

O autor, um reputado especialista em ensino da Física entretanto falecido (ver biografia no final), apresenta neste artigo de 1994 um conjunto de generalizações relativas ao ensino e aprendizagem da Física.

Arnold B. Arons
Departamento de Física
da Universidade de Washington,
Seattle, Estados Unidos da América

(tradução de Adriano Sampaio e Sousa, do
Departamento de Física da Universidade do Porto)

GENERALIZAÇÃO DOS RESULTADOS DE INVESTIGAÇÃO

Nas últimas duas décadas tem surgido em todo o mundo um trabalho sistemático de investigação sobre vários aspectos do ensino e da aprendizagem da Física, incluindo algumas relações com aspectos básicos do desenvolvimento cognitivo. O volume crescente de literatura favorece decerto os nossos esforços pedagógicos e melhora as nossas práticas.

Contudo, em vez de me debruçar sobre assuntos específicos, mostrar estatísticas ou apresentar protocolos de investigação pormenorizados, gostaria de sustentar algumas generalizações que faço a partir de observações e conhecimento acumulado. Algumas destas generalizações são meramente qualitativas e várias delas não serão certamente novas para os professores mais experientes. Mesmo que eu não seja capaz de documentar cada uma delas com protocolos específicos ou com estatísticas, acredito que são fortemente apoiadas por uma grande quantidade de dados. Constituem uma espécie de síntese qualitativa ou "meta-análise" do enorme corpo de conhecimento existente.

Não pretendo apresentar uma lista completa e exaustiva. Seleccionarei apenas algumas generalizações que julgo particularmente importantes. Creio que poucas delas, se é que algumas, são partilhadas com os meus colegas universitários que ensinam Física, mas que não estão familiarizados com a investigação pedagógica. Julgo também que estas generalizações não estão bem interiorizadas pelos alunos do ramo educacional ou pelos professores

DES A PARTIR OS DA PEDAGÓGICA¹

em início de carreira. Se queremos ver os resultados das nossas investigações aplicados de forma mais ampla aos vários níveis do ensino da Física, julgo que temos de transmitir a uma audiência mais vasta do que aquela que lê a literatura especializada não só os resultados relativos à aprendizagem de tópicos específicos, mas também algumas generalizações, como as que tentarei apresentar.

EXTRAPOLAR A PARTIR DA NOSSA PRÓPRIA EXPERIÊNCIA

Quando tento mostrar aos meus colegas universitários que ensinam Física que a investigação pedagógica tem vindo a revelar grandes dificuldades de aprendizagem e que o reconhecimento destas dificuldades põe em causa muitas das nossas práticas lectivas, que estão profundamente enraizadas, uma resposta frequente que ouço desses físicos, aliás muito competentes, é: "*Mas eu aprendi este assunto desta maneira, e, portanto, é assim que o dou aos meus alunos*". Essa atitude está profundamente arreigada, mas é altamente falaciosa, devendo ser confrontada com a seguinte generalização:

Os cientistas não deveriam extrapolar as suas próprias experiências de aprendizagem para a totalidade dos seus alunos, já que apenas uma pequena fracção dos mesmos aprende através das mesmas experiências, ou com a mesma rapidez.

Aqueles que se tornaram físicos profissionais eram membros da pequena fracção de estudantes que *não* experimentam muitas das dificuldades verificadas pela maioria. Temos de desenvolver melhores técnicas para beneficiar a maioria, sem no entanto desmotivar aquela pequena fracção. Extrapolar simplesmente a partir das nossas próprias experiências *não* é decerto a melhor forma de o conseguir.

Esta extrapolação, embora esteja particularmente difundida entre os cientistas profissionais, não se confina, de modo nenhum, a este grupo. Professores de todos os níveis de ensino, após terem dominado certos conceitos ou raciocínios, perdem por vezes de vista as dificuldades que eles próprios tiveram e passam a extrapolar a partir de uma posição que está desfasada da experiência concreta dos seus alunos.

OUVIR O QUE OS ALUNOS DIZEM QUE PENSAM

Outra resposta frequente que ouço dos meus colegas quando lhes falo das dificuldades reveladas pela investigação pedagógica é: "*Sim, claro, os alunos estavam a pensar isto ou aquilo*." Tais asserções são vulgarmente feitas com uma convicção, praticamente imutável, da sua correcção. Contudo, a investigação acerca do pensamento dos alunos sugere a seguinte generalização, mais realista:

Quando os alunos cometem erros e nós conjecturamos o que eles estão a pensar (sem ouvir cuidadosamente o que eles realmente dizem), enganamo-nos quase sempre.

Temos de convencer os professores de todos os níveis da necessidade de evitar conjecturas puramente subjectivas. É importante que eles aprendam (por exemplo, através de protocolos de investigação bem elaborados) a formular questões sem fornecer pistas de modo a que os alunos, ao responder, revelem aquilo que estão realmente a pensar.

O grande mérito das nossas investigações acaba por ser o facto de, contrariamente às opiniões pouco informadas de alguns pensadores, cada aluno não ser simplesmente diferente dos outros quando experimenta certas dificuldades fundamentais de aprendizagem. Quando pesquisamos concepções prévias e concepções erradas, quando estudamos dificuldades relativas a formas mais abstractas de raciocínio lógico, encontramos repetidamente grupos grandes de alunos que exibem as mesmas dificuldades e descrevem o seu pensamento essencialmente com as mesmas palavras. É este facto que permite usar os resultados da investigação desse tipo para melhorar a qualidade do ensino.

Os professores deveriam esforçar-se por aumentar, através de questões adequadas, o seu conhecimento empírico sobre o pensamento dos alunos em determinadas circunstâncias, em vez de tirarem conclusões precipitadas que se baseiam afinal naquilo que eles próprios *pensam* (ou *adivinham*) que os alunos estão a pensar. A procura consciente desse conhecimento e a abstenção de conjecturas descuidadas facilitaria, além do mais, o aparecimento de recursos informáticos de melhor qualidade do que os actuais.

O PAPEL DA EXPLICAÇÃO E DA DEMONSTRAÇÃO

O velho método de ensino expositivo perpetuou o ponto de vista segundo o qual "ensinar bem" consiste quase inteiramente em apresentações verbais e explicações claras. Esta noção está particularmente enraizada no ensino universitário, mas tende também a impregnar os níveis anteriores. As nossas pesquisas contradizem inequivocamente esta posição e confirmam que ela é ilusória. Toda a investigação apoia fortemente a seguinte generalização:

Não há explicações verbais nem demonstrações suficientemente claras e eficazes que levem à compreensão e ao domínio dos conceitos ou de formas abstractas de raciocínio por parte de cada um dos membros passivos de uma audiência. É essencial envolver a mente dos alunos em pensamento e raciocínio activos.

Alguns desprezariam esta posição como intrinsecamente "construtivista", mas eu prefiro evitar o jargão. Além disso, não defendo uma posição radical, e acredito que explicações e demonstrações claras desempenham um papel vital no ensino e devem *também* envolver a indução de pensamento e raciocínio activos. Ao defender esta generalização, frequentemente tenho de dizer a alguns colegas mais cépticos que *não* estou a defender explicações pouco claras. Apenas estou a apontar a necessidade de estimular a mente dos alunos de um modo que uma explicação, ainda que clara, não consegue. Alguns protocolos de investigação revelam-se excelentes exemplos do modo como esses estímulos podem ser conseguidos na prática. Mas são necessários muitos mais exemplos, que deveriam ser inseridos nos manuais escolares e nas práticas lectivas.

ENSINO EM ESPIRAL

A par da ideia ilusória de que, para haver ensino e aprendizagem efectivos, só precisamos de expor claramente,

existe a ilusão de que uma única explicação clara de um novo conceito ou modo de raciocínio lógico-formal devia ser suficiente para todo um grupo de alunos. Os alunos que não conseguissem apreender o conteúdo de uma tal exposição seriam totalmente incapazes de aprender aquele assunto. No nosso grupo de investigação da Universidade de Washington, temos tido a seguinte experiência:

Mesmo quando induzimos a participação e a actividade mental dos alunos, não devemos esperar que todos os alunos de um dado grupo consigam aprender tudo na primeira explicação. É necessário voltar repetidamente ao conceito ou raciocínio, após ter decorrido um certo tempo, em contextos diferentes e progressivamente mais ricos. De cada vez que se regressa ao assunto, neste percurso em espiral, um número maior de alunos conseguirá dominar a matéria e ter sucesso.



Os elementos-chave são "tempo" e "contextos diferentes". Aparentemente é necessário tempo para que as ideias abstractas sejam assimiladas. Sem ter decorrido um lapso de tempo suficiente, os efeitos serão apenas marginais. Se o contexto não for alterado, muitos alunos recorrerem à memorização de procedimentos ou enunciados evitando os processos essenciais de raciocínio.

Como exemplo cito a experiência de uma população constituída por alunos do ramo educacional e por professores do ensino básico a frequentar uma disciplina de Física a nível universitário. Inicialmente, menos de 5 por cento deste grupo era capaz de responder a problemas que pediam raciocínio com proporções, ou raciocínio recorrendo simplesmente a divisões e multiplicações. Não reconheciam o processo de divisão como uma contagem de subtrações sucessivas. Não possuíam os conceitos operacionais nem de área nem de volume (substituíam números em fórmulas sem saber de onde estas tinham vindo, ou o que estavam a calcular), e não tinham o

conceito de escala para áreas e volumes, quando se mudam as dimensões do objecto. Eram incapazes de interpretar o número obtido quando se divide a massa de um corpo (em gramas) pelo seu volume (em centímetros cúbicos) como o número de gramas de *um* centímetro cúbico. Usavam a palavra "por" com a vaga recordação de que os seus professores a tinham usado associada à divisão, mas não tinham nenhuma ideia do significado real de "por".

Esta população de adultos estava em tal estado porque os seus professores do 5º e 6º anos de escolaridade tinham evitado problemas expressos por palavras concentrando-se apenas na manipulação de algoritmos, já que eles próprios não eram capazes de lidar com problemas desse tipo. Por sua vez, esses professores estavam nessa situação porque a sua inabilidade não tinha sido diagnosticada e remediada quando eram alunos universitários. Assim, continuaram a perpetuar as suas falhas através dos seus alunos, prosseguindo um círculo vicioso. Ao lidar com o grupo de adultos procurámos romper o círculo. Na nossa disciplina de Física, envolvemo-los em raciocínios de proporcionalidade, desenvolvemos as noções operacionais de área e volume no contexto de uma estratégia para chegar ao conceito de densidade, e introduzimos a ideia de escala. Lidámos com problemas que requeriam a divisão e a multiplicação de arcos de circunferência e o significado de pi, a propósito do conceito de densidade, da concentração de soluções, da composição de substâncias e, no final, da velocidade e da aceleração.

O nosso teste do domínio do raciocínio aritmético consistiu no seguinte: Formulávamos um problema acerca de, por exemplo, composição de substâncias e pedíamos uma explicação verbal de cada passo do raciocínio, assim como uma interpretação clara, também verbal, do resultado final e uma avaliação do significado físico dele. Em seguida, pedimos que inventassem um problema relacionado com as situações estudadas anteriormente. Este problema tinha de exigir a mesma linha de raciocínio do problema acabado de resolver.

Repetimos testes deste tipo em contextos novos. Em cada ciclo, a percentagem de alunos com sucesso foi aumentando regularmente, de uma percentagem inicial de cerca de 20 por cento até uma percentagem final, após cinco ciclos, de cerca de 85 por cento. (Nunca atingimos os 100 por cento de sucesso nesses testes. Muitas questões relevantes podem ser colocadas a propósito. Mas tudo o que posso dizer aqui é que não tenho respostas para as questões mais óbvias: estou simplesmente a apresentar resultados).

O aspecto que quero destacar é que foram necessários *cinco* ciclos em diversos contextos, cada vez mais ricos, nos quais o assunto em causa era apresentado, até que 85 por cento desta população dominasse um raciocínio aritmético envolvendo basicamente a operação de divisão. Foram necessárias muita paciência e persistência. Uma sessão rápida de remediação feita no início do curso não teria produzido quaisquer resultados com exemplos não significativos (uma prática muito comum nas universidades americanas).

Julgo que a minha experiência com o raciocínio aritmético é um exemplo importante. Mas não se trata de um exemplo único. Foram precisos cinco ou mais ciclos noutras situações para se formarem certos conceitos ou raciocínios lógico-formais. Nunca atingimos 100 por cento de sucesso em qualquer grupo. Outras populações (por exemplo, estudantes de medicina numa disciplina de Física que exige álgebra e estudantes de engenharia numa disciplina de Física que exige cálculo avançado) começaram com percentagens mais baixas de insucesso, mas aqueles que o evidenciavam tiveram de passar pelo mesmo processo de esforço que os professores do ensino básico. O número de ciclos necessário para atingir 85 a 95 por cento de alunos bem sucedidos foi o mesmo.

O EFEITO DA IDADE

Uma expectativa comum nos professores (particularmente ao nível universitário) é que a aprendizagem será mais rápida nos adultos do que nas crianças e que, em geral, devemos esperar uma maior capacidade de aprendizagem, à medida que o aluno amadurece. A investigação sobre a aprendizagem de conceitos e de modos de raciocínio abstracto mostra que tal expectativa é uma ilusão. De facto:

O domínio de conceitos e de modos de raciocínio abstracto não se torna mais rápido com a idade do aluno. Estudantes adultos, quando abordam os mesmos conceitos pela primeira vez, enfrentam os mesmos obstáculos, cometem os mesmos erros, tropeçam nas mesmas concepções erradas, e têm as mesmas dificuldades que as crianças. O ritmo de aprendizagem dos adultos é até frequentemente mais lento que o das crianças devido à camada de disparates verbais (adquiridos ao longo dos anos) que o adulto tem de eliminar antes de atingir uma compreensão genuína.

Um exemplo específico deste efeito foi já dado na secção anterior, a propósito do desenvolvimento da capacidade

de raciocínio aritmético envolvendo proporções e divisões. A população adulta que encontramos ao nível universitário não se distinguia das crianças dos 5º ou 6º anos de escolaridade uma vez que experimentava as mesmas dificuldades de aprendizagem.

Para reforçar este exemplo, refiro uma outra situação com alunos do ramo educacional e professores do ensino primário. Nenhum destes estudantes tinha tido uma disciplina formal de Física, ao nível secundário ou ao nível universitário, mas todos eles tinham tido Ciências Naturais, tinham ouvido falar em electricidade e em circuitos eléctricos, e tinham visto esquemas de circuitos em manuais e no quadro. Iniciei a exposição do tema clássico "pilhas e lâmpadas" do currículo de ciência básica. Dei a cada par de alunos uma pilha, uma lâmpada e um único fio condutor e pedi-lhes que acendessem a lâmpada e registassem cada montagem por meio de um esboço, quer ela desse resultado quer não.

Quando este exercício é feito com crianças de sete anos, uma situação inicial característica consiste em encostar uma ponta do fio a um terminal da pilha e a outra ponta a um dos contactos da lâmpada. Uma outra tentativa inicial característica consiste em curto-circuitar a pilha com o fio e encostar um contacto da lâmpada a um dos terminais da pilha. Como nenhum destes modos permite que a lâmpada acenda, outras configurações são experimentadas até que, após cerca de vinte a trinta minutos, um grupo consegue acender a lâmpada e a sua estratégia se espalha pelos outros grupos.

Fiz este mesmo exercício com 62 pares de professores do ensino primário. Sessenta e um pares começaram de um dos dois modos usados pelas crianças e levaram de vinte a trinta minutos a encontrar uma configuração em que a lâmpada acendesse ².

Há fortes provas de que não se consegue uma aprendizagem real, bem ligada à experiência, unicamente através da transmissão verbal e que ela não ocorre mais rapidamente nos alunos mais velhos, se a aprendizagem tiver lugar pela primeira vez.

EXPLICAR POR PALAVRAS PRÓPRIAS

Identificamos um outro problema sério que precisa de ser confrontado e resolvido:

Muitos alunos mais lentos, mas potencialmente competentes, não conseguem assimilar conceitos e raciocínios abstractos até serem levados a explicar o seu pensamento, mais do que uma vez, pelas suas próprias palavras.

Parte dos alunos que apresentam dificuldades como as referidas consegue alcançar o domínio de conceitos e de modos de raciocínio através de experiências concretas e envolvimento repetido em raciocínios activos, beneficiando de explicações e correcções quando cometem erros. Contudo, uma outra parte, constituída por alunos mais lentos, parece não tirar grandes benefícios apenas das explicações e correcções do professor. Este grupo só tem sucesso quando é levado, através de diálogo socrático, a explicar a sequência do seu pensamento pelas suas próprias palavras. Neste grupo estão incluídos muitos futuros professores do ensino básico, alunos pertencentes a minorias étnicas ou a camadas sociais desfavorecidas.

As necessidades deste grupo levantam um enorme problema, se pretendermos que também ele obtenha sucesso. Não existem, e nunca existirão, professores em número suficiente para chegar a todos estes alunos, na base de um ensino individualizado. A única solução prática que hoje consigo imaginar consiste em gerar diálogos socráticos no computador que, através de respostas interactivas, levem os alunos a articular as necessárias explicações. Existe actualmente muito pouco material desta natureza, embora tenham sido produzidos alguns exemplos que demonstram as características do que seria necessário ³.

OCORRÊNCIA DE CONCEPÇÕES ERRADAS

Um facto empírico que emerge das observações de outras populações, para além dos alunos do ensino regular, nos cursos introdutórios de Física, é o seguinte:

As concepções prévias e concepções erradas encontradas frequentemente nos alunos de disciplinas introdutórias de Física estendem-se a estudantes de níveis superiores, a professores do ensino básico, a estudantes de pós-graduação e mesmo a alguns docentes universitários. A proporção de indivíduos que apresentam tais dificuldades diminui significativamente, mas não se anula à medida que aumenta o nível.

Por outras palavras, o domínio de conceitos básicos não é atingido por 100 por cento dos alunos, mesmo entre aqueles que conseguem obter aprovação em graus de ensino avançado. Recorde-se a minha afirmação de que nunca atingi 100 por cento de domínio do raciocínio de proporções com as populações com que trabalhei a um nível introdutório. Será que esta experiência implica uma restrição básica ao desenvolvimento de certos tipos de raciocínio lógico-formal (uma espécie de Segunda Lei do Ensino, análoga à Segunda Lei da Termodinâmica, de

acordo com a qual não é possível converter 100 por cento de calor em trabalho)? Ou será que a experiência indica apenas que as nossas competência e persistência são inadequadas? Não estou certo quanto à resposta a esta questão.

UMA CONJECTURA PESSOAL



Embora eu não possa documentar a conjectura que se segue com provas totalmente objectivas e me baseie apenas em observações pessoais essencialmente empíricas, atribuo-lhe uma importância tal que a escolhi como possível generalização:

Muitos dos alunos que mostram inicialmente grandes dificuldades em raciocínios elementares com proporções e em problemas que requerem o uso da divisão apresentam também grandes dificuldades noutros tipos de raciocínio lógico-formal (no léxico piagetiano, eles seriam incluídos no nível "operacional concreto"). Quando estes alunos acabam por dominar o raciocínio aritmético (após uma luta ao longo de cinco ou mais ciclos em contextos diferentes), atingem quase simultaneamente o domínio de outros tipos de raciocínio, tais como o controlo de variáveis, a manipulação de conceitos como a velocidade e a aceleração e, principalmente, a aquisição de raciocínio hipotético-dedutivo.

Chamo a atenção novamente que se trata mais de uma conjectura do que uma generalização segura, porque apenas se baseia nalguns dados empíricos. Contudo, observei um número suficiente de ocorrências de tais transformações para acreditar que a afirmação merece uma investigação mais sistemática, que conduza à sua confirmação ou rejeição. Se o efeito é, na verdade, real, talvez não se trate apenas de causa-efeito entre o desenvolvimento cognitivo e a auto-confiança intelectual do aluno. Se a conjectura estiver correcta, poderão emergir novas formas de

melhorar a eficácia do ensino e da aprendizagem – pelo menos para alguns alunos.

CONCLUSÃO

Nenhuma das generalizações que sugiro neste artigo tornam mais fácil a vida dos professores. Muitas delas são, de uma forma ou de outra, desagradáveis, porque negam esperanças e lugares comuns acerca do ensino e da aprendizagem e apontam para a redução do ritmo e volume da matéria conceptual. No entanto, apenas seremos capazes de efectuar melhorias significativas no ensino e na aprendizagem se reconhecermos a validade delas, ajustarmos os nossos currículos e métodos de ensino de modo a levá-las em conta, e, principalmente, convenceremos da sua importância os professores das escolas básicas e secundárias e os colegas universitários que não estão a par da investigação pedagógica. Só desta forma estaremos a contribuir para melhorar a aprendizagem, tornando-a mais proveitosa e menos académica.

NOTAS:

- (1) Comunicação convidada na conferência internacional "Thinking Science for Teaching: The Case of Physics", realizada em 1994 em Roma, Itália. Foi publicada no volume "Thinking Physics for Teaching" (ed. C. Bernardini *et al.*), Kluwer, 1995. Agradecemos à Kluwer a amável autorização para publicar esta tradução.
- (2) O par restante conseguiu acender a lâmpada imediatamente, já que um dos seus membros tinha sido técnico de electrónica durante o serviço militar na Marinha.
- (3) Satisfaz-me verificar que isto é possível, já que eu próprio produzi alguns destes exemplos. Contudo, os diálogos devem ser elaborados por professores experientes que acumularam o necessário conhecimento empírico do modo como os alunos respondem a vários tipos de questões. A produção destes materiais é uma outra história, que ultrapassa o objectivo deste artigo.

ARNOLD ARONS



O Professor emérito **Arnold Arons** faleceu em Seattle, com 84 anos de idade, em 28 de Fevereiro de 2001. Muitos o recordarão pelo seu esforço em prol do Ensino da Física, mas o seu currículo era já muito extenso antes de se dedicar à Educação. Em 1937 obteve o ME e em 1940 o MS em Química-Física, ambos no Stevens Institute of Technology seguindo-se, em 1943, o PhD, na Harvard University. De 1943 a 1946 foi membro da Woods Hole Oceanographic Institution; liderou o grupo que efectuou as medidas de ondas de choque durante os testes da primeira bomba atómica no atol de Bikini em 1946. Entre 1946 and 1968 leccionou, primeiro no Stevens Institute e depois no Amherst College, tornando-se conhecido pelos seus estudos sobre a circulação oceânica abissal e sobre a física das nuvens.

Em 1968, o Prof. Arons ingressou no Departamento de Física da Washington University, passando a dedicar-se à didáctica da Física. Recebeu em 1972 a medalha Oersted da American Association of Physics Teachers, em reconhecimento da sua notável contribuição para a educação. Entre os seus muitos livros e artigos destaca-se *Introductory Physics Teaching* (publicado pela Wiley) considerado um clássico do ensino da Física. Era conhecido (e temido) pelo seu humor, por vezes acutilante; uma das suas frases mais célebres diz o seguinte:

"O modelo relativístico de ensino baseia-se na premissa de que, se começarmos com uma E-N-O-R-M-E quantidade de matéria, mas a transmitirmos ao aluno a uma velocidade suficientemente elevada, a contracção de Lorentz encurtá-la-á de modo a poder entrar na cavidade que é a mente do aluno".

O artigo anterior terá sido o último contributo do Prof. Arons. Foi apresentado sob a forma de comunicação numa conferência realizada em Roma, em 1994. Por se tratar de uma excelente síntese do pensamento do autor e pela sua E-N-O-R-M-E actualidade a "Gazeta" publica-o em língua portuguesa.

CENTRO DE FÍSICA DAS INTERACÇÕES FUNDAMENTAIS

Instituto Superior Técnico

- > Projectos de investigação em Física de Partículas, Física Nuclear, Física Hadrónica, Física da Matéria Condensada, Relatividade e Cosmologia, Geometria Diferencial e áreas afins.
- > Teses de Mestrado e Doutoramento com uma formação internacionalmente competitiva.
- > 33 membros doutorados.

Visite a nossa página <http://cfif.ist.utl.pt>



Centro de Física Computacional

Partículas e Campos
Matéria Condensada
Geofísica
Ensino e História das Ciências

Escola de Física Computacional

Departamento de Física
Universidade de Coimbra
3004-516 Coimbra

<http://cfc.fis.uc.pt>
Tel: 239410600
Fax: 239829158