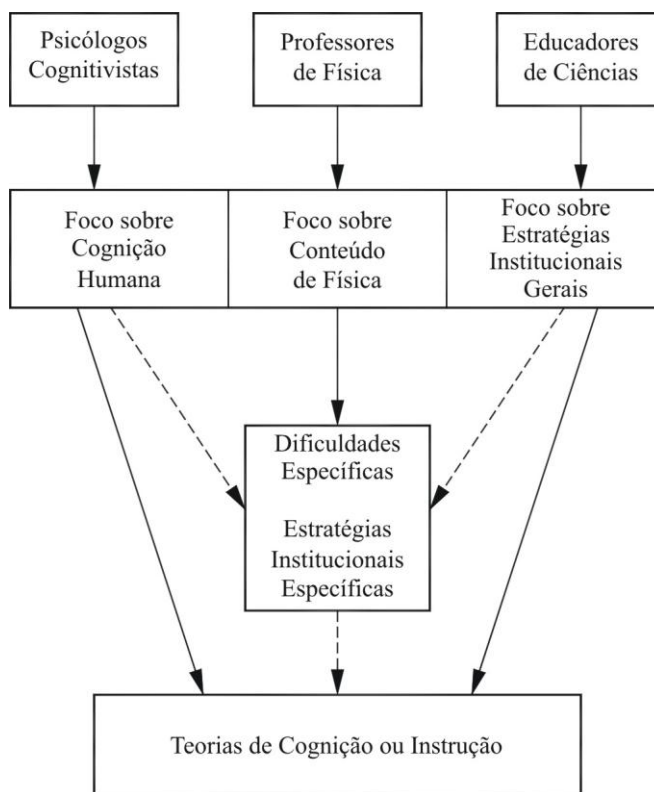


Figura 1. Perspectivas sobre pesquisas no ensino de Física.

C. A abordagem Construtivista

Talvez o efeito mais significativo que a Pesquisa no Ensino de Física tem tido sobre os físicos que trabalham nesta área seja a idéia da necessidade de focalizar maior atenção no estudante. A epistemologia construtivista fornece uma base teórica para tal abordagem.

Em termos não técnicos, podemos resumir a visão do construtivismo sobre como se adquire o conhecimento científico, da seguinte forma: todos os indivíduos precisam construir seus próprios conceitos, e o conhecimento que já possuem (ou pensam que possuem) afeta significativamente o que conseguem aprender. O estudante não é visto como um receptor passivo do conhecimento mas sim como um participante ativo em sua criação. A aprendizagem significativa, que envolve a habilidade de interpretar e usar o conhecimento nas situações não idênticas àquelas em que foi inicialmente adquirido, requer um profundo empenho mental do aprendiz. A mente do estudante não é uma lousa em branco na qual uma nova informação pode ser escrita sem considerar o que já existe. Se o professor não fizer um esforço consciente para guiar o estudante a fazer as modificações necessárias no sentido de incorporar corretamente a nova informação, o estudante pode fazer apenas um rearranjo. Nesse caso, a mensagem assimilada pode não ser aquela que o professor pretendia transmitir.

V. A PESQUISA COMO UM GUIA PARA O DESENVOLVIMENTO DO CURRÍCULO

As medidas de avaliação comuns nos cursos de Física - habilidade de enunciar definições corretas, reproduzir demonstrações, resolver problemas padrão - não fornecem informação suficientemente detalhada para determinar em que grau os estudantes alcançam os objetivos intelectuais mencionados anteriormente. Também a resposta a testes tradicionais não fornece uma base adequada para decidir como ajustar melhor o currículo ao estudante. Precisamos entender o que os estudantes realmente compreendem, ao contrário de nossa percepção como professores sobre o que eles entendem. O objetivo principal deste artigo está no uso da pesquisa como um guia para o desenvolvimento do currículo. O contexto para esta discussão é a experiência do Grupo de Ensino de Física na Universidade de Washington.

Há muitos anos o grupo está engajado em um programa coordenado de pesquisa, desenvolvimento do currículo, e ensino. Os professores universitários, pesquisadores associados, e os estudantes de doutorado do grupo participam de todas as etapas deste programa. Os estudantes de doutorado fazem pesquisa no ensino de Física para obter seu título de doutor (*Ph.D.*) em Física. A aplicação dos resultados dessas pesquisas no desenvolvimento do currículo é a principal atividade do grupo. Além do ensino da população de graduandos, em geral, nós desenvolvemos programas educacionais especiais. Por mais de duas décadas, temos oferecido cursos de Física para professores de todos os níveis pré-universitários tanto em atuação quanto em preparação (estudantes de cursos de licenciatura ou outros, que pretendem se tornar professores). Também desenvolvemos um programa preparatório especial para ajudar estudantes graduandos com pouca base em ciências a ter sucesso nos cursos básicos de Física que são a porta de entrada para as carreiras relacionadas a ciências.

A. Abordagem do grupo de Ensino de Física

Entendemos que para os estudantes adquirirem uma compreensão funcional da Física precisam ser atuantes no processo de aprendizagem. De maneira geral, podemos considerar nossa abordagem como construtivista, porém resistimos em usar este rótulo porque achamos que ele é restritivo. O principal desafio no desenvolvimento do currículo é determinar a quantidade exata de orientação para alcançar o nível necessário de interesse e participação. Se o professor, o computador, ou o texto assumem um papel demasiado grande ou pequeno, há o perigo dos estudantes não se envolverem intelectualmente em um nível suficientemente profundo para poder transformar o material de forma significativa e útil. A simples memorização pode substituir o desenvolvimento da compreensão conceitual e da habilidade de raciocínio científico.

Pensamos no currículo holisticamente: como a integração dos conteúdos (programa, texto, problemas, experiências de laboratório) e o modo pelo qual ele é ensinado. Procuramos um equilíbrio entre o conteúdo e o processo, entre a ciência como conhecimento e a ciência como um modo de conhecer. Tentamos produzir um currículo apropriado aos estudantes através de um processo com três etapas: (1) fazemos investigações sistemáticas sobre como os estudantes pensam em relação à Física antes, durante, e após o ensino; (2) usamos os resultados desta pesquisa para guiar o desenvolvimento do currículo; e (3) projetamos, testamos, modificamos e revisamos nossos materiais instrucionais na situação de sala de aula, onde o retorno detalhado dos estudantes está continuamente disponível. Consideramos a pesquisa, o desenvolvimento do currículo e o ensino como componentes de um processo contínuo, interativo e iterativo.

B. Os métodos de pesquisa

A entrevista individual com demonstrações é a principal fonte de dados nas investigações sobre a compreensão do estudante, conduzidas pelo Grupo de Ensino de Física. [7] Uma demonstração simples, que possa envolver equipamentos reais ou simulações de computador, serve como base de um diálogo entre um investigador e um estudante. Em uma entrevista típica, o investigador pode pedir que o estudante preveja como determinadas alterações na montagem afetariam o experimento, ou para especificar que mudanças na montagem produziriam um particular efeito sobre o experimento. O raciocínio do estudante é trazido à tona durante toda a entrevista, que dura de 30 a 45 minutos. Tentamos identificar dificuldades específicas do estudante através de uma análise detalhada da transcrição da entrevista.

A constante presença dos estudantes em nossas próprias classes e nosso fácil acesso a eles nos cursos padrões do departamento, torna possível conduzir a pesquisa no ambiente natural da sala de aula bem como no ambiente mais formal da entrevista. Estes estudos descritivos mais amplamente fundamentados, em geral envolvem um número muito maior de estudantes do que seria possível com entrevistas individuais. Os dados são colhidos na forma de observações dos estudantes durante o laboratório, trabalhos para casa, exames, discussões em classe, diálogos entre estudantes e professores e conversas entre estudantes. Em alguns casos, podemos monitorar o desempenho do estudante durante um período prolongado, tipo de pesquisa mais difícil de fazer com entrevistas.

Nas Secs. VI-VIII discutimos três modos pelos quais o Grupo de Ensino de Física está usando a pesquisa para melhor adequar o currículo aos estudantes. Na Sec. VI, demonstramos por meio de exemplos específicos, como aplicamos as descobertas de nossas investigações sobre a compreensão dos estudantes no desenvolvimento de um currículo baseado em laboratório. Na Sec. VII, descrevemos uma nova direção em nossa pesquisa ilustrando como tentamos identificar as dificuldades que os estudantes encontram com elementos individuais do currículo tradicional, tais como um problema padrão, demonstrações, ou experimentos. Na Sec. VIII comentamos algumas pesquisas recentes nas quais examinamos o potencial do computador, tanto para ensinar quanto como meio de investigação da compreensão do estudante.

VI. DESENVOLVIMENTO DE UM CURRÍCULO BASEADO EM LABORATÓRIO

Nesta seção, nós descrevemos o papel que a pesquisa tem tido no desenvolvimento do currículo pelo Grupo de Ensino de Física. Como parte de um projeto a longo prazo, produzimos um conjunto de módulos baseado em laboratório, coletivamente intitulado *Física através da investigação* [8] (*Physics by Inquiry*). Uma vez que selecionamos o conteúdo deste currículo baseados na nossa experiência em pesquisa e ensino, poderíamos caracterizar este esforço de desenvolvimento como uma abordagem de baixo para cima (*bottom-up*), isto é, como um currículo elaborado a partir da necessidade dos estudantes.

A. Escolha do ensino baseado em laboratório

O desenvolvimento do currículo pelo Grupo de Ensino de Física foi inicialmente baseado em laboratório e investigação orientada. Nossa experiência indica que é muito mais fácil engajar os estudantes intelectualmente numa situação de aprendizagem centrada em atividades do que na forma tradicional de aula teórica expositiva (*lecture*) e laboratório. Entretanto, nós temos outras razões para escolher desenvolver um currículo baseado em investigação orientada e laboratório.

A atividade principal de nosso grupo tem sido o desenvolvimento de materiais para a preparação de professores (pré-universitários). A maioria dos professores tem a tendência a ensinar da forma como foram ensinados. O ensino de ciências para crianças pequenas é reconhecidamente mais eficaz quando o desenvolvimento do conceito é baseado na experiência concreta. Reconhecemos que se quisermos professores que possam fornecer esse tipo de ensino, devemos lhes dar a oportunidade de aprender de uma maneira “mão na massa” (*hands-on*).

Além de ser apropriado para os professores, o ensino baseado em laboratório também funciona bem com outras populações. Nós concluímos que *Física através da Investigação* é útil para ajudar estudantes mal preparados a melhorar suas habilidades de raciocínio. Os módulos também foram usados com estudantes de ciências humanas, que acreditamos poderem aprender mais sobre a natureza da Física participando da investigação científica do que através de cursos “Física para poetas” (divulgação científica).

Finalmente, nosso interesse pela pesquisa tem sido a principal motivação para desenvolver um currículo baseado em investigação orientada e laboratório. O contato regular com estudantes enquanto eles trabalham com o equipamento, nos permite suplementar a informação obtida através das investigações formais. Existe uma oportunidade constante de observar os estudantes e de engajá-los em diálogos individuais de estilo Socrático. Novas perguntas para a pesquisa surgem da experiência no ensino diário. Constatamos que o ambiente do laboratório é um meio fecundo para desenvolver, testar e modificar nossos materiais instrucionais continuamente.

B. Princípios e estratégias

Os resultados de nossas investigações para identificar e tratar as dificuldades específicas do estudante têm sido incorporados à *Física através da Investigação*. Através dos anos, a partir dos resultados da pesquisa e de nossa experiência de ensino, selecionamos quatro princípios gerais que caracterizam o que acreditamos ser as partes mais eficazes do currículo que produzimos. Usamos, aqui, estes princípios na forma de uma estrutura organizacional para demonstrar como a pesquisa pode contribuir para o desenvolvimento do currículo.

Os dois primeiros princípios são amplos. Eles forneceram os fundamentos para o desenvolvimento da *Física através da Investigação* e refletem a estrutura e o espírito dos módulos individuais. Os dois últimos princípios poderiam também ser considerados estratégias educacionais gerais. Nós os elevamos à categoria de princípio devido ao papel crucial que eles têm no desenvolvimento de nossos materiais instrucionais. Neste trabalho, os exemplos que usamos para ilustrar estes princípios foram retirados de dois de nossos módulos, *cinemática* e *circuitos elétricos*. Escolhemos deliberadamente ilustrações simples de forma que a atenção pudesse ser focalizada nas estratégias, ao invés de sutilezas que poderiam estar inerentes em um conteúdo mais complicado. Cada ilustração consiste de uma dificuldade específica e uma ou mais estratégias educacionais desenvolvidas para atacar essa dificuldade.

1. Conceitos, habilidades de raciocínio, e as habilidades de representação devem ser desenvolvidos conjuntamente num conjunto coerente de conteúdos

O princípio fundamental seguido no desenvolvimento do *Física através da Investigação* é que os conceitos, habilidade de raciocínio e habilidades de representação devem ser desenvolvidos conjuntamente num corpo coerente de conteúdos. Cada um dos módulos individuais é unificado através de seu foco em um conjunto de conceitos relacionados e enfatiza uma habilidade particular de raciocínio e representação.

Nossa experiência tem demonstrado que é necessário que os estudantes desenvolvam a compreensão de um conceito em etapas, não de uma só vez. Em todos os nossos materiais instrucionais, nos esforçamos para apresentar os conceitos em forma de espiral, ou seja, circular (e em níveis de complexidade gradualmente crescentes). O refinamento de um conceito ocorre quando os estudantes reconhecem a sua necessidade. Nós também constatamos que os estudantes tendem a compartimentar o conhecimento. Eles têm dificuldade em separar um conceito ou um processo do contexto no qual foi inicialmente apresentado. A menos que os estudantes sejam solicitados a empregar a mesma habilidade de raciocínio e de representação em mais de uma situação, eles podem não conseguir transferir esta habilidade de um conjunto de conceitos para outro. Conseqüentemente, todos os módulos fornecem a prática de algumas das mesmas habilidades de raciocínio e de representação. A oportunidade de usar as mesmas habilidades em diferentes assuntos do programa, ajuda os estudantes a desenvolver a habilidade de aplicar seu conhecimento em contextos diferentes.

2. A Física deve ser ensinada como um processo de investigação, não como um conjunto inerte de informação

O segundo princípio fundamental que guiou o projeto da *Física através da Investigação* é que a Física deve ser ensinada como um processo, não como um corpo inerte de informação. Existe um grande número de artigos na literatura que descrevem este tipo de instrução [9]. Não é possível aqui discutir o ensino da Física como investigação em toda a sua profundidade. Entretanto, os exemplos específicos abaixo, usados para ilustrar alguns dos princípios e estratégias que têm caracterizado o desenvolvimento do nosso currículo, podem dar uma noção do ambiente de aprendizagem orientada por investigação para os quais os módulos foram desenvolvidos.

3. A habilidade de fazer conexões entre o formalismo da Física e os fenômenos do mundo real precisa ser explicitamente desenvolvida

O terceiro princípio que guiou o desenvolvimento do currículo é que a habilidade dos estudantes para conectar o formalismo e as técnicas experimentais da Física aos fenômenos do mundo real precisa ser explicitamente desenvolvida. Através de nossa experiência, tanto de pesquisa como de ensino, sabemos que geralmente os estudantes têm uma grande dificuldade em relacionar conceitos físicos e suas representações aos objetos e eventos reais. A implementação deste terceiro princípio no currículo é ilustrada abaixo por um exemplo extraído de uma investigação sobre a compreensão do estudante relativa a gráficos do movimento.

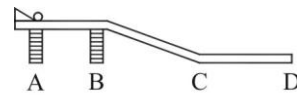
Em um estudo descritivo que se estendeu por muitos anos, o Grupo de Ensino de Física examinou a compreensão do estudante sobre gráficos do movimento [10]. A investigação ocorreu no contexto de um curso baseado em laboratório ensinado por membros de nosso grupo. O exemplo seguinte vem da pesquisa que foi uma extensão desse estudo [11].

a. Exemplo de pesquisa: falha em esboçar corretamente um conjunto de gráficos de movimento para um movimento observado. A estudantes de um curso de Física baseado em cálculo (curso de Física Geral)¹, foi apresentado o diagrama da Fig. 2, acompanhado da seguinte descrição do movimento: a esfera se move com velocidade constante ao longo do segmento horizontal, acelera no plano inclinado, e continua então com uma velocidade constante mais elevada ao longo do último segmento. Para os estudantes foi falado que a posição, s , era medida ao longo da trajetória e lhes foi pedido para esboçar os gráficos da posição, velocidade, e aceleração versus o tempo para o movimento da esfera. Somente um, dos 118 estudantes, deu a resposta correta mostrada na Fig.2. Os resultados desse estudo ilustram algumas das dificuldades que os estudantes têm em relacionar movimentos reais a suas representações gráficas. Diversos tipos diferentes de erros foram feitos indicando uma inabilidade para relacionar características de um gráfico com as características correspondentes do movimento real. Por exemplo, todos, com exceção de um estudante, ignoraram o fato de que cada segmento do movimento ocorre em um intervalo mais curto de tempo do que o precedente. Houve muitos outros erros mais sérios. Um tipo de erro freqüente foi uma tentativa de imitar a aparência da trajetória na forma dos gráficos. Por exemplo, a metade dos estudantes representou o movimento ao longo da trajetória reta inclinada por uma linha reta sobre o gráfico s vs t ao invés de uma linha curva. Quase o mesmo número de alunos desenhou linhas paralelas para os primeiros e terceiros segmentos desse gráfico, talvez porque os segmentos correspondentes da trajetória eram paralelos. A habilidade de fazer conexões entre um movimento observado e sua representação gráfica não se desenvolve espontaneamente com a aquisição de habilidades de representar graficamente. Tal facilidade deve ser explicitamente cultivada.

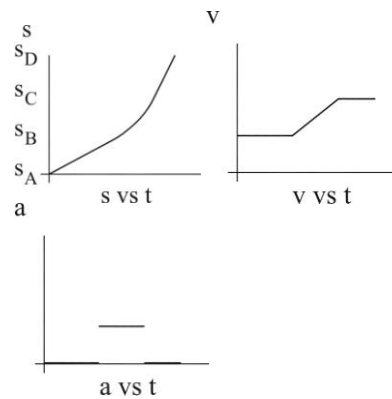
¹ Curso de Física Geral que utiliza Cálculo Integral. Nos EUA existem dois tipos de cursos de Física Geral (*Introductory Physics*): os cursos que usam cálculo integral são chamados baseados em cálculo (*calculus based*) e os cursos para estudantes que não dominam o cálculo integral são chamados baseados em álgebra (*algebra based*), sendo equivalente ao material estudado no ensino médio brasileiro.

Figura 2 – Dada a trajetória ao longo do trilho ilustrado ao lado, pede-se aos estudantes para esboçar gráficos de posição versus tempo, velocidade versus tempo e aceleração versus tempo. As respostas corretas estão ilustradas abaixo.

Obs: o intervalo de tempo correspondente a mudança de aceleração é muito pequeno de tal forma que não fica visível no gráfico.



(s = Posição da bola medida ao longo do trilho)



b. Estratégia educacional: fornecer a prática em traduzir de um para o outro, ou seja, do movimento para os gráficos e dos gráficos para o movimento. Nós acreditamos que a maneira mais eficaz de ajudar os estudantes a aprender a representar e interpretar um movimento real nos termos de vários tipos de gráficos do movimento é através de experimentos no laboratório.[12] No módulo da Cinemática da *Física por Investigação*, pede-se aos estudantes para traduzir de um para o outro, do movimento para os gráficos e dos gráficos para o movimento. São dadas muitas práticas para esboçar gráficos qualitativos dos movimentos observados, tal como o movimento de uma bola rolando ao longo dos vários arranjos de segmentos de retas e planos inclinados. Pede-se aos estudantes, para produzir o gráfico da posição, da velocidade, e da aceleração versus o tempo e interpretar as características correspondentes em todos os três tipos de gráficos. Eles também realizam o processo gráfico inverso, isto é, interpretam o movimento representado em um gráfico e constroem um arranjo de trilho sobre o qual a bola rola reproduzindo esse movimento. Traduzir de um para o outro, do trilho para os gráficos e dos gráficos para o trilho, ajuda a fortalecer as habilidades de fazer gráficos, ajudando também na habilidade de relacionar várias características de um gráfico do movimento com as características de um movimento real.

Os estudantes realizam muitos outros tipos de experiências nas quais devem deixar explícita a relação entre um movimento real e suas várias representações gráficas. Além de realizar experimentos nos quais observam o movimento dos objetos, os estudantes geram gráficos de seus próprios movimentos. Para este propósito, eles usam o detector de movimento do laboratório baseado em microcomputador (MBL de *micro-computer-based laboratory*) desenvolvido por Tinker e Thornton. [13]. Analisando o que eles devem fazer com seus corpos para produzir um gráfico específico, fortalecem suas habilidades de relacionar as características de um gráfico do movimento às características correspondentes de um movimento real.

Uma vez que os estudantes desenvolveram a habilidade em representar graficamente movimentos no laboratório, oferecemos a eles a oportunidade de fortalecer esta habilidade através da prática no computador. David Trowbridge, que por muitos anos foi um membro de nosso grupo, projetou um programa que implementa no computador exercícios similares àqueles no módulo de *Cinemática*. Neste programa, intitulado *Gráficos e Trajetórias*, o movimento de uma bola rolando em um conjunto de trilhos no laboratório é simulado na tela do computador [14]. O programa fornece aos estudantes a prática em traduzir, em ambas as direções, o movimento simulado na tela do computador e os gráficos s vs t , v vs t e a vs t que representam o movimento.

Gráficos e Trajetórias é um exemplo de *software* que foi muito influenciado pela pesquisa [15]. O projeto original foi guiado por resultados de nossa investigação da compreensão do estudante de gráficos do movimento, bem como pela experiência em usar o módulo de *Cinemática* com os estudantes no laboratório. Porém, a pesquisa continuou a desempenhar um papel relevante durante todo o período do desenvolvimento do *software*. A resposta fornecida aos estudantes pelo programa foi moldada por uma investigação contínua na qual a interação dos estudantes com o computador foi monitorada. A informação obtida foi então empregada no aprimoramento do programa.

4. Certas dificuldades comuns que os estudantes encontram na Física necessitam ser abordadas explicitamente

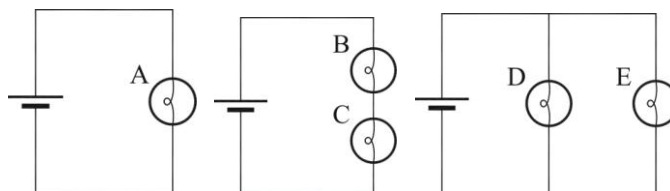
O quarto princípio que guiou o projeto da “Física através da Investigação” é que determinadas dificuldades comuns que os estudantes encontram na Física necessitam ser tratadas explicitamente. Algumas concepções errôneas (*misconception*) são suficientemente sérias de forma a impedir a aprendizagem significativa, mesmo que o desempenho em problemas quantitativos possa não ser afetado. Embora uma dificuldade conceitual ou de raciocínio possa prevalecer entre os estudantes, ela pode ser latente e assim não facilmente aparente a eles ou ao professor.

Algumas concepções errôneas podem aparecer devido a experiência limitada. Outras podem resultar de uma interpretação errônea da experiência prévia. Nesses casos, a concepção errônea pode ter a força de uma crença. As dificuldades neste nível provaram ser altamente resistentes ao ensino convencional.

Nós ilustramos a necessidade de trabalhar explicitamente determinados tipos de dificuldades por um exemplo, aquelas envolvendo circuitos simples de C.C. (corrente contínua). Os resultados de um pequeno estudo feito por nosso grupo são consistentes com os encontrados por outros investigadores de que existe um número de concepções errôneas sobre a corrente elétrica que aparentemente não são tratadas adequadamente em cursos tradicionais.

a. Exemplo da pesquisa: falha em classificar lâmpadas em 3 circuitos simples de C.C. por ordem de brilho. Pediu-se aos estudantes na Universidade de Washington matriculados em cursos de Física Geral (introdutória) com aulas expositivas em grandes auditórios (*lectures*), baseados em cálculo integral e baseados em álgebra, que respondessem a pergunta a seguir, como parte de um exame regular do curso. Foram apresentados diagramas de três circuitos simples nos quais uma bateria ideal foi conectada a: uma única lâmpada, duas lâmpadas em série, e duas lâmpadas em paralelo (vide Fig.3.). Solicitou-se aos estudantes, que tinham terminado o material sobre circuitos elétricos e lei de Ohm, que classificassem as lâmpadas em ordem do brilho.

Figura 3 - Classifique as lâmpadas nos circuitos ao lado (A, B, C, D e E) em ordem de brilho.



Resposta Correta:
 $D = E = A > B = C$

Para prever o brilho relativo, é suficiente pensar em termos de um modelo simples para a corrente elétrica no qual a resistência em um circuito conectado a uma bateria determina o valor da corrente através deste ramo do circuito. A resposta a esta questão não requer nenhum cálculo. Com a suposição de que quanto maior a corrente, maior é o brilho da lâmpada, segue que a única lâmpada (A) e as duas lâmpadas em paralelo (D e E) são igualmente brilhantes, sendo mais brilhantes do que as duas lâmpadas em série (B e C), que têm o mesmo brilho.

Os professores do curso, que não eram membros de nosso grupo, hesitaram em incluir um problema tão simples em um exame porque sentiram que não serviria para distinguir os estudantes. Na verdade, esta preocupação se mostrou justificada, mas não pela razão que inquietava os professores. No curso baseado em álgebra, de 105 estudantes somente 10% responderam corretamente. No curso baseado em cálculo, de 135 estudantes, somente 15% conseguiram classificar as lâmpadas na ordem apropriada.

(i) Dificuldades específicas: concepções errôneas comuns sobre circuitos elétricos. Quase todas as classificações possíveis do brilho das lâmpadas apareceram nas respostas. A análise das respostas indicou que os estudantes tiveram um número de dificuldades conceituais que contribuíram para as suas falhas em responder corretamente à pergunta. Nós pudemos identificar diversas concepções errôneas que também foram identificadas por outros investigadores. Entre estas concepções incluem-se as seguintes: a corrente é consumida pelas lâmpadas em um circuito; a bateria é uma fonte de corrente constante; o sentido da corrente, a ordem aos elementos, e a colocação física dos elementos do circuito, tudo influencia.

Houve uma ampla evidência de que muitos estudantes entenderam mal o conceito da resistência equivalente. Aproximadamente 40% dos estudantes tentaram calcular uma resistência equivalente para cada circuito e então substituíram o valor obtido na fórmula da potência. Embora o problema não fornecesse nenhum número, alguns dos estudantes inventaram seus próprios números. A resposta obtida dependeu do tipo de fórmula usada para a potência escolhida pelo estudante (isto é, IV , I^2R , V^2/R). As diferentes fórmulas dão respostas diferentes quando a resistência equivalente é usada incorretamente. Valores inconsistentes foram usados frequentemente para a corrente, a tensão, e a resistência. Muitos estudantes não notaram que para encontrar o brilho de uma dada lâmpada, sua própria resistência deve ser usada junto com a corrente ou a tensão associada com esta resistência. A resistência equivalente é útil somente para encontrar a corrente total no circuito.

(ii) Dificuldade geral: falta de um modelo conceitual para um circuito elétrico. Em suas respostas escritas, os estudantes revelaram que lhes faltava um modelo conceitual que lhes permitisse fazer previsões qualitativas corretas sobre o comportamento de um circuito simples. Entretanto, mesmo sem um modelo eles deveriam ter sido capazes de responder corretamente à pergunta. Eles tinham as habilidades matemáticas necessárias e também tinham usado a lei de Ohm em problemas envolvendo circuitos mais complicados. Embora não fosse estritamente apropriado, o uso

correto da fórmula resultaria na classificação apropriada do brilho relativo das lâmpadas. Diante de uma situação simples mas nova (não previamente estudada) os estudantes não conseguiram fazer o raciocínio necessário.

b. Estratégias educacionais. Descobrimos que para muitos estudantes falta experiência com circuitos simples que pode ajudá-los a relacionar a corrente, a tensão, e a resistência com fenômenos reais onde estes conceitos são úteis. Por sua própria iniciativa, raramente os estudantes sintetizaram estes conceitos em um modelo que poderiam usar para prever o efeito no circuito quando da mudança de um elemento.

(i) Estratégia educacional geral: desenvolver um modelo a partir da experiência do laboratório. Uma estratégia geral eficaz para ajudar os estudantes a compreenderem as relações entre a corrente, a tensão, e a resistência é fazê-los desenvolver estes conceitos elétricos básicos diretamente a partir de experimentos “mão na massa” (*hands-on*) com baterias e lâmpadas. No módulo sobre **Circuitos Elétricos**, os estudantes usam ambos os raciocínios: dedutivo e indutivo, para desenvolver um modelo baseado em suas próprias observações às quais eles podem usar para prever e explicar o comportamento das lâmpadas em circuitos de diferentes configurações.

Descobrimos que os estudantes sem grandes habilidades quantitativas podem ter êxito em construir um modelo para a corrente elétrica que lhes permite determinar o brilho relativo de lâmpadas em circuitos relativamente complicados. Um benefício adicional é que através desta experiência eles ganham uma visão (*insight*) da natureza de um modelo científico: o que é, como pode ser construído, como pode ser usado, e quais são suas limitações.

Após trabalharem todo o módulo, os professores de primeiro grau (*elementary school*) desenvolvem suficiente competência em raciocínio baseado em modelos para analisar o circuito mostrado na Fig. 4. Para fazer uma previsão correta, é necessário reconhecer que a corrente através da lâmpada E é maior do que a metade da corrente através da bateria. Visto que as lâmpadas A e B recebem cada uma a metade da corrente através da bateria, estas lâmpadas serão igualmente brilhantes mas não tão brilhantes quanto a lâmpada E. As lâmpadas C e D têm a mesma corrente, mas uma vez que esta corrente é menor do que a metade da corrente na bateria, estas lâmpadas terão o mesmo brilho que será menor do que o das outras lâmpadas. Nós acreditamos que a capacidade de fazer uma previsão qualitativa correta sobre este circuito indica um nível mais elevado de compreensão conceitual do que meramente ser capaz de manipular os símbolos algébricos da lei de Ohm com sucesso.

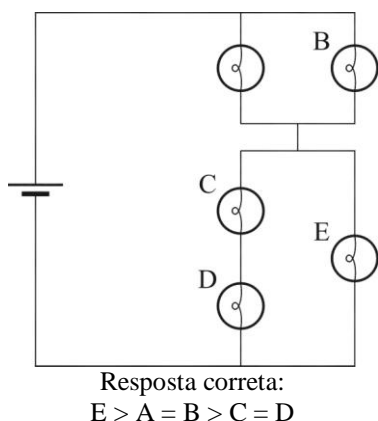


Figura 4 – Classificação das lâmpadas do circuito (A, B, C, D e E) em ordem de brilho.

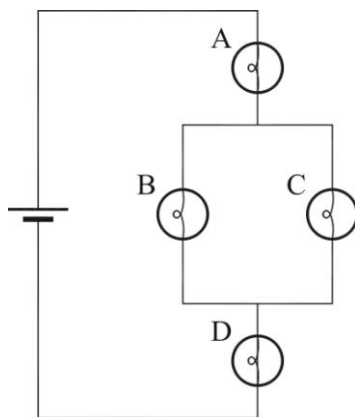


Figura 5- Exemplo do diálogo dos estudantes do módulo *Circuitos Elétricos*

Estudante # 1: toda a corrente passa por A, então se divide igualmente entre B e C, então ambas ficam com o mesmo brilho que é menor que de A. Depois as correntes se juntam novamente em D. D terá o mesmo brilho que A.

Estudante # 2: eu acho que a lâmpada D brilhará menos que A, na verdade talvez A nem acenda. Não sobrá muita corrente depois que ela passar por A e B e C. Ou talvez C brilhe mais que A dependendo da direção do fluxo no circuito. Acho que seria um bom teste para encontrar a direção da corrente.

(ii) Estratégia educacional específica O processo de construir um modelo fornece muitas oportunidades para os estudantes corrigirem, por eles mesmos, algumas de suas idéias equivocadas a respeito dos circuitos elétricos. Entretanto, existem dificuldades para as quais nenhuma mudança conceitual significativa parece ocorrer a menos que os estudantes se envolvam em um nível intelectual mais profundo. Diversas concepções errôneas (*misconception*) sobre circuitos elétricos parecem ser deste tipo. Para assegurar a participação ativa dos estudantes em superar estas dificuldades específicas que provaram ser altamente resistente ao ensino, o currículo faz o uso freqüente de uma estratégia em que a tendência para cometer um erro específico é deliberadamente apresentada. A dificuldade subjacente conceitual ou de raciocínio é então explicitamente tratada. O procedimento pode ser resumido em uma seqüência das etapas que puderam ser caracterizadas em alguns casos como: observe, reconheça, aplique; e em outros como: traga a tona, confronte, resolva. Deve-se enfatizar que estas não são estratégias distintas, mas são parte de um contínuo em que existe uma considerável superposição.

(a) Observar, reconhecer, aplicar. Em um ponto no módulo quando os estudantes adquiriram alguma experiência com lâmpadas em série, é introduzida a suposição de que o brilho de uma lâmpada é um indicador da quantidade da corrente. Os estudantes fazem então algumas experiências exploratórias com ligações em paralelo. Comparam o brilho

de uma única lâmpada em um circuito com o brilho de cada uma das lâmpadas em uma combinação paralela. Aos estudantes é então pedido que usem sua observação de que todas as lâmpadas são igualmente brilhantes para determinar as quantidades relativas de corrente através da bateria nos dois circuitos. Na tentativa de responder a esta pergunta, os estudantes começam a considerar as implicações de suas observações. A crença comum que a bateria é uma fonte de corrente constante, é sempre evocada.

A declaração seguinte é a reprodução literal de uma observação feita por um professor do ensino médio (*High School*) durante uma oficina (*workshop*). O comentário ilustra o tipo de reação que a seqüência do ensino sobre circuitos gera: "Isto significaria que o valor da corrente da bateria é diferente em diferentes casos e isto não tem nenhum sentido!" Este reconhecimento é uma primeira etapa no processo de ajudar os estudantes a aceitarem a idéia de que a corrente através da bateria não é constante. Nossa experiência mostrou que é preciso muitos destes encontros (aulas práticas) para convencer os estudantes de que a corrente através da bateria depende do número e do arranjo das lâmpadas no circuito. A não ser que seja pedido aos estudantes para aplicar esta idéia em muitas situações diferentes, eles provavelmente voltarão às suas opiniões originais de que a corrente através da bateria é constante.

(b) Traga a tona, confronte, resolva. Uma outra versão da mesma estratégia educacional básica é usada em Circuitos Elétricos depois que os estudantes tiveram uma considerável experiência em experimentos com as várias combinações de lâmpadas. O exercício a seguir é projetado para extrair a concepção errônea (*misconception*) de que a corrente é consumida pelas resistências no circuito. Este erro já foi tratado no currículo, mas a experiência mostra que ele pode ficar latente em muitos estudantes.

Os estudantes recebem um texto com um diálogo entre dois estudantes, no qual cada um faz uma predição diferente sobre o brilho das lâmpadas no circuito mostrado na Figura 5. É pedido aos estudantes que indiquem com qual deles concordam e deem as razões da sua escolha. A análise do estudante nº1 é correta, entretanto a declaração do estudante nº2 indica sua crença de que a corrente é consumida e que a ordem das lâmpadas no circuito influi no resultado.

Os argumentos para ambas as predições correta e incorreta são articulados com clareza no diálogo. Os estudantes que guardam concepções errôneas (*misconceptions*) por muito tempo raramente podem afirmá-las com clareza. Tornando claro o raciocínio que está sendo usado, o diálogo ajuda os estudantes a confrontarem o raciocínio incorreto do estudante nº 2. Sendo pedido para os estudantes contrastarem as afirmações, eles precisam tentar resolver o problema. Após terem concordado com um dos argumentos, os estudantes são solicitados a fazer a experiência e reconciliar suas observações com a posição que tomaram no diálogo.

C. Adaptação de estratégias instrucionais

Embora os módulos desenvolvidos por nosso grupo sejam inicialmente planejados para um curso orientado por investigação, muitas das estratégias instrucionais podem ser adaptadas para o uso em aulas expositivas (*lectures*), seções de discussão, e laboratórios que geralmente estão associados ao ensino da Física Básica. Por exemplo, todas as experiências "mão na massa" (*hands-on*) descritas nesta seção poderiam ser adaptadas para o uso em laboratório ou pequenas seções de questionamentos orais para fornecer um foco para discussão. O diálogo do estudante poderia ser usado como base para uma pergunta no trabalho de casa (*homework*) ou em uma prova de curso mais extenso. É necessário, porém, que se peça aos estudantes que expliquem seu raciocínio, preferivelmente com suas próprias palavras. Respostas curtas, testes verdadeiro-falso ou de múltipla escolha não são tão eficazes para avaliar a compreensão no nível em questão. As estratégias educacionais ilustradas compartilham a característica comum de encorajar os estudantes a pensar sobre conteúdos que eles poderiam deixar de refletir sem a intervenção ativa do currículo e do professor.

VII. MODIFICAÇÃO DO CURRÍCULO TRADICIONAL

O exame do currículo tradicional é uma outra orientação que o Grupo de Ensino de Física está pesquisando. Nós reconhecemos que a adoção generalizada de um currículo baseado em laboratório não é fácil para cursos com um número elevado de alunos. Para aumentar a probabilidade de que o resultado das pesquisas possa beneficiar um número significativo de estudantes, torna-se necessária uma abordagem pragmática para que se consiga produzir mudanças substanciais. Em algumas investigações mais recentes, começamos com o currículo tradicional e examinamos o efeito, sobre os estudantes, de elementos específicos da instrução padrão em física. Tentamos determinar se os problemas-exemplo, as aulas de demonstração, os experimentos de laboratório e os materiais didáticos de computador usados comumente, aprofundam e aumentam o entendimento conceitual ou se eles introduzem complexidades adicionais para os alunos e tornam-se casos especiais a serem memorizados. Na tentativa de desenvolver uma base de pesquisa que possa ser usada como um guia para fazer modificações na instrução tradicional, estamos examinando o que podemos caracterizar como uma abordagem de cima para baixo (*top-down*), isto é partindo do currículo existente e tentando ajustá-lo às necessidades dos alunos.

A. Exemplo de currículo tradicional: A Máquina de Atwood Modificada

Ilustramos esta nova orientação de nossa pesquisa através de um exemplo específico: A máquina de Atwood modificada (ver Figura 6). Este exemplo foi escolhido, especialmente, porque tem um papel chave no currículo de Física Básica tradicional. Uma versão do conjunto aparece com diferentes formas nos cursos básicos: como um problema-exemplo em aulas expositivas, como um problema de lição de casa ou de avaliação, como aula de demonstração ou como um experimento de laboratório. A máquina de Atwood modificada é freqüentemente utilizada como a primeira ilustração de como a segunda lei do movimento pode ser aplicada a um sistema de dois objetos no qual o movimento de um é afetado pelo do outro. Assim, é importante para o professor saber as complicações que possam prejudicar a sua função de ajudar os estudantes a aprofundarem e aumentarem seus conhecimentos de dinâmica.

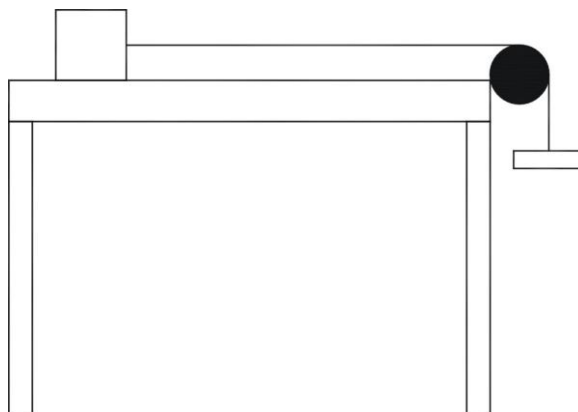


Figura 6. Máquina de Atwood modificada

A máquina de Atwood modificada oferece um contexto rico para pesquisar o entendimento dos alunos sobre mecânica. Uma análise do movimento envolve todas as três leis de Newton. O movimento ocorre em duas dimensões e depende da interação entre os quatro corpos: o bloco dependurado, o bloco móvel, a Terra e a mesa. O conceito de sistema deve ser aplicado de diferentes modos dependendo de qual informação se busca. Equações simultâneas podem estar envolvidas. Muitos conceitos diferentes de cinemática e dinâmica entram na análise. Resumindo, o problema é complicado.

A apresentação típica da máquina de Atwood modificada em um texto ou aula teórica começa com uma descrição verbal e um diagrama esquemático do conjunto. A descrição inclui abstrações que podem não ter muito significado para o estudante: um fio inextensível e sem massa e uma polia sem atrito e sem massa. A máquina de Atwood modificada pode ser o primeiro problema no curso que envolve explicitamente a tensão no fio.

A resposta da questão é simples, apesar da complexidade inerente. Encontre a aceleração das massas e (normalmente) a tensão no fio. Para um físico é imediatamente óbvio que o sistema todo se move com a mesma aceleração e que existe uma força desequilibrando na direção da aceleração. O procedimento para resolver o problema é automático: desenhar o diagrama do corpo livre apropriado, e então aplicar a segunda lei de Newton. Duas abordagens diferentes são comumente usadas.

Se somente a aceleração é requerida, os blocos dependurado e móvel são freqüentemente tratados como um sistema simples se movendo em uma direção com uma única aceleração. Embora não rigorosa e bem definida, esta simplificação parece razoável e intuitiva. A inextensibilidade do fio assegura que a aceleração de ambos os blocos, embora diferentes em direção, são iguais em magnitude. Se não existe atrito esta condição torna a máquina de Atwood essencialmente equivalente ao sistema de dois corpos acelerados horizontalmente por uma única força que é igual ao peso do bloco dependurado. A aplicação da segunda lei ao sistema composto fornece uma equação para a aceleração.

Se também se deseja saber a tensão no fio, então os blocos móvel e dependurado devem ser considerados como um sistema separado. A aplicação da segunda lei para cada bloco produz um conjunto de equações simultâneas que podem ser resolvidas para a aceleração e a tensão. Olhando de relance a solução indica que a magnitude da aceleração é sempre menor do que na queda livre. Se a aceleração não é zero, também é imediatamente aparente que o peso do bloco dependurado deve ser maior que a tensão no fio.

O experimento sobre a máquina de Atwood modificada, típico de laboratório, se parece com os exercícios de resolução de problemas. O mesmo conjunto básico é envolvido, embora o bloco possa escorregar sobre um trilho de ar ao invés de uma mesa. Normalmente conta-se aos estudantes quais variáveis serão medidas e é indicada a forma como estas medidas devem ser feitas. Os dados são obtidos e talvez feitos os gráficos, ou pelo estudante ou por um computador interfaceado com o trilho de ar. Quando os dados forem reduzidos para uma forma na qual pode se

estabelecer uma relação entre os valores numéricos da aceleração e da tensão, é uma prática comum pedir ao estudante para verificar as relações matemáticas formais.

Uma vez que a equação foi introduzida, ou na aula teórica ou no laboratório, existe uma tendência comum de se evitar pensar criticamente sobre a situação física. Quando solicitado para determinar qual efeito que certas mudanças no sistema causam no movimento, muitos estudantes focalizam mais na álgebra do que em tentar raciocinar qualitativamente. Como resultado, eles geralmente falham em reconhecer duas implicações importantes da segunda lei: (1) a presença da aceleração indica que uma força desequilibradora está agindo na mesma direção que a aceleração, e (2) a existência de uma força resistiva (no caso, a tensão) que limita a magnitude desta aceleração a um valor menor que a queda livre.

B. Investigação das Dificuldades dos alunos

Começamos nossa investigação sobre o entendimento dos estudantes com relação ao movimento da máquina de Atwood modificada, conduzindo entrevistas com demonstrações individuais onde tentamos identificar quais são os aspectos que parecem causar mais problemas aos estudantes. Consideramos desta forma que o trabalho está longe de um estudo preliminar. Mark Somers, Peter Shaffer e outros membros do grupo estão num processo de aumentar o alcance e profundidade da pesquisa.

1. Avaliação (“survey”) informal

Uma avaliação (“survey”) informal conduzida por A. Arons, entre os anos de 1968 e 1972, forneceu alguns indícios de como podemos proceder em nossas investigações. Arons colocou a seguinte questão para aproximadamente 15 estudantes da graduação: Qual a força que o fio exerce sobre o carrinho (bloco móvel sobre a superfície) comparado com o peso do bloco dependurado? “Compare” dizendo igual, maior ou menor [16].

Inicialmente, quase todos disseram que as duas forças seriam iguais em magnitude. Quando questionados se gostariam de mudar suas respostas, somente 30% o fizeram. Não existe, praticamente, dúvida de que todos estes estudantes poderiam ter trabalhado o problema quantitativamente e obtido uma resposta correta numericamente. Porém, o entendimento qualitativo não foi suficientemente forte para que reconhecessem a resposta correta sem utilizar equações.

2. Estudo Sistemático

Nós conduzimos entrevistas formais baseadas em ambos: equipamento real e simulação de computador, onde enfatizamos a pesquisa utilizando um conjunto de laboratório. Porém, as entrevistas utilizando o computador foram feitas em primeiro lugar. Considerando que as simulações e os procedimentos utilizados neste trabalho exploratório fortemente influenciaram o projeto das entrevistas baseadas em laboratório, notamos uma característica pouco relevante do programa de computação. Escrito por Diane Grayson, expressamente com o propósito de investigar o entendimento de dinâmica, o programa envolveu tanto uma simulação do movimento de uma única máquina de Atwood modificada como uma simulação do movimento simultâneo de duas dessas máquinas [17]. As máquinas foram colocadas extremidade com extremidade, de maneira que os dois blocos móveis podiam mover-se juntos um ao outro quando os dois blocos dependurados moviam-se para baixo. Na tela era possível mostrar uma máquina ou ambas.

Nós tentamos duplicar o aparelho e o protocolo de questionamento usado no computador, tão próximo quanto possível, nas entrevistas baseadas em laboratório. Estávamos interessados não somente em seguir nosso objetivo principal (isto é, investigar o conhecimento conceitual) mas também em examinar se os resultados obtidos com o equipamento real e as simulações do computador seriam similares. Nas demonstrações de laboratório, duas máquinas de Atwood modificadas colocadas lado a lado sobre uma mesa moviam-se sobre trilhos de ar. Cada máquina consistia de um corpo deslizante e um corpo pendurado no qual poderia ser adicionado massas diferentes. Os dois objetos foram ligados por um fio de nylon leve, que passou sobre uma pequena polia sem atrito. O comprimento do fio foi ajustado de modo que o corpo deslizante chegava no final do trilho de ar quando o corpo pendurado carregado alcançava o chão. Quando os dois corpos pendurados carregados moviam-se para baixo, os dois corpos deslizantes moviam-se paralelos um ao outro. Com o ar desligado o atrito aparecia; com o ar ligado não existia essencialmente nenhum atrito. Uma máquina poderia funcionar sozinha ou ambas poderiam rodar simultaneamente.

Os estudantes participantes das entrevistas eram voluntários que tinham completado o material relevante no curso. Alguns também tinham realizado o experimento da máquina de Atwood modificada no curso de laboratório. As tarefas apresentadas aos estudantes requeriam previsões e explicações do efeito sobre o movimento de várias alterações que poderiam ser feitas em uma ou em ambas as máquinas. Uma breve discussão das duas primeiras tarefas nas entrevistas baseadas em laboratório pode servir para ilustrar a natureza da pesquisa.

A primeira tarefa envolveu uma única máquina de Atwood. A entrevista começou com a massa do corpo deslizante em 300g e a massa do corpo pendurado carregado em 600g. O ar foi desligado de maneira que existia atrito. Após ter mostrado o sistema estacionário, foi perguntado ao estudante o que aconteceria quando o corpo deslizante

fosse solto. A resposta típica foi que o corpo pendurado cairia e o corpo deslizante se moveria ao longo do trilho de ar. Foi então pedido ao estudante que descrevesse o movimento mais precisamente, por exemplo, estabelecer se a velocidade mudaria e, se mudasse, o quanto iria variar. O investigador fez questões adicionais planejadas para trazer à tona as idéias dos estudantes sobre força e movimento. O corpo deslizante foi então solto e solicitou-se ao estudante que descrevesse o movimento. Se a previsão e a observação diferissem, o estudante teria que tentar explicar a discrepância.

A segunda tarefa era de comparação e envolvia ambas as máquinas de Atwood modificadas. Como elas eram ligadas por fios de comprimentos iguais, quando os dois corpos deslizantes estavam à mesma distância da polia, os corpos pendurados carregados estavam à mesma altura. A massa do corpo deslizante em cada sistema era 300g; a massa do corpo pendurado era 600g em um sistema e 400g no outro. O ar foi desligado de modo que o atrito estava presente em ambos os sistemas. Foi pedido aos estudantes que comparassem o movimento dos dois corpos pendurados carregados e dos dois corpos deslizantes quando as máquinas estavam funcionando simultaneamente. A comparação foi utilizada como base para continuar o diálogo sobre a relação entre força e movimento que começou na primeira tarefa.

C. Identificação das dificuldades específicas

A partir do desempenho dos estudantes sobre estas duas tarefas, bem como sobre as outras que foram incluídas na investigação, identificamos diversos tipos de dificuldades conceituais e de raciocínio. Abaixo, discutimos quatro erros relatados que parecem especialmente significativos. Nos tópicos abaixo, estes são caracterizados em termos de um bloco pendurado e um deslizante, os objetos tipicamente mostrados nos diagramas da máquina de Atwood modificada. Na discussão das entrevistas, entretanto, nos referimos ao corpo pendurado carregado e o corpo deslizante, os objetos que os estudantes observaram.

1. Falha em reconhecer que os valores da velocidade e aceleração dos blocos pendurado e deslizante devem ser iguais.

Quando a máquina de Atwood modificada é apresentada como um problema ou um experimento de laboratório, assume-se como óbvio para o estudante que o movimento do corpo pendurado carregado e o corpo deslizante são os mesmos. De fato, observamos que cerca da metade dos estudantes dizem em algum ponto na entrevista que os valores da velocidade e aceleração diferem para os dois objetos. Suas explicações mostraram que a fonte de confusão não era puramente cinemática. Geralmente existiam evidências de dificuldades com dinâmica, incluindo uma ou mais das apresentadas abaixo. A menos que os estudantes entendam que os valores da velocidade e aceleração devam ser os mesmos para o corpo pendurado carregado e o deslizante, eles não podem analisar corretamente o movimento deste sistema de dois corpos.

2. Falha para distinguir entre o peso do bloco pendurado e a tensão e reconhecer que a tensão, não o peso, age sobre o corpo deslizante.

Comentários feitos por muitos dos estudantes durante as entrevistas sugerem que eles podem não estar distinguindo o peso de um corpo pendurado carregado e a tensão no fio. Estes estudantes não parecem reconhecer a existência de duas forças. Se aqueles que pensam que o peso do corpo pendurado carregado está agindo diretamente sobre o corpo deslizante, eles podem não incluir a massa do corpo pendurado carregado como parte da massa total que está sendo acelerada. Sob estas circunstâncias, quando a massa do corpo deslizante é menor que a massa do corpo pendurado carregado (como na primeira das duas tarefas), os estudantes podem obter um valor de aceleração do corpo deslizante maior que a aceleração da gravidade. Com base neste cálculo, alguns alunos concluíram durante a entrevista que os valores da aceleração do corpo deslizante e do corpo pendurado carregado eram diferentes. O fato deles não acharem que esse resultado é falho indica que a suposição usual do efeito que o fio tem sobre o movimento não é óbvia para os estudantes.

3. Falha em reconhecer que a tensão age sobre o bloco pendurado enquanto ele está caindo e assim a aceleração deve ser menor que na queda livre.

Muitos estudantes parecem não reconhecer que o fio estava puxando o corpo pendurado para cima, enquanto este estava caindo. A entrevista mostrada abaixo ilustra uma linha de raciocínio típica na qual a tensão que age sobre o corpo pendurado carregado é ignorada. Após olhar uma demonstração do movimento de uma única máquina de Atwood modificada, apresentou-se uma tarefa de comparação na qual as massas penduradas para as duas máquinas fossem diferentes. Foi pedido ao estudante que fizesse uma predição sobre o movimento relativo dos dois sistemas.

S:... em primeiro lugar eu diria que o mais pesado (o pendurado) puxaria ele (o deslizante) mais rápido que o mais leve mas eu não sei ... Eu continuo pensando como anteriormente para a Torre de Pisa, você sabe, quando ele deixou cair uma pequena pedra e uma grande pedra e ambas caíram e chegaram no chão ao mesmo tempo.

Procurando fazer uma predição, o estudante tentou relacionar o movimento ao bem conhecido experimento histórico que demonstra que os objetos caem à mesma taxa independente de suas massas. Embora o estudante pensasse que este experimento era relevante, ele não era. O estudante não estava diferenciando entre a queda livre e a queda resistiva por um fio.

4. Falha em reconhecer que o peso do bloco pendurado deve ser maior que a tensão quando o sistema está acelerado.

Muitos estudantes não reconhecem que a aceleração do corpo pendurado carregado para baixo significa que seu peso tinha que ser maior que a tensão no fio. Estudantes que não entendem que uma aceleração numa dada direção indica a presença de uma força desequilibradora na mesma direção, talvez não compreendam o ponto mais importante que uma análise da máquina de Atwood modificada pode ser usada para ilustrar e reforçar.

D. Implicação para o desenvolvimento do currículo

Seja na forma de um problema qualitativo ou de experimento de laboratório, a apresentação típica da máquina de Atwood modificada geralmente não leva os estudantes a um nível intelectual profundo. Os tipos de questões que podem reforçar o entendimento conceitual são freqüentemente feitos no currículo tradicional. Quando são feitas, é freqüentemente sobre circunstâncias nas quais uma resposta correta não requer pensamento muito crítico. Por exemplo, se os estudantes já possuem acesso às equações, eles necessitam fazer apenas uma substituição rotineira para determinar como o peso de um bloco pendurado se compara à tensão ou como o valor da aceleração se compara ao da aceleração da gravidade.

Muitas das dificuldades identificadas durante as entrevistas relacionam-se diretamente com a tensão e a aceleração. Estas são, precisamente, as quantidades desconhecidas que são pedidas para que os estudantes encontrem nos problemas típicos ou experimentos da máquina de Atwood modificada. Porém, na apresentação usual deste material, pouca atenção é dada para ajudar os estudantes a confrontarem e resolverem estas dificuldades. Assim, o estudo da máquina de Atwood modificada freqüentemente aprofunda o entendimento conceitual das leis do movimento. Para muitos estudantes, as complicações introduzidas meramente aumentam a confusão. Se o problema é servir a seu propósito inicial, as dificuldades mais sérias devem ser tratadas explicitamente. .

Ainda não produzimos materiais instrucionais baseados nos resultados da pesquisa discutida nesta seção. Podemos começar, como fizemos no passado, modificando as tarefas a partir das entrevistas. Várias versões poderiam ser facilmente incorporadas aos problemas, demonstrações, ou experimentos de laboratório. Observamos que as questões que nos forneceram discernimentos sobre o entendimento dos estudantes, na nossa pesquisa, podem freqüentemente servir como base para o planejamento de estratégias instrucionais efetivas para lidar com dificuldades específicas.

Certamente poderíamos reagir de modo diferente às descobertas de nossa pesquisa. Uma outra opção seria omitir a máquina de Atwood modificada por causa de sua complexidade. Porém, achamos que este tópico do currículo tradicional oferece uma boa oportunidade para o desenvolvimento do conceito que deveria ser mais explorado em vez de ignorado.

VIII. INVESTIGAÇÃO DO POTENCIAL DO COMPUTADOR

Alguns anos atrás, o Grupo de Ensino de Física se envolveu na investigação do potencial do computador para a melhoria do ensino de física. Nós temos explorado o uso do computador como meio de instrução e de investigação do entendimento do estudante. Esta orientação da nossa pesquisa tem sido descrita detalhadamente em diversos artigos no American Journal of Physics [15]. Não discutiremos este trabalho aqui, exceto para comentar algumas características relevantes de temas que têm sido levantados.

Visto que o desenvolvimento de *Gráficos e Trajetórias* foi fortemente influenciado pela pesquisa e pelo desenvolvimento de currículo de nosso grupo, decidimos ver se o programa, por sua vez, poderia nos ajudar a ganhar discernimentos adicionais sobre as dificuldades que os estudantes têm na elaboração e interpretação dos gráficos do movimento. Grayson realizou uma série de entrevistas nas quais ela utilizou o programa para investigar a compreensão dos estudantes sobre representação gráfica do movimento [15].

A. Comparação entre os resultados dos movimentos real e simulado

Quando comparamos os resultados das entrevistas sobre instrução baseadas em computador com as descobertas de um estudo descritivo conduzido numa instrução baseada em laboratório, encontramos muitas similaridades [15]. Na maior parte, identificamos as mesmas dificuldades conceituais e de raciocínio em ambas as situações. Porém, aqui existem algumas diferenças.

O computador possibilitou a exploração de certas dificuldades de natureza semiquantitativa que não éramos capazes de observar durante a instrução. Também foi possível tirar vantagem do retorno imediato que o computador forneceu aos estudantes visto que tinham um meio visual para decidir se a resposta estava correta ou não, o investigador não tinha que interromper o treino de raciocínio dos estudantes tal como poderia ser necessário no laboratório. Da visualização de como os estudantes tentavam corrigir os erros, pudemos entender a relação que eles percebiam entre as características de um gráfico e as características de um movimento representadas por esse gráfico. Além desta informação obtida durante as entrevistas formais, tivemos uma compreensão adicional mais clara das observações informais dos estudantes enquanto eles usavam o *Gráficos e Trajetórias* na sala.

A maior parte das diferenças que encontramos entre as respostas dos estudantes para o *Gráficos e Trajetórias* e o equipamento real no laboratório foram pequenas. Porém, do estudo surgiu um problema que merece atenção. É quanto à dificuldade de determinar o grau de compromisso intelectual do estudante. Até um programa altamente interativo tal como o *Gráficos e Trajetórias* não assegura que a atenção do estudante esteja num nível suficientemente profundo para que aconteça uma aprendizagem significativa. As observações informais durante as aulas indicaram que para alguns estudantes a tarefa de obter a correspondência entre o arranjo dos trilhos e o gráfico parece admitir aspecto de um jogo. Eles, invariavelmente, ficavam satisfeitos ao terem sucesso mas, quando questionados pelo instrutor não podiam explicar como tinham determinado o que fazer para construir um gráfico ou um arranjo de trilhos apropriado.

A experiência com *Gráficos e Trajetórias* indicou que os estudantes podem não reagir do mesmo modo a uma simulação de computador como fazem com o equipamento do laboratório. O resultado das entrevistas sobre a atividade no laboratório da máquina de Atwood modificada e sua simulação no computador foi muito similar, mas não idêntico. No laboratório, os blocos deslizantes moviam-se paralelos um ao outro, enquanto que no computador, os blocos apoiados moviam-se um ao encontro do outro. No laboratório, o tamanho do aparelho impedia o estudante de visualizar os movimentos dos corpos pendurado e o deslizante simultaneamente. No computador, ambos os movimentos foram facilmente visualizados juntos. Uma outra diferença foi que o movimento natural no laboratório foi consideravelmente mais rápido que a simulação do computador. Existiram outras pequenas diferenças: a desordem do laboratório em contraste ao gráfico nítido na tela do computador, um arranjo tri-dimensional ao invés de um bi-dimensional, um fio ligeiramente encurvado ao invés de uma representação idealizada de um fio reto.

Essencialmente, as mesmas dificuldades apresentadas pelos estudantes foram identificadas nas entrevistas sobre o laboratório e sobre o computador. Porém, com o *Gráficos e Trajetórias*, existiram algumas poucas exceções. A diferença mais significativa foi que aproximadamente metade dos estudantes que participaram das entrevistas sobre o laboratório declararam, em alguns pontos durante a entrevista, que o corpo pendurado e o deslizante para uma única máquina de Atwood diferiram de algum modo em seus movimentos. Para alguns a declaração parecia ser o resultado de uma observação que tinham feito. Porém, durante a entrevista sobre o computador nenhum estudante afirmou que a velocidade e a aceleração eram diferentes para o corpo pendurado e o deslizante.

B. Necessidade de cuidados no uso da instrução baseada em computador

As diferenças entre os desempenhos dos estudantes no laboratório e no computador sugerem certas preocupações que necessitam ser abordadas quando contemplamos o uso da instrução baseada em computador. Duas delas são consideradas aqui. Uma acompanha diretamente a discussão acima e a outra é menos óbvia.

Até um programa de computador altamente interativo não dá a garantia que o estudante esteja comprometido suficientemente para ocorrer um desenvolvimento conceitual significativo. O sucesso com as tarefas de computador não necessariamente indica que os estudantes desenvolveram uma habilidade que pode ser transferida para outro meio. A menos que os estudantes possam articular o raciocínio que os induziu às manipulações feitas com o mouse ou às respostas digitadas no teclado, é difícil determinar se alguma aprendizagem significativa aconteceu.

Nossa experiência com a máquina de Atwood modificada levantou um problema que é mais sutil. À primeira vista pode parecer tentador dispensar o experimento real em favor da simulação no computador. O aparelho não somente é um conjunto complicado mas parece encorajar os estudantes a cometerem muitos erros sérios que não fariam com a simulação no computador. A menos que eles reconheçam que ambos os blocos pendurado e deslizante devem ter a mesma velocidade e aceleração, provavelmente os estudantes não podem resolver o problema. Uma reflexão mais cuidadosa, porém, nos permite concluir que confinar os encontros dos estudantes ao computador e portanto evitar o erro é precisamente o que não devemos fazer. Visto que não é necessário ver o aparelho ou a demonstração para saber que o movimento do bloco deslizante e do bloco pendurado devem ser idênticos, este erro indica uma falta de entendimento básico que necessita ser trabalhada. Permitir a ocorrência do erro e depois insistir para que os alunos confrontem e resolvam as dificuldades existentes é o modo mais efetivo de ajudá-los a reconhecer o papel do fio.

IX. CONCLUSÃO

Nós acreditamos que a pesquisa em ensino de física pode ajudar a quebrar o padrão da reforma do currículo, adoção entusiástica, desilusão gradual e eventual degeneração. Foi sugerido que a principal razão para a recorrência dos dois últimos estágios no ciclo tem sido o fato de que o currículo em Física e Ciências Físicas não têm sido bem ajustados aos estudantes, ao professor ou a ambos. Um esforço consciente para melhorar o casamento entre os estudantes e o currículo universitário básico pode ser o de ajudar diretamente no tratamento de muitas das dificuldades que os estudantes têm no curso. Visto que entre os matriculados nos cursos estão os futuros professores, tal abordagem pode também ser um modo indireto de suavizar o desencontro entre os futuros professores e o currículo pré-universitário.

A. Aplicações dos resultados da pesquisa para instrução.

Os resultados das pesquisas são valiosos recursos que os autores de livros-texto e desenvolvedores de softwares podem usar para ajudar a garantir que os materiais por eles produzidos servem para os estudantes a que se destinam. Porém a aplicação dessas pesquisas não pode se limitar ao desenvolvimento de materiais impressos e computador. As descobertas das pesquisas podem ser aplicadas diretamente no ensino na sala de aula.

1. *Uso apropriado*

Existem pelo menos duas formas pelas quais a pesquisa em ensino de física pode ser útil para os professores. Uma é como fonte de informação sobre dificuldades específicas dos estudantes e estratégias instrucionais efetivas. A segunda aplicação é mais direta.

Achamos que nossas investigações sobre o entendimento dos estudantes fornecem uma boa fonte de idéias para problemas, demonstrações e experimentos de laboratório. As tarefas utilizadas nas entrevistas com demonstrações individuais para apontar erros podem frequentemente ser modificadas e adaptadas para obter o mesmo objetivo durante a instrução. Os resultados das pesquisas podem guiar a elaboração de pré-testes que podem ser utilizados antes e durante a instrução em aulas expositivas, laboratórios, ou seções de discussão. Se forem apresentadas antes que os procedimentos quantitativos tenham sido apresentados, as questões qualitativas que requerem explicações de raciocínio podem atrair o interesse dos estudantes, focalizar a atenção deles na parte principal da matéria, e incentivar reflexões. Para que esta abordagem seja eficiente, as provas do curso devem incluir questões de tipos similares. A menos que os estudantes saibam que nos testes eles devem demonstrar conhecimento de nível conceitual significativo, muitos não investirão o tempo e o esforço necessário para alcançar um alto grau de domínio.

Existe uma condição crítica que deve ser observada para que o tipo de instrução descrita seja eficiente. Uma atmosfera não pejorativa deve ser estimulada na sala de aula ou no laboratório. Erros devem ser encarados como oportunidades para aprender, e deve ser dada aos estudantes a chance de demonstrar o que eles aprenderam. O sistema de avaliação deve ser suficientemente flexível para refletir os seus progressos.

2. *Uso inapropriado*

Durante a discussão, houve uma mensagem implícita sobre como os resultados da pesquisa *não* deveriam ser usados na instrução. Ajudar os estudantes a desenvolver um sólido entendimento conceitual não é simplesmente uma maneira de fazer uma lista de concepções errôneas e explicação dos erros que deveriam evitar. Há considerável evidência de que os estudantes frequentemente não cometem os mesmos erros em todas as circunstâncias. Um erro específico, pode ser evocado sob um conjunto de condições mas não sobre outras. O contexto pode ser um fator determinante. Um erro pode ser sintoma de uma dificuldade conceitual subjacente ou uma dificuldade de raciocínio, ou uma combinação de ambos. Se um raciocínio errôneo é o centro da dificuldade com um conceito, concentrar a instrução somente no conceito não dá aos estudantes o tipo de ajuda necessária.

Talvez a razão mais forte para não alertar os estudantes sobre os erros comuns é que tal abordagem raramente é eficiente. Geralmente não é muito útil contar aos estudantes sobre os erros que eles não deveriam cometer. A advertência é quase sempre mal entendida. Frequentemente um erro descrito por um instrutor parece trivial ao estudante e assim a advertência pode ser vista como irrelevante. Às vezes, se os estudantes reconhecem sua susceptibilidade a cometer um erro específico, eles podem se esforçar para suprimir essa tendência prestando atenção para não cometer esse erro. Porém, a dificuldade básica que é a causa real do erro pode permanecer latente e aparecer inexplicavelmente em outra série de circunstâncias. Dificuldades conceituais e de raciocínio não se superam com a explicação do professor. Tais mudanças no pensamento requerem um engajamento intelectual significativo do estudante. O único método eficiente para enfrentar dificuldades sérias é desenvolver materiais instrucionais para expô-las e então lidar com elas especificamente, não apenas uma vez, mas diversas vezes.

Um cuidado especial deve ser acrescentado e que é relevante para a educação de professores. Se eles possuem tendência para cometer um erro, eles devem poder fazê-lo, ou observar alguém cometer este erro. Para preparar os professores a ajudar seus estudantes a superarem uma dificuldade específica, nós não podemos simplesmente descrever uma estratégia instrucional apropriada. A não ser que eles vejam uma estratégia em ação, provavelmente não serão capazes de implementá-la na sala de aula.

B. Necessidade de pesquisa e disseminação de resultados

Exemplos específicos têm sido utilizados para ilustrar as relações entre Pesquisa em Ensino de Física e o desenvolvimento de currículo. A perspectiva e trabalho do Grupo de Ensino de Física têm produzido o contexto. O contexto em particular, porém, não é crítico. O que é crucial é que a pesquisa deve ser conduzida pelos físicos que tem pensado profundamente sobre o tema, que tiveram experiências no ensino da matéria e que estejam dispostos a focar no estudante: ouvir mais do que explicar. Além disso, a pesquisa deveria ser pensada para não somente a identificação das dificuldades dos estudantes mas para o desenvolvimento de estratégias instrucionais que as enfrentem [18]. Tanto os materiais instrucionais quanto o conhecimento das dificuldades dos estudantes devem ser cuidadosamente testados. Na tentativa de melhorar o casamento entre o currículo e os estudantes, nosso grupo achou proveitoso pensar a preparação de materiais instrucionais como parte de um ciclo interativo no qual a pesquisa, o desenvolvimento de currículo e o ensino reforçam-se mutuamente. Para ser útil e ajudar a diminuir a lacuna entre o que nós ensinamos e o que é aprendido, é essencial que o processo todo seja iterativo.

Tal como na pesquisa tradicional em Física, a possibilidade de fazer progressos significativos depende da existência de uma comunidade. Pesquisa em ensino de física por investigadores com uma forte orientação disciplinar é mais comum em outros países do que nos Estados Unidos. Existe neste país a necessidade de uma comunidade ativa de físicos trabalhando nesta área. Se a pesquisa é para cumprir a sua missão de ajudar a melhorar o casamento entre os estudantes e a instrução que eles recebem, é imperativo que os resultados sejam disseminados não somente dentro da comunidade de pesquisa, mas a todos aqueles que desenvolvem currículos e a todos que ensinam a matéria. A apresentação de trabalhos em encontros de profissionais é evidentemente importante, mas ao menos tão crítica é a publicação na literatura física de artigos de pesquisa que se enquadrem nos padrões de evidência e reprodutibilidade que se espera nas áreas de pesquisa nas quais os físicos tradicionalmente tem se envolvido.

AGRADECIMENTOS

A ganhadora do prêmio Palestra Millikan de 1990 fica agradecida e reconhece sua dívida para com Arnold B. Arons por sua ajuda e incentivo durante todos esses anos e a todos os membros do Grupo de Ensino de Física (passado e presente, permanente e visitante) por suas contribuições ao trabalho que permitiu esse reconhecimento. Agradece também profundamente a cooperação recebida do Departamento de Física, e especialmente do seu chefe. Por fim, um agradecimento especial à Fundação Nacional de Ciências (NSF) pelo contínuo suporte que tem permitido ao Grupo de Ensino de Física conduzir um programa coordenado no qual os três componentes: pesquisa, desenvolvimento de currículo e ensino mutuamente se reforçam.

1 *Elementary Science Study* (Education Development Center, Newton, MA); *Science Curriculum Improvement Study* (University of California, Berkeley, CA); *Science-A Process Approach* (American Association for the Advancement of Science, Washington, DC).

2 M. Neuschatz and M. Covalt, *Physics in the High Schools: Findings from the 1986/1987 Nationwide Survey of Secondary School Teachers of Physics*, AIP Rep. R-340 (American Institute of Physics, New York, 1988), pp. 16-20.

3 U. Haber-Schaim, J. B. Cross, G. L. Abegg, J. H. Dodge, and J. A. Walter, *Introductory Physical Science* (Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1972).

4 F. J. Rutherford, G. Holton, and F. G. Watson, *The Project Physics Course* (Holt, Rinehart and Winston, New York, 1970). U. Haber-Schaim, J. B. Cross, J. H. Dodge, and J. A. Walter, *PSSC Physics* (Heath, Lexington, MA, 1971).

5 Esta premissa é examinada por S. Tobais em *They're not Dumb, They're Different: Stalking the Second Tier* (Research Corporation, Tucson, AZ, 1990).

6 Uma discussão de contribuições internacionais à pesquisa na área de entendimento conceitual de mecânica pode ser encontrada numa revisão de L. C. McDermott, *Physics Today*, **37**, 24 (1984).

7 Veja, por exemplo, D. E. Trowbridge and L. C. McDermott, *American Journal of Physics* **48**, 1020-1028 (1980); D. E. Trowbridge and L. C. McDermott, *American Journal of Physics* **49**, 242-253 (1981); R. A. Lawson and L. C. McDermott, *American Journal of Physics* **55**, 811-817 (1987); F. M. Goldberg and L. C. McDermott, *The Physics Teacher* **24**, 472-480 (1986); F. M. Goldberg and L. C. McDermott, *American Journal of Physics* **55**, 108-119 (1987).

8 Alguns dos módulos individuais estão presentemente disponíveis no Grupo de Ensino de Física. *Physics by Inquiry* brevemente estará disponível através de uma publicação comercial. O ponto de partida para o desenvolvimento do *Physics by Inquiry* foi o *The Various Language* by A. B. Arons (Oxford U.P., New York, 1977).

9 Veja, por exemplo, A. B. Arons, *Journal of College Science Teaching* **1**, 30-34 (April 1972); L. C. McDermott, *American Journal of Physics* **42**, 668-676 (1974).

10 L. C. McDermott, M. L. Rosenquist, and E. H. van Zee, *American Journal of Physics* **55**, 503-513 (1987).

11 E. H. van Zee and L. C. McDermott "Investigation of student difficulties with graphical representations in physics," in *Proceedings of Second International Seminar: Misconceptions and Educational Strategies in Science and Mathematics III*, edited by J. Novak (Cornell U.P., Ithaca, NY, 1987), pp. 531-539.

12 M. L. Rosenquist and L. C. McDermott, *American Journal of Physics* **55**, 407-415 (1987).

13 Veja R. K. Thornton and D. R. Sokoloff, *American Journal of Physics* **58**, 858-870 (1990).

- 14 D. E. Trowbridge, *Graphs and Tracks* (Falcon Software, Wentworth, NH 1989).
- 15 L. C. McDermott, *American Journal of Physics* **58**, 452 - 462 (1990).
- 16 A. B. Arons, *A Guide to Introductory Physics Teaching* (Wiley, New York, 1990), p. 97.
- 17 D. J. Grayson, *Use of the Computer for Research on Instruction and Student Understanding in Physics*, Ph.D. dissertation, Department of Physics, University of Washington, 1990 (unpublished).
- 18 Veja, por exemplo, além das Refs. 12 and 13, J. Clement, "Nonformal reasoning in experts and in science students: The use of analogies, extreme cases, and physical intuition," in *Informal Reasoning and Education*, edited by J. Voss, D. Perkins, and J. Siegel (Erlbaum, Hillsdale, NJ, 1991), pp. 345-362; I. Halloun and D. Hestenes, *American Journal of Physics* **55**, 455- 462 (1987); P. Laws, "Workshop physics: Replacing lectures with real experience," in *Proceedings of the Conference on Computers in Physics Instruction*, edited by J. Risley and E. Redish (Addison-Wesley, Reading, MA, 1990), pp. 22-32; J. Minstrel], *The Physics Teacher* **20**, 10 (1982); P. Labudde, F. Reif, and L. Quinn, *International Journal of Science Education* **10**, 81-98 (1988)