

O DESPERTAR DO PENSAMENTO

Você já pensou na possibilidade de o computador servir para o desenvolvimento intelectual da criança? Pois esse livro não só demonstra que isso é possível, como também apresenta um revolucionário sistema que viabiliza uma nova concepção de ensino.

Seymour Papert revela aqui a facilidade com que a criança pode dominar a tecnologia dos computadores. Por meio deles, conceitos fundamentais de matemática e da ciência em geral podem ser assimilados já nos primeiros anos de vida, proporcionando verdadeiros "saltos" na aprendizagem e na compreensão do mundo.

COMUNICAÇÃO
&
INFORMÁTICA

brasiliense
B

LOGO: COMPUTADORES E EDUCAÇÃO

S. PAPERT

SEYMOUR PAPERT

LOGO:

COMPUTADORES E EDUCAÇÃO

editora brasiliense

100.000 EXEMPLARES
VENDIDOS NOS EUA

LEITURAS AFINS

- Cuidado! Escola — *Paulo Freire e outros*
- Desregulagens — Educação, Planejamento e Tecnologia como Ferramenta Social — *Laymert Garcia dos Santos*
- A Escola e a Compreensão da Realidade — *M. T. Nidelcoff*
- Estado, Escola e Ideologia — *Lia Zanotta Machado*
- Fundamentos da Escola do Trabalho — *Pistrak*
- A Linguagem e seu Funcionamento — *Eni P. Orlandi*
- Pedagogia Dialética: De Aristóteles a Paulo Freire — *Wolfdietrich Schmied-Kowarzik*
- Uma Escola para o Povo — *M. T. Nidelcoff*
- Vivendo e Aprendendo — *Paulo Freire e outros*

Coleção Primeiros Passos

- O que é Cibernética — *Jocelyn Bennaton*
- O que é Educação — *Carlos R. Brandão*
- O que é Método Paulo Freire — *Carlos R. Brandão*

Coleção Primeiros Vãos

- Introdução à Pedagogia — *Lauro de Oliveira Lima*
- Pedagogia: Reprodução ou Transformação — *Lauro de Oliveira Lima*

Série Comunicação e Informática

A Questão da Informática no Brasil — *Rabah Benakouche (org.)*
Logo: Computadores e Educação — *Seymour Papert*

A sair:

Informação e Sociedade — *Henrique Rattner*

Seymour Papert

Logo:

Computadores e educação

Tradução:
José Armando Valente
Beatriz Bitelman
Afira Vianna Ripper

brasiliense
B
1985

Copyright © 1980, por Basic Books, Inc.

Título original: *Mindstorms — Children, Computers and Powerful Ideas.*

Copyright © da tradução: Editora Brasiliense SA, para publicação no Brasil.

Capa:

Kiko Farkas

Ilustrações:

Vicente Torre

Revisão:

Suely Bastos

Beatris C. Siqueira Abrão

Índice

Prefácio da edição brasileira — José Armando Valente . . .	7
Prefácio da edição americana	11
• Introdução: computadores para crianças	15
• Computadores e culturas do computador	35
• Matofobia: o medo de aprender	58
• Geometria da Tartaruga: uma matemática feita para aprender	77
Linguagem para os computadores e para as pessoas	120
• Micromundos: incubadores para o conhecimento	148
Idéias poderosas dosadas na medida da mente	165
As raízes do LOGO: Piaget e a inteligência artificial	188
• Imagens da sociedade da aprendizagem	211
Epílogo: O inconsciente matemático	225
Considerações finais e agradecimentos	244



editora brasiliense s.a.

01223 — r. general jardim, 160

são paulo — brasil

Copyright © 1983, por Paul H. Popham, Inc.

Titulo original: *Microcomputers - Children, Computers and Powerful Ideas*.

Copyright da tradução: Editora Brasileira S.A. para publicação no Brasil.

Curso
Nível: Pré-Ensino

Revisão
Versão: 1.0



A Tartaruga LOGO

Prefácio da edição brasileira

A educação está em crise. A escola, como instituição responsável pela disseminação de conhecimentos, já não consegue atender aos seus objetivos. No Brasil, a evasão escolar é a epítome viva desta situação: de cada 100 alunos que entram na primeira série, 47 chegam até a segunda série, e somente 17 terminam o primeiro grau. Nos países industrializados, a questão, se não é tão grave do ponto de vista quantitativo, o é do ponto de vista qualitativo: nos Estados Unidos, por exemplo, um estudo recente estima que existem dentre 18 a 64 milhões de analfabetos *funcionais* no país. A questão, portanto, é como reviver a educação para que ela realmente cumpra os seus objetivos mais amplos. Esta é a preocupação de Seymour Papert — educador que acredita no poder das idéias e que vê no computador o catalisador das idéias que poderão revolucionar o sistema educacional.

O argumento mais usado no Brasil para justificar o problema da educação é a atual situação sócio-político-econômica que vivemos. A crise da educação geralmente é atribuída à falta de verbas, à má remuneração do professor, ao fato de a escola não ter giz, papel, etc. É claro que não podemos negar a existência e o peso destes problemas. Entretanto, parece um pouco simplista a idéia de que a crise da educação

possa ser atribuída somente a eles. Para nos conscientizarmos de que isto não é verdade, basta analisarmos o que acontece com a educação nos países industrializados ou nas nossas abastadas escolas da rede privada. Com raras exceções, os suntuosos prédios, o aparato técnico-educativo e a boa remuneração dos professores só têm contribuído para uma melhoria no processo de transferência de informação do professor ao aluno. O aluno ainda continua passivo, e o aprendizado se limita à acumulação de conhecimentos já existentes, muito semelhante à maneira como bens materiais são armazenados nos depósitos. Isto está muito aquém do que podemos chamar *Educação* — o desenvolvimento harmônico de todas as faculdades do indivíduo.

Portanto, a crise da educação deve ser vista como a superposição de dois subproblemas que devem ser tratados separadamente: a questão sócio-político-econômica e a questão da melhoria do ensino em si. Ambos devem ser resolvidos, mas cabe principalmente às pessoas dedicadas ao ensino a proposição de condições, metodologias e idéias que nos levem a uma escola que efetivamente contribua para a *educação* da criança. Este é um desafio que nos coloca frente a um problema que afeta tanto os países industrializados como os países em desenvolvimento. A solução poderá ser a mesma, embora a implementação possa sofrer as adaptações que as nossas condições nos imponham. Mas nada nos impede que pensemos juntos, troquemos idéias e façamos um exercício intelectual no sentido de tentarmos resgatar a educação da sua crise.

Neste sentido, o que podemos esperar de uma solução que foi cunhada em um país industrializado, onde a tecnologia é mais barata do que o trabalho de um ser humano? Certamente, é uma solução onde a tecnologia passa a desempenhar um papel de grande relevância. Isto acontece com a proposta de Papert. Ele argumenta que o custo do ensino seria menor se fosse dado um computador a cada criança que entra na primeira série do primeiro grau. Transportado para o contexto brasileiro, isso seria um absurdo. Primeiramente, o custo de um computador no Brasil ainda é três a quatro vezes maior do que o seu similar no Japão ou nos Estados Unidos. Segundo, o custo de um computador ainda é muito superior ao custo da hora de uma professora. Terceiro, a

idéia de que uma criança tenha o seu próprio computador só pode ser aceita por uma sociedade onde o computador é parte integrante de todas as atividades do dia-a-dia, uma sociedade técnico-culturalmente mais rica. O Brasil está apenas engatinhando nessa área. Assim, estaremos incorrendo num erro grave, se simplesmente transportarmos as idéias de Papert para as nossas condições. Por outro lado, estaremos incorrendo num erro ainda mais grave, se deixarmos que a presença do computador se transforme numa barreira que impeça a compreensão das idéias de Papert.

A simples solução de colocarmos uma professora ou um computador à disposição de cada criança, sem a elaboração de novos objetivos para o ensino, certamente não resolverá o problema da educação. A experiência nos Estados Unidos tem mostrado isso. Atualmente estima-se que exista nas escolas americanas um computador para cada 72 alunos. Entretanto, 94% do uso do computador na escola de segundo grau são dedicados ao ensino de programação ou exercício de reforço. Isto não alterou em nada o quadro que se apresentava antes do advento do computador — só tornou o processo de *transferência* de informação mais eficiente.

Mas o que se espera desse sonhado processo educacional? Dentre as inúmeras qualificações, espera-se que os seus beneficiários sejam capazes de *usar* o conhecimento existente e se tornem *pensadores* ativos e *críticos*. Além disso, espera-se também que eles sejam capazes de conhecer o seu potencial intelectual, e utilizá-lo no desenvolvimento de suas habilidades e aquisição de novos conhecimentos.

As idéias de Papert, expostas neste livro, mostram como isso pode ser conseguido. Ele descreve uma filosofia educacional — chamada Logo — onde o computador é a ferramenta que propicia à criança as condições de entrar em contato com algumas das mais profundas idéias em ciência, matemática e criação de modelos. Segundo a filosofia Logo, o aprendizado acontece através do processo de *a criança inteligente "ensinar" o computador burro, ao invés de o computador inteligente ensinar a criança burra*. Com esta proposta, Papert inverte o atual quadro de uso do computador na escola. O computador deixa de ser o meio de transferir informação, e passa a ser a ferramenta com a qual a criança pode *formalizar* os seus conhecimentos *intuitivos*. O programa (a sequência de

ações ao computador) que a criança elabora é o espelho que reflete o seu conhecimento sobre um determinado assunto e o seu estilo de pensamento. Este programa, quando usado como objeto de reflexão, se torna uma poderosa fonte de aprendizagem.

Como Papert mostra ao longo do livro, existe uma íntima relação entre a filosofia Logo e a presença do computador. Entretanto, as idéias incorporadas no Logo não se limitam ao uso de um computador. Ele nasce com o computador mas se torna independente e aplicável a inúmeras atividades da vida diária. Por exemplo, Papert ressalta, similaridades entre o processo de aprendizagem em Logo e as relações entre sambistas experientes e novatos em ensaios de escolas de samba nos morros brasileiros. Cabe, portanto, a cada indivíduo a tarefa de conhecer a filosofia educacional de Papert, avaliá-la, e, se for o caso, determinar como melhor implementá-la. Aventure-se.

José Armando Valente
Janeiro de 1985

Prefácio da edição americana

As engrenagens de minha infância

Antes dos meus dois anos de idade eu já me interessava bastante por automóveis. Os nomes das peças dos carros eram parte substancial de meu vocabulário, sentia-me muito orgulhoso por conhecer os componentes do sistema de transmissão, a caixa de câmbio e especialmente o diferencial. Isso aconteceu, é claro, muito antes de eu entender como as engrenagens funcionavam; mas assim que passei a conhecê-las, brincar com elas passou a ser meu passatempo favorito. Adorava girar objetos uns contra os outros em movimentos circulares e, naturalmente, meu primeiro “projeto de construção” foi um sistema rudimentar de engrenagens.

Habituei-me a pensar em termos de esferas giratórias e a estabelecer cadeias de causa e efeito: “Esta gira para esse lado, então aquela deve girar em sentido contrário, então...” Particularmente eu tinha um prazer especial com sistemas como os das engrenagens do diferencial, que não seguem uma cadeia linear de causalidade pois o movimento do eixo de transmissão pode ser distribuído de maneira diferente às duas rodas, dependendo da resistência que encontram. Lembro-

me claramente da alegria que senti ao descobrir que um sistema podia ser legítimo e completamente compreensível sem ser rigidamente determinístico.

Acredito que trabalhar com diferenciais fez mais por meu desenvolvimento do que qualquer outra coisa ensinada na escola primária. Engrenagens, servindo como modelos, facilitaram o meu acesso a idéias que eram muito abstratas. Há dois exemplos da matemática ensinada na escola que me lembro muito bem. Eu via as tabuadas como engrenagens, e meu primeiro contato com equações de duas variáveis (por exemplo, $3x \times 4y = 10$) evocaram imediatamente o diferencial. Quando eu estabelecia um modelo mental de engrenagens para a relação entre x e y , imaginando quantos dentes cada uma delas necessitava, a equação tornava-se um ser amigável.

Muitos anos depois, quando li Piaget, este incidente me serviu como modelo para a noção de assimilação que ele propôs, apesar de ficar muito impressionado pelo fato de sua discussão não fazer justiça total às suas próprias idéias. Ele praticamente só fala sobre os aspectos cognitivos da assimilação, sem levar em conta o componente afetivo. A assimilação de equações em termos de engrenagens é certamente uma maneira poderosa de fazer com que um conhecimento anterior seja relevante à compreensão de um novo assunto. Mas este esquema ainda faz mais. Estou certo que tais assimilações fizeram com que a matemática tivesse, para mim, um caráter afetivo que remonta às experiências com carros durante minha infância. Acredito que Piaget concorda com isso. Quando o conheci pessoalmente entendi que sua negligência do componente afetivo deve-se mais a um sentimento de humildade diante do pouco que se sabe sobre isso do que a um sentimento arrogante de sua irrelevância. Mas voltemos a minha infância.

Um dia, me surpreendi ao descobrir que alguns adultos, talvez a maioria deles, não entendiam ou até nem se importavam com a magia das engrenagens. Hoje também não penso muito nelas, mas nunca abandonei as questões que surgiram com aquela descoberta: como poderia algo ser tão simples para mim e incompreensível para outras pessoas? Meu pai, orgulhoso do filho, buscava na minha "genialidade" sua explicação. No entanto, eu estava bastante consciente de que

algumas pessoas que não entendiam o diferencial podiam fazer coisas que eu considerava muito mais difíceis. Aos poucos, comecei a formular o que ainda considero o fato fundamental sobre aprendizagem: qualquer coisa é simples se a pessoa consegue incorporá-la ao seu arsenal de modelos; caso contrário tudo pode ser extremamente difícil. Aqui também eu estava desenvolvendo uma maneira de pensar semelhante à de Piaget. *A compreensão da aprendizagem deve ser genética.* Deve referir-se à gênese do conhecimento. O que um indivíduo pode aprender e como ele aprende isso depende dos modelos que tem disponíveis. Isso impõe, recursivamente, a questão de como ele aprendeu esse modelos. Assim, as "leis da aprendizagem" devem estar em como as estruturas intelectuais se desenvolvem a partir de outras e em como, nesse processo, adquirem as formas lógica e emocional.

Este livro é um ensaio numa epistemologia genética aplicada que se amplia para além da ênfase cognitiva de Piaget, com o intuito de incluir a preocupação com o afetivo. É desenvolvida uma nova perspectiva para pesquisa educacional, que se concentra na criação das condições sob as quais os modelos intelectuais serão fixados. É o que venho tentando fazer nas últimas duas décadas. No decorrer desse processo me defrontei várias vezes com muitos aspectos de meu encontro com as engrenagens do diferencial: primeiro, eu me lembro que ninguém me pediu para estudar as engrenagens; segundo, lembro que havia *sentimento, amor*, além de compreensão, no meu relacionamento com engrenagens; terceiro, meu primeiro contato com elas se deu em meu segundo ano de vida. Se algum psicólogo educacional tivesse tentado medir cientificamente os efeitos desse encontro, provavelmente teria falhado. Este encontro teve conseqüências profundas mas elas só foram detectados muitos anos mais tarde. Um pré e pós-teste aos dois anos provavelmente não as teriam revelado.

Os trabalhos de Piaget me deram uma nova perspectiva para olhar as engrenagens de minha infância. Elas podem ser usadas para ilustrar muitas idéias matemáticas poderosas e avançadas, tais como teoria dos grupos ou movimento relativo. Mas elas fazem ainda mais que isso. Assim como as engrenagens estão relacionadas com o conhecimento matemático formal, relacionam-se também com o conhecimento

corporal, com o esquema sensorimotor de uma criança. Você pode *ser* a engrenagem, você pode entender como ela se movimenta projetando seu próprio corpo em seu lugar e girando com ela. E essa dupla relação — tanto abstrata quanto sensorial — é que dá à engrenagem o poder de suscitar inúmeras idéias matemáticas na mente. De acordo com a terminologia que devo desenvolver nos próximos capítulos, as engrenagens atuam aqui como um *objeto transitório*.

Uma Montessori dos dias atuais poderia propor, se convencida por minha história, a criação de um conjunto de engrenagens para crianças. Assim, todas poderiam ter a experiência que eu tive; mas ter essa expectativa corresponderia a não entender a essência da minha história — *eu me apaixonei por engrenagens*. Isso é algo que não pode ser reduzido a termos meramente cognitivos. Alguma coisa de muito especial aconteceu e não se deve presumir que a experiência se repetiria com outras crianças exatamente da mesma forma.

Minha tese pode ser resumida assim: o que as engrenagens não conseguem fazer o computador consegue. Ele é o Proteu das máquinas. Sua essência é sua universalidade, seu poder de simulação. Por poder assumir milhares de formas e servir a milhares de finalidades, pode atrair milhares de gostos. Este livro é o resultado de minhas tentativas, na última década, para transformar computadores em instrumentos flexíveis o bastante para que muitas crianças possam criar para si próprias algo como o que as engrenagens foram para mim.

Introdução: Computadores para crianças

Há alguns anos as pessoas pensavam no computador como um equipamento caro e exótico. Seu uso comercial e industrial afetava a todos mas quase ninguém esperava que os computadores viessem a fazer parte do dia-a-dia das pessoas. Essa visão mudou dramática e rapidamente à medida que o público passou a aceitar a realidade dos computadores pessoais, pequenos e baratos o suficiente para ter seu lugar em qualquer sala de visitas ou mesmo em qualquer bolso. A aparência das primeiras e quase primitivas máquinas desse tipo foi o bastante para chamar a atenção dos jornalistas e produzir uma torrente de artigos especulativos sobre a vida num mundo futuro repleto de computadores. O principal assunto desses artigos era o que as pessoas seriam capazes de fazer com seus computadores. A maioria dos autores enfatizava seu uso para jogos, diversão, imposto de renda, correspondência eletrônica, compras e operações bancárias. Poucos falavam sobre o computador como uma máquina de ensinar.

Este livro também aborda a questão do que será feito com os computadores pessoais, mas de uma forma muito diferente. Vou falar sobre como eles podem afetar a maneira das pessoas pensarem e aprenderem. Começo por caracterizar meu ponto de vista fazendo uma distinção entre duas for-

mas pelas quais os computadores podem desenvolver o pensamento e mudar os meios de acesso ao conhecimento.

O uso instrumental dos computadores como máquinas que ajudam as pessoas a pensar tem sido dramatizado pela ficção científica. Por exemplo, como milhões de fãs do filme *Star Trek* sabem, a nave espacial Enterprise possui um computador que fornece respostas rápidas e precisas para questões muito complexas que lhe são apresentadas. Mas no filme não há nenhuma tentativa de mostrar que os seres humanos à bordo pensam de forma muito diferente da dos homens do século XX. O contato com o computador, como é mostrado nesses episódios, não mudou em nada o que as pessoas pensam sobre si mesmas ou como enfrentam e solucionam seus problemas. Neste livro, discutirei como a presença do computador poderia contribuir para os processos mentais não somente como um instrumento mas, mais essencialmente, de maneira conceitual, influenciando o pensamento das pessoas mesmo quando estas estiverem fisicamente distantes dele (assim como as engrenagens facilitaram minha compreensão de álgebra embora não estivessem presentes nas aulas de matemática). Este livro é também sobre o fim da cultura que faz com que a ciência e a tecnologia sejam hostis à vasta maioria dos seres humanos. Muitas barreiras culturais impedem que as crianças se apropriem do conhecimento científico. Dentre essas barreiras, as mais visíveis são os efeitos fisicamente brutais da privação e do isolamento. Outras são de cunho político: muitos jovens que vivem em nossas cidades são rodeados por produtos da ciência, mas esses produtos são vistos como pertencentes aos "outros"; em muitos casos são percebidos como propriedade do inimigo social. Há ainda outros obstáculos mais abstratos, embora tenham essencialmente a mesma natureza. A maioria dos ramos da mais moderna e sofisticada cultura da Europa e dos Estados Unidos são de tal forma "matofóbicas" que muitas crianças privilegiadas estão efetivamente (se não gentilmente) impossibilitadas de ter acesso à ciência como algo seu. Segundo minha visão, objetos da era espacial, na forma de pequenos computadores, atravessarão essas barreiras culturais para entrar nos diversos mundos privados das crianças. E o farão não como meros objetos físicos. Este é um livro sobre como os computadores podem ser os portadores de inúmeras idéias e de

sementes de mudança cultural, como podem ajudar na formação de novas relações com o conhecimento de maneira a atravessar as tradicionais barreiras que separam a ciência dos seres humanos e esses do conhecimento que cada indivíduo tem de si mesmo. É um livro sobre como usar computadores para desafiar crenças difundidas a respeito de quem entende o que e em que idade. Sobre o uso de computadores para questionar premissas padronizadas da psicologia do desenvolvimento, da psicologia das aptidões e das atitudes. Sobre se os computadores pessoais e os ambientes em que são usados continuarão a ser criações só de "engenheiros" ou se poderemos formar outros ambientes intelectuais onde pessoas que se consideram "humanistas" conseguirão sentir-se integradas e não estranhas ao processo de construção de culturas computacionais.

Há porém uma enorme diferença entre o que os computadores podem fazer e o que a sociedade decidirá fazer com eles. A sociedade tem muitos meios de resistir a mudanças fundamentais e ameaçadoras. Assim, esse livro aborda opções que em última instância são políticas. Descreve algumas das forças de mudança e algumas das reações a essas forças que se observam quando o computador começa a penetrar no mundo politicamente importante da educação.

Grande parte do livro é dedicado a formar imagens a respeito do papel do computador que são muito diferentes dos atuais estereótipos. Todos nós, tanto profissionais como leigos, devemos conscientemente quebrar os tabus que desenvolvemos com relação aos computadores. A computação está na sua infância. É difícil imaginar o computador do futuro sem fazer projeções das propriedades e limitações dos computadores que conhecemos hoje. E em nenhum lugar isso é mais verdadeiro do que ao refletir em como os computadores podem penetrar no mundo da educação. Seria falso afirmar que a imagem a ser desenvolvida aqui do relacionamento de uma criança com um computador vá além do que é comum nas escolas de hoje. Minha imagem não vai além: ela vai em direção oposta.

Em muitas escolas, atualmente, a frase "instrução ajudada por computador" (*computer-aided-instruction*) significa fazer com que o computador ensine a criança. Pode-se dizer que o computador está sendo usado para "programar" a criança. Na minha perspectiva, é a criança que deve progra-

mar o computador e, ao fazê-lo, ela adquire um sentimento de domínio sobre um dos mais modernos e poderosos equipamentos tecnológicos e estabelece um contato íntimo com algumas das idéias mais profundas da ciência, da matemática e da arte de construir modelos intelectuais.

Descreverei linhas de aprendizado que levaram centenas de crianças a tornar-se programadores bastante sofisticados. Se a programação for vista sob uma perspectiva adequada, não há nada muito surpreendente no fato de que isto aconteça. Programar significa, nada mais, nada menos, comunicar-se com o computador numa linguagem que tanto ele quanto o homem podem "entender". E aprender línguas é uma das coisas que as crianças fazem bem. Toda criança normal aprende a falar. Por que então não deveria aprender a "falar" com um computador?

Há muitas razões pelas quais alguém poderia supor que isto seja difícil. Por exemplo, embora bebês aprendam a falar sua língua materna com uma facilidade espetacular, a maioria das crianças tem grande dificuldade para aprender línguas estrangeiras em escolas e muitas vezes dominam a versão escrita de sua própria língua sem muito sucesso. O aprendizado de uma linguagem computacional não é mais parecido com o difícil processo de aprender a versão escrita de uma língua estrangeira do que com o aprendizado mais fácil da própria língua falada? E esta dificuldade não é ainda mais agravada com o problema que a maioria das pessoas tem para aprender matemática?

Dois idéias fundamentais são desenvolvidas neste livro. A primeira é que é possível construir computadores de modo que aprender a comunicar-se com eles seja um processo natural, mais parecido com o processo de aprender francês morando na França do que com o método antinatural do ensino americano de línguas estrangeiras. A segunda é que aprender a comunicar-se com um computador pode mudar a maneira como outras aprendizagens acontecem. O computador pode ser um interlocutor-de-matemática ou um interlocutor-de-línguas. Estamos aprendendo a fabricar computadores com os quais as crianças gostam de se comunicar. Quando esta comunicação ocorre, as crianças aprendem matemática como uma língua viva. Mais que isso, comunicação matemática e comunicação alfabética daí por diante transformam-se de

entidades estranhas e difíceis que são para a maioria das crianças em outras mais fáceis e naturais. A idéia de "falar matemática" a um computador pode ser generalizada numa visão de aprender matemática na "Matelândia",* isto é, num contexto que está para a aprendizagem da matemática assim como viver na França está para aprender francês.

Neste livro, a metáfora da "Matelândia" será usada para questionar idéias profundamente arraigadas sobre os dons intelectuais humanos. Por exemplo, geralmente se aceita que crianças não podem aprender geometria formal antes de freqüentar a escola por alguns anos e que muitas não podem aprendê-la nem mesmo assim. Entretanto, podemos facilmente observar que essas idéias baseiam-se em evidências extremamente fracas ao fazer questões, análogas sobre a capacidade das crianças aprenderem francês. Se tivéssemos que basear nossas opiniões na observação de quão mal as crianças aprendem francês nas escolas americanas, deveríamos concluir que a maioria das pessoas é incapaz de dominar esse conhecimento. Mas nós sabemos que qualquer criança normal, aprenderia facilmente o idioma se vivesse na França. Minha suposição é que muito do que hoje vemos como demasiadamente "formal" ou demasiadamente "matemático" será aprendido facilmente quando as crianças, num futuro bem próximo, crescerem num mundo rico em computadores.

Eu sou o estudo de nossas relações com a matemática como um exemplo para mostrar quanto os processos tecnológicos e sociais interferem na construção de idéias sobre as capacidades humanas. Exemplos matemáticos também nos ajudarão a elaborar uma teoria de como o aprendizado acontece e de como ele está errado.

Observo nas teorias de Jean Piaget¹ um modelo de crian-

* A palavra Matelândia é criada pelo autor usando o radical Mate, que significa guardar. No português existem termos que usam este prefixo, como no caso de Matesiologia que significa ciência do aprendizado (N.T.).

¹ Piaget está no centro das questões levantadas neste livro. Eu faço uma interpretação ligeiramente não-ortodoxa de sua posição teórica e uma interpretação muito não-ortodoxa das implicações de sua teoria para a educação. O leitor que desejar retornar às fontes necessita de alguma orientação, pois Piaget escreveu um grande número de livros, a maioria dos quais discute aspectos específicos do desenvolvimento das crianças, assumindo que outros livros já tenham sido lidos como um prefácio teórico. O melhor livro introdutório sobre Piaget é *Piaget*, de M. Boden

ças que podem ser vistas como construtoras de suas próprias estruturas intelectuais. As crianças parecem ser aprendizes inatos. Bem antes de irem à escola elas já apresentam uma vasta gama de conhecimentos que foram adquiridos por um processo que chamarei “aprendizagem piagetiana” ou “aprendizado sem ensino”. Por exemplo, aprender a falar, aprender a geometria intuitiva necessária para se deslocar no espaço, e aprender lógica e retórica suficientes para conviver com os pais — tudo isso sem terem sido “ensinadas”. Mas devemos perguntar por que alguns tipos de aprendizado ocorrem tão cedo e espontaneamente enquanto outros ficam mais atrasados ou jamais acontecem sem que sejam submetidos deliberadamente a uma instrução formal.

Se realmente olharmos “a criança como um construtor” estamos no caminho de uma resposta. Todos os construtores necessitam materiais para suas obras. Meu ponto de discordância com Piaget é quanto ao papel atribuído ao meio cultural como fonte desses materiais. Em alguns casos, o meio cultural fornece os materiais em abundância, facilitando assim o aprendizado construtivo piagetiano. Por exemplo, o fato de que tantas coisas importantes (garfos e facas, pais e mães, meias e sapatos) aparecem aos pares é um “material” para a construção do significado intuitivo de números. Mas em muitos casos em que Piaget explicaria o desenvolvimento mais lento de um conceito através da sua maior complexidade ou formalidade, eu vejo o fator crítico como sendo a relativa

(Londres, Harvester Press, 1979). Um bom ponto de partida para ler as obras de Piaget é o de H. E. Gruber e J. J. Voneche (orgs.), *The Essential Piaget: An Interpretive Reference and Guide* (Nova Iorque, Basic Books, 1977). Minha própria lista de livros de Piaget, os mais acessíveis e que fornecem uma melhor visão filosófica geral de suas idéias são: *The Child's Conception of the World* (Nova Iorque, Hartcourt, Brace & Co., 1929); *The Child's Conception of Physical Causality* (Nova Iorque, Hartcourt, Brace and Co., 1932); *The Psychology of Intelligence*, trad. Malcolm Piercy e D. E. Berlyne (Nova Iorque, Hartcourt, Brace and Co., 1950); *The Origins of Intelligence in Children*, trad. Margaret Cook (Londres, Routledge and Kegan Paul); *Introduction à l'Épistémologie Génétique* (Paris, Presses Universitaires de France, 1950); *Insights and Illusions in Philosophy*, trad. Wolfe Mays (Nova Iorque, The World Publishing Co., 1971); *The Grasp of Consciousness*, trad. Susan Wedgwood (Cambridge, Harvard University Press, 1976). Para a crítica dos “desenvolvedores do currículo piagetiano”, sobre os quais comentei estarem colocando Piaget “de cabeça para baixo”, ver G. Groen, “The theoretical ideas of Piaget and educational practice” in P. Suppes (org.) *The Impact of Research on Education*, (Washington, The National Academy of Education, 1978).

pobreza do meio cultural em materiais que tornariam o conceito simples e concreto. Em outros casos, ainda, o meio cultural pode fornecer materiais mas bloquear o seu uso. No caso da matemática formal há tanto uma falta de materiais formais quanto um bloqueio cultural. A “matofobia”,* endêmica à cultura contemporânea impede muitas pessoas de aprenderem qualquer coisa que reconheçam como “matemática”, embora elas não tenham dificuldades com o conhecimento matemático quando não o percebem como tal.

Veremos muitas vezes que as conseqüências da matofobia vão muito além da obstrução da aprendizagem da matemática e da ciência. Elas interagem com outras “toxinas culturais” endêmicas, por exemplo, as teorias populares das aptidões, para contaminar as imagens que as pessoas têm de si mesmas como aprendizes. Dificuldades com matemática escolar são muitas vezes os primeiros passos de um invasivo processo intelectual que nos leva a nos definir como um amontoado de aptidões e inaptidões, como sendo “matemáticos” ou “não-matemáticos”, “artísticos” ou “não-artísticos”, “músicos” ou “não-músicos”, “profundos” ou “superficiais”, “inteligentes” ou “idiotas”. Desse modo, as deficiências tornam-se a identidade e o aprendizado da livre exploração do mundo pela criança é transformado em tarefa desagradável, permeada de inseguranças e restrições auto-impostas.

Dois grandes temas — as crianças podem aprender a usar computadores habilmente e essa aprendizagem pode mudar a maneira como elas conhecem as outras coisas — orientaram meu programa de pesquisa sobre computadores e educação. Nos últimos dez anos, tive a oportunidade de trabalhar com um grupo de colegas e estudantes no MIT-Massachusetts Institute of Technology (o grupo LOGO,² pertencente ao Laboratório de Inteligência Artificial) para criar

* O autor usa a palavra “Mathophobia” com um duplo sentido: a fobia pela matemática e a fobia pelo aprendizado, já que o radical *mate*, do grego *mathe*, significa pensamento (ver cap. 2). (N.T.).

² LOGO é o nome de uma filosofia de educação, que é possível graças a uma família sempre crescente de linguagens de computação que acompanha essa filosofia. Algumas das características fundamentais da família de linguagens LOGO são as definições de procedimentos com variáveis locais que permitem a recursão. Assim,

ambientes onde crianças podem aprender a comunicar-se com computadores. A metáfora de imitar a maneira como as crianças aprendem a falar tem estado constantemente presente nesse trabalho e nos tem conduzido a uma visão de educação e de pesquisa educacional muito diferentes das tradicionais. Para as pessoas ligadas à profissão de ensinar, a palavra "educação" evoca o conceito de "ensino", especialmente o ensino em salas de aula. A meta da pesquisa educacional tende portanto a se concentrar no aperfeiçoamento desse ensino. Mas se, como tenho enfatizado aqui, o modelo de uma aprendizagem bem-sucedida for o de como a criança aprende a falar, num processo que ocorre sem ensino delibe-

em LOGO é possível definir novos comandos e funções que podem ser usados exatamente como as funções primitivas da linguagem. LOGO é uma linguagem interpretativa. Isso significa que ela pode ser usada de forma interativa. Os modernos sistemas LOGO têm uma estrutura completa de listas, isto é, a linguagem pode operar com listas, cujos membros podem ser listas também, listas de listas e assim por diante.

Algumas versões têm elementos de processamento paralelo e de passagem de mensagem para facilitar a programação gráfica. Um exemplo de um poderoso uso da estrutura de listas é a representação de procedimentos LOGO em forma de listas de listas, de tal maneira que procedimentos LOGO podem construir, modificar e executar outros procedimentos LOGO. Assim, LOGO não é um "brinquedo", uma linguagem somente para crianças. Os exemplos mais simples de uso de LOGO neste livro mostram algumas maneiras em que LOGO é especial por ter sido planejada para fornecer muito facilmente e bastante cedo acesso à programação de computadores para principiantes sem conhecimento matemático anterior. O subconjunto LOGO que contém os comandos da Tartaruga, a via de acesso mais utilizada para principiantes, é citado nesse livro como LINGUAGEM DA TARTARUGA, considerando o fato de que outras linguagens de computação, como SMALLTALK e PASCAL também implementaram Tartarugas em seus sistemas, usando comandos desenvolvidos originalmente na linguagem LOGO. O subconjunto LINGUAGEM DA TARTARUGA é facilmente transportável a outras linguagens.

Deve-se reforçar novamente a idéia de que LOGO nunca é concebida como produto final ou como "a linguagem definitiva". Aqui, eu a apresento como um exemplo para mostrar que é possível se fazer algo melhor.

Exatamente porque LOGO não é um brinquedo, mas uma poderosa linguagem de computação, é necessário dispor de uma memória consideravelmente maior do que para outras linguagens menos potentes como a BASIC. Isto até há bem pouco tempo significava que LOGO só poderia ser implementada em computadores muito grandes. Com o barateamento do custo da memória, esta situação está mudando rapidamente. No momento em que esse livro foi editado, protótipos dos sistemas LOGO estarão rodando em computadores do tipo APPLE II com 64 k e no ITAUTECH JUNIOR com 64 k de memória e placa gráfica. Os leitores que desejarem se manter informados sobre as novidades das implementações do LOGO poderão escrever-me para o projeto LOGO, MIT Artificial Intelligence Laboratory, 545; Technology Square, Cambridge, MASS. 02139, EUA.

rado e organizado, o objetivo a ser atingido é bem diferente. Vejo as salas de aula como um ambiente de aprendizado artificial e ineficiente que a sociedade foi forçada a inventar porque seus ambientes informais de aprendizado mostram-se inadequados para a aprendizagem de domínios importantes do conhecimento, como a escrita, gramática ou matemática escolar. Acredito que a presença do computador nos permitirá mudar o ambiente de aprendizagem fora das salas de aula de tal forma que todo o programa que as escolas tentam atualmente ensinar com grandes dificuldades, despesas e limitado sucesso, será aprendido como a criança aprende a falar, menos dolorosamente, com êxito e sem instrução organizada. Isso implica, obviamente, que escolas como as que conhecemos hoje não terão lugar no futuro. Entretanto, se as escolas se adaptarão transformando-se em algo novo ou se simplesmente decairão e serão substituídas, é uma questão em aberto.

Embora a tecnologia desempenhe um papel essencial na realização de minha visão sobre o futuro da educação, meu foco central não é a máquina mas a mente e, particularmente, a forma em que movimentos intelectuais e culturais se auto-definem e crescem. Na verdade, o papel que atribuo ao computador é o de um *portador* de "germes" ou "sementes" culturais cujos produtos intelectuais não precisarão de apoio tecnológico uma vez enraizados numa mente que cresce ativamente. Se não todas, muitas das crianças que crescem com amor e aptidão para a matemática devem esse sentimento, ao menos em parte, ao fato de que elas foram contagiadas pelos "germes" da "matecultura" dos adultos que, pode-se dizer, sabiam como "falar" matemática, mesmo que isto seja semelhante à maneira que Molière fazia M. Jourdain falar em prosa sem conhecê-la. Esses adultos de "fala" Matemática não sabem necessariamente resolver equações; ao invés disto, eles são dotados de um tipo de raciocínio evidente na lógica de seus argumentos e no fato de que, para eles, brincar significa lançar mão de trocadilhos, enigmas e paradoxos. Aquelas crianças que se mostram recalcitrantes para aprender matemática e ciências incluem-se entre as muitas que cresceram num meio relativamente escasso em adultos que "falassem" matemática. Essas crianças chegam à escola carentes dos elementos necessários para adquirir os conceitos da matemática escolar. A escola tem se revelado incapaz de suprir essa

lacuna e, ao forçar as crianças em situações pedagógicas condenadas de antemão, acaba por gerar sentimentos negativos muito fortes contra a matemática e talvez contra a aprendizagem em geral. Forma-se então um círculo vicioso. Essas mesmas crianças serão um dia pais e não somente fracassarão em passar aos filhos os “germes” matemáticos como certamente contagiarão suas crianças com os germes intelectualmente destrutivos da “matofobia”.

Afortunadamente, é suficiente quebrar o círculo vicioso em um ponto para que permaneça inutilizado para sempre. Mostrarei como computadores podem nos permitir fazer isto, rompendo o círculo sem gerar uma dependência da máquina. Minha discussão difere em dois aspectos, da maioria dos argumentos sobre “natureza *versus* criação”.* Serei mais específico tanto sobre que tipo de criação é necessário para o desenvolvimento intelectual quanto sobre o que pode ser feito para promover essa criação tanto no lar quanto num contexto social mais amplo.

Assim esse livro trata realmente de como uma cultura, uma maneira de pensar e uma idéia passam a habitar uma mente jovem. Eu tenho evitado pensar sobre esses problemas muito abstratamente e tratarei de abordá-los aqui com um foco bastante restrito. Eu me concentrarei nas maneiras de pensar que melhor conheço. Começo examinando o que sei sobre meu próprio desenvolvimento. Faço-o com toda humildade, sem nenhuma implicação de que o que sou hoje é o que todos deveriam ser. Mas penso que o melhor caminho para entender a aprendizagem é primeiro entender casos específicos, bem escolhidos, e depois tentar generalizar a partir desse conhecimento. Não se pode pensar seriamente sobre o pensamento sem pensar sobre pensar alguma coisa. E a coisa que melhor sei pensar é matemática. Quando escrevo sobre matemática neste livro, não me vejo escrevendo para matemáticos interessados no pensamento matemático em si. Meu interesse é por questões mais amplas: como as pessoas pensam e como aprendem a pensar.

* O autor usa o termo *Nature versus Nurture* para denotar uma dicotomia entre duas formas de desenvolvimento do pensamento. *Nature* refere-se a tudo que a pessoa traz consigo, uma marca do que a pessoa é, sua personalidade, interesse, etc. Algo inato, genético. *Nurture* denota o que cerca a pessoa, o que é criado ao redor dela, como o ambiente em que ela vive, etc. (N.T.).

Quando observo como me tornei matemático, vejo que muitas coisas foram idiossincráticas, muitas das quais não poderiam ser reproduzidas como parte de uma visão generalizada de reforma educacional. E certamente não creio que desejaríamos que todos se tornassem matemáticos. Mas eu penso que o prazer que sinto com a matemática deveria ser parte de uma visão genérica a respeito do que a educação deveria ser. Se conseguirmos compreender a essência das experiências de uma pessoa, seremos capazes de reproduzir suas conseqüências de outras maneiras, e em particular esta conseqüência de ver beleza em coisas abstratas. Assim, escreverei bastante sobre matemática. Peço desculpas aos leitores que a detestam, mas acrescento às minhas desculpas a oferta de ajudá-los a aprender a apreciá-la um pouco mais — ou ao menos a mudar a imagem do que pode ser “falar” matemática.

Nas primeiras páginas desse livro descrevi como as engrenagens facilitaram a entrada de idéias matemáticas em minha vida. Muitas condições contribuíram para sua efetividade. Primeiro, elas faziam parte de meu “cenário” natural, estavam embutidas no mundo ao meu redor. Por isto pude encontrá-las sozinho e me relacionar com elas à minha própria maneira. Segundo, as engrenagens faziam parte do mundo dos adultos que me cercavam e através delas eu podia me relacionar com estas pessoas. Terceiro, eu podia usar meu corpo para pensar sobre engrenagens. Eu podia sentir como as engrenagens giravam imaginando meu corpo girando. Isso me possibilitou usar o meu “conhecimento do corpo” para pensar sistemas de engrenagens. E finalmente, porque em todos os sentidos reais a relação entre engrenagens contém grande quantidade de informação matemática, eu podia usá-las para pensar sistemas formais. Isso mostra como as engrenagens me serviam como um “objeto-de-pensar”. Foi assim que as utilizei em meu desenvolvimento como matemático. As engrenagens me serviram também como um “objeto-de-pensar-com” em meu trabalho de pesquisa educacional. Meu objetivo tem sido o projeto de outros objetos que as crianças possam se apropriar à sua própria maneira. Grande parte deste livro descreverá o caminho percorrido neste tipo de pesquisa. Começo descrevendo um exemplo de “objeto-de-pen-

sar-com" computacional. É a "Tartaruga".

O papel central da Tartaruga neste livro não deve ser visto como uma panacéia para todos os problemas educacionais. Vejo-a como instrumento educacional válido, mas sua principal função é servir como modelo para outros objetos, ainda a serem inventados. Meu interesse está no processo de invenção desses "objetos-de-pensar-com", objetos em que há uma interseção de presença cultural, conhecimento implícito, e a possibilidade de identificação pessoal.

A Tartaruga é um animal cibernético controlado pelo computador. Ela existe dentro das miniculturas cognitivas do "ambiente LOGO", sendo LOGO a linguagem computacional que usamos para nos comunicar com a Tartaruga. Essa Tartaruga serve ao único propósito de ser fácil de programar e boa para se pensar. Algumas Tartarugas são objetos abstratos que vivem nas telas dos computadores. Outras,

³ A história da Tartaruga no projeto LOGO é a seguinte: em 1968-1969, a primeira classe de doze alunos "médios" da série da Muzzi Junior High School, em Lexington, Massachusetts, trabalhou com LOGO durante todo o ano escolar, ao invés de passar pelo currículo convencional de matemática. Naquele momento, o sistema LOGO não tinha ainda a parte gráfica. Os alunos escreveram programas que transformaram inglês em "Pig Latin", programas para jogos de estratégia, e outros ainda que criavam poesia concreta. Esta foi a primeira comprovação de que LOGO era uma linguagem de programação facilmente aprendida por principiantes. No entanto, eu queria ver essa comprovação estendida também a crianças de 5ª e 3ª séries e finalmente às crianças da pré-escola. Parecia óbvio que, apesar da facilidade em aprender a linguagem LOGO nessas idades, o mesmo não ocorreria com os tópicos de programação. Eu propus a Tartaruga como uma área de programação que podia ser interessante a pessoas de todas as idades. Toda essa expectativa tem sido confirmada pela experiência, e a Tartaruga, como instrumento de aprendizagem, tem sido amplamente aceita e adotada. Um trabalho pioneiro do uso de Tartaruga para ensinar crianças bem pequenas foi realizado por Radia Perlman que demonstrou, enquanto era estudante do MIT, que crianças de quatro anos podiam aprender a controlar Tartarugas mecânicas. Cynthia Solomon usou Tartarugas de vídeo na primeira demonstração de que crianças da 1ª série podiam aprender a programar. Na outra extremidade do leque de idades, é encorajador ver que a programação com a Tartaruga está sendo usada a nível universitário para ensinar PASCAL. Ver Kenneth L. Bowles, *Problem Solving Using PASCAL* (Nova Iorque, Springer-Verlag, 1977). Controlar as Tartarugas provou ser uma atividade muito atraente para crianças retardadas, autistas e para aquelas, enfim, com uma grande variedade de "problemas de aprendizagem". Ver, por exemplo, Paul Goldenberg, *Special Technology for Special Children* (Baltimore, University Park Press, 1979). As Tartarugas foram integradas ao sistema de computação SMALLTALK no Centro de Pesquisas da Xerox em Palo Alto (*Xerox Palo Alto Research Center*). Ver Alan Kay e Adele Goldberg, *Personal Dynamic Media* (Palo Alto, Califórnia, Xerox, Palo Alto Research Center, 1976).

como as Tartarugas que andam no chão, são objetos físicos e podem ser manuseadas como qualquer outro brinquedo mecânico. Um primeiro encontro quase sempre começa mostrando-se à criança como a Tartaruga pode ser compelida a se movimentar através da digitação de comandos num teclado. PARAFRENTE 100 faz com que a Tartaruga se desloque em linha reta para a frente numa distância de 100 passos de Tartaruga, mais ou menos de um milímetro cada. PARADI-REITA 90 faz a Tartaruga girar 90 graus à direita. ABAIXE-CANETA faz com que a Tartaruga abaixe a caneta deixando um rastro ao se movimentar, enquanto LEVANTECANETA comanda-a para levantar a caneta (nesse caso seu deslocamento não deixará rastro). É claro que as crianças precisam fazer muitas explorações antes de poder dominar o significado dos números. Mas a tarefa é entusiasmante o suficiente para conduzir as crianças através desse processo de aprendizagem.

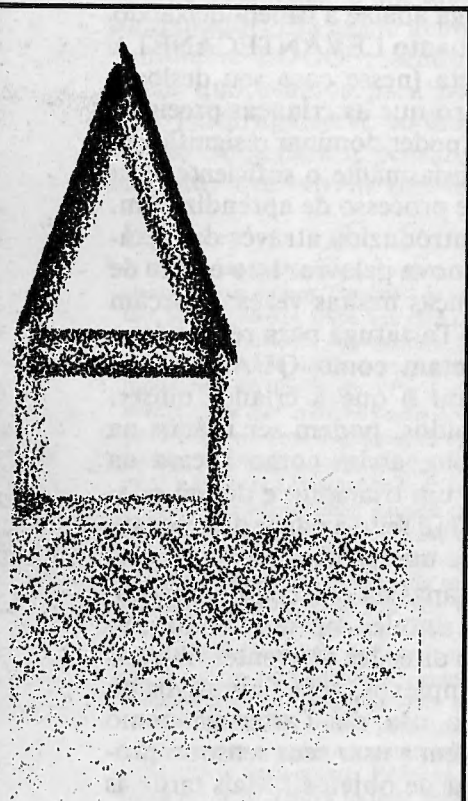
A idéia de programação é introduzida através da metáfora de ensinar à Tartaruga uma nova palavra. Isso é feito de maneira muito simples, e as crianças muitas vezes começam suas experiências programando a Tartaruga para responder a novos comandos que elas inventam como QUADRADO, TRIÂNGULO, QUA ou TRI, ou o que a criança quiser. Novos comandos, uma vez definidos, podem ser usados na definição de outros. Por exemplo, assim como a casa da Figura 1 é construída a partir de um triângulo e de um quadrado, o programa para desenhá-la é feito a partir dos comandos que desenharam um quadrado e um triângulo.

A Figura 1 mostra quatro etapas da evolução deste programa. A partir destes desenhos simples o programador iniciante pode prosseguir em muitas direções diferentes. Alguns trabalham em desenhos mais complexos, seja figurativos ou abstratos. Outros abandonam o uso da Tartaruga como instrumento de desenho e aprendem a usar seus sensores programando-a para tocar ou desviar de objetos.⁴ Mais tarde as crianças aprendem que o computador pode ser programado para produzir música assim como para mover as Tartarugas e combinam as duas atividades fazendo as Tartarugas dançarem. Ou as crianças podem mudar das Tartarugas que andam

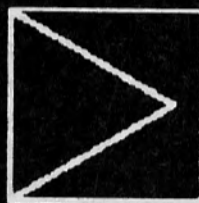
⁴ Tartaruga com Sensores de Toque. O programa usando sensores mais simples em LOGO é assim:

Figura 1

Um plano...

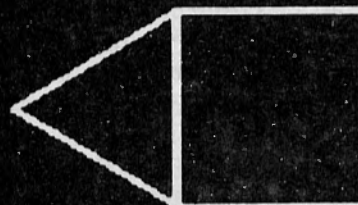


Um problema...

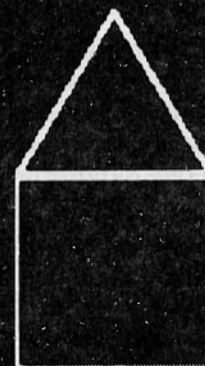


UMA CASA
QUA
TRI

E Um Ajuste



UMA CASA
QUA
DIREITA 30
TRI
FIM



UMA CASA
DIREITA 90
QUA
DIREITA 30
TRI
FIM

no chão para as que “vivem” na tela, que podem ser programadas para desenhar nesta tela objetos coloridos que se movem. Os exemplos são muito variados, mas em cada um a criança está aprendendo a exercer controle sobre um “microcosmo” excepcionalmente rico e sofisticado.

Os leitores que nunca usaram computadores interativos podem achar difícil imaginar onde tudo isso nos leva. Como um exercício mental, eles podem pensar num caderno eletrônico, uma tela gráfica de computador de um futuro não muito distante. Isto seria como uma televisão que é capaz de apresentar figuras coloridas em movimento. Pode-se “desenhar” na tela dando-lhe instruções, talvez através do teclado, talvez através da fala, ou então apontando com uma “varinha mágica”. Quando solicitada, uma série de faixas coloridas poderia aparecer na tela e a pessoa escolheria uma cor apontando a varinha para aquela cor. Se a escolha não for alterada, os desenhos continuam sendo feitos naquela cor. Até este ponto, a distinção entre essas idéias e os materiais de artes tradicionais pode parecer sutil, mas a distinção torna-se real

UMA TROMBADA
REPITA
PARAFRENTE 1
TESTE SENSORFRONTAL
SEVERD PARADIREITA 180
FIM

Comentários:
Repetir todos os passos.
A Tartaruga se movimenta.
Checa se houve batida em algo.
Se houver, dá meia volta.

Este programa faz com que a Tartaruga dê meia volta quando encontrar um objeto. Um programa mais sutil e mais instrutivo usando a Tartaruga de Sensor é o seguinte:

UMA PERSEGUIÇÃO
REPITA
PARAFRENTE 1
TESTE SENSORESQUERDO
SEVERD PARADIREITA 1
SEFALSO PARAESQUERDA 1
FIM

Comentários:
Checa: bate em alguma coisa?
Pensa que está muito perto; afasta-se.
Pensa que pode perder objeto; vira-se para ele.

Este programa faz com que a Tartaruga contorne um objeto de qualquer formato, desde que no começo ela tenha o seu lado esquerdo em contato com o objeto (e desde que o objeto e quaisquer irregularidades em seu contorno sejam grandes comparados à Tartaruga).

Um projeto bastante instrutivo para um grupo de estudantes seria desenvolver este programa (ou um equivalente) desde os primeiros passos, pedindo a eles que mostrem como poderiam usar o tato para contornar um objeto e traduzindo suas estratégias em termos de comandos para a Tartaruga.

quando começamos a pensar em alterar o desenho. Podemos “falar” com o desenho em linguagem computacional. Podemos “dizer-lhe” para substituir uma cor por outra ou colocá-lo em movimento. Podemos fazer duas cópias do desenho e ordenar que girem em sentidos opostos. É possível também substituir as faixas coloridas por faixas de sons e “desenhar” uma peça musical. Podemos arquivar os trabalhos na memória do computador e acioná-los quando desejar, ou, para a satisfação de nossos amigos, podemos distribuí-los na memória de qualquer um dos milhões de outros computadores ligados à rede central de comunicação.

Que tudo isto seria divertido nem é preciso dizer. Mas é mais que divertimento. Poderosos tipos de aprendizagem estão ocorrendo. Ao trabalhar com o “caderno eletrônico” as crianças aprendem uma linguagem para falar sobre formas e fluxos de formas, sobre velocidade e graus de variações, sobre processos e procedimentos. Elas estão aprendendo a “falar” matemática e adquirindo uma nova imagem de si mesmos como matemáticos.

Em minha descrição de crianças trabalhando com as Tartarugas, afirmei que elas podem aprender a programar. Para alguns leitores isso pode ser equivalente ao estado de descrença que é necessário quando entramos num teatro para assistir uma peça. Para eles, programação é uma habilidade difícil e lucrativa adquirida por alguns adultos matematicamente bem-dotados. Mas minha experiência é muito diferente. Eu já vi centenas de crianças do 1º grau aprender facilmente a programar acumulando-se evidências que indicam que crianças ainda mais jovens também poderiam fazê-lo. As crianças nesses estudos não são excepcionais, ou melhor, são excepcionais de todas as maneiras possíveis. Algumas são extremamente bem-sucedidas na escola, outras foram diagnosticadas como incapazes cognitivamente ou emocionalmente. Algumas foram tão severamente atingidas pela paralisia cerebral que nunca tinham manipulado intencionalmente nenhum objeto. Outras expressaram seus talentos em formas “matemáticas”, outras em formas “verbais”, e outras ainda em formas artisticamente “visuais” ou “musicais”.

É claro que essas crianças não atingiram uma fluência em programação que sequer pudesse ser comparada ao uso da linguagem falada. Se usássemos a metáfora da Matelândia,

seriamente poderíamos dizer que sua experiência com computadores era mais como aprender francês passando uma ou duas semanas de férias na França, do que vivendo lá. Mas, como as crianças que passaram as férias com os primos que falavam outra língua, elas estavam claramente no caminho de “falar computador”.

Quando penso sobre o que esses estudos significam tenho duas impressões bem claras. Primeiro, a de que todas as crianças, sob condições corretas, adquirirão uma tal destreza em programação que isso se tornará um de seus feitos intelectuais mais avançados. Segundo, que as “condições corretas” são muito diferentes do tipo de acesso aos computadores que agora está sendo estabelecido como norma nas escolas. As condições necessárias para o tipo de relacionamento com o computador que descreverei nesse livro requerem muito mais livre acesso às máquinas do que os atuais planejadores educacionais prevêm. Elas requerem também um tipo de linguagem computacional e um ambiente de aprendizagem criado ao redor desta linguagem muito diferentes daqueles que a escola atual está agora propiciando. Elas requerem até mesmo um tipo de computador bastante diferente daqueles que as escolas estão comprando.

Usarei a maior parte do livro para dar um sentido melhor à escolha de computadores, linguagens e, mais especificamente, de culturas computacionais que influenciam quanto as crianças aprenderão a partir do trabalho com a computação e que benefícios elas terão ao desenvolver esse trabalho. A questão da viabilidade econômica do livre acesso de cada criança ao computador pode ser abordada imediatamente. Ao fazer isso, espero remover quaisquer dúvidas que os leitores possam ter sobre o “realismo” econômico da visão educacional que estou propondo.

Minha visão sobre um novo tipo de ambiente de aprendizagem exige livre contato entre as crianças e os computadores. Isso poderia ocorrer porque a família da criança compra um ou algum amigo da criança possui um computador. Para o propósito da discussão aqui (e para estender nossa discussão a todos os grupos sociais), vamos assumir que isso aconteça porque as escolas dão a cada um de seus alunos um poderoso computador pessoal. A maioria das pessoas “práticas” (incluindo pais, professores, diretores e administra-

dores escolares) reagem a essa hipótese de forma semelhante: “Mesmo que os computadores tivessem todos os efeitos de que você fala, seria impossível pôr suas idéias em prática. De onde viria o dinheiro para isso?”

O que essas pessoas dizem deve ser encarado honestamente. Elas estão erradas. Consideremos o grupo de crianças que entrarão para o pré-primário em 1987, a “turma do ano 2000”,* e façamos alguns cálculos. O custo direto da educação de uma criança durante 13 anos, desde o pré até a 12.^a série,** hoje em dia é de mais ou menos US\$ 20.000,00 (vinte mil dólares) — para a turma do ano 2000 pode ser algo próximo a US\$ 30.000,00. Por outro lado, uma estimativa conservadoramente alta do custo para fornecer a cada uma dessas crianças um computador capaz de atender aos objetivos educacionais descritos nesse livro, e permitir incrementos, reparos e substituições quando necessário, estaria em torno de US\$ 1.000,00 por aluno, distribuídos ao longo dos 13 anos de escolaridade. Assim, os “custos computacionais” para a turma do ano 2000 representariam somente 5% do gasto público total em educação, e isso seria possível mesmo que nada mais mudasse na estrutura dos custos educacionais por causa da presença do computador. Mas, na verdade, a presença dos computadores na educação tem boas chances de baratear outros aspectos. As escolas poderão reduzir seu ciclo de treze para doze anos; poderão tirar vantagens da maior autonomia que o computador dá ao estudante e aumentar o tamanho das classes em um ou dois alunos sem diminuir a atenção pessoal dada a cada um. Qualquer uma dessas duas mudanças “compensaria” os custos dos computadores.

Minha meta não é discutir a economia da educação: não é usar a computação para eliminar um ano do período que a criança passa numa escola obsoleta ou forçar a entrada de um aluno a mais numa classe escolar. O objetivo desse pequeno exercício de “orçamento educacional” é preparar o estado de espírito de meus leitores para a leitura do primeiro capítulo do livro. Eu tenho me apresentado como um utópico educa-

* Nas escolas americanas o ano da turma é indicado pelo ano em que o aluno vai sair da escola, e não o ano em que ele entrou, como acontece no Brasil (N.T.).

** No sistema de educação americano, a escola de 2.^o grau tem quatro séries em vez de três, como acontece no nosso sistema (N.T.).

cional — não porque projetei um futuro da educação em que as crianças estarão rodeadas por alta tecnologia, mas porque acredito que certos usos da poderosa tecnologia computacional e das idéias computacionais podem prover as crianças com novas possibilidades de aprender, pensar e crescer tanto emocional como cognitivamente. Nos capítulos seguintes tentarei dar-lhes alguma idéia dessas possibilidades, muitas das quais dependem de um futuro cheio de computadores, onde eles ocuparão uma parte significativa da vida rotineira de cada criança. Quero, porém, que os leitores vejam claramente que o que é “utópico” em minha visão e nesse livro é uma maneira especial de usar os computadores, de forjar novos relacionamentos entre os computadores e as pessoas — que o computador estará aqui para ser usado é simplesmente uma premissa conservadora.

Computadores e culturas do computador

Na maioria das situações educacionais contemporâneas em que crianças são postas em contato com computadores, o computador é usado para fornecer-lhes informações respeitando-se ritmo e características individuais de cada criança, e para prover atividades dentro de um nível apropriado de dificuldade. É o computador programando a criança. No ambiente LOGO a relação é inversa: a criança, mesmo em idade pré-escolar, está no controle — a criança programa o computador. E ao ensinar o computador a “pensar”, a criança embarca numa exploração sobre a maneira como ela própria pensa. Pensar sobre modos de pensar faz a criança tornar-se um epistemólogo, uma experiência que poucos adultos tiveram.

Esta imagem poderosa da criança como um epistemólogo veio à minha imaginação quando eu trabalhava com Piaget. Em 1964, depois de cinco anos no Centro de Epistemologia Genética de Piaget, fiquei impressionado com sua maneira de ver as crianças como construtores ativos de suas próprias estruturas intelectuais. Entretanto, dizer que estruturas intelectuais são construídas pelo aluno ao invés de ensinadas por um professor não significa que elas sejam construídas do nada. Pelo contrário, como qualquer outro construtor, a criança se apropria, para seu próprio uso, de materiais

que ela encontra e, mais significativamente, de modelos e metáforas sugeridos pela cultura que a rodeia.

Piaget escreveu sobre a ordem em que a criança desenvolve diferentes habilidades intelectuais. Eu dou mais ênfase do que ele, para a determinação desta ordem, à influência dos materiais que uma cultura particular oferece. Por exemplo, nossa cultura é muito rica em materiais úteis para a construção, por parte da criança, de certos componentes do pensamento numérico e lógico. As crianças aprendem a contar; aprendem que o resultado da contagem é independente de ordem e arranjos especiais; elas estendem esta "conservação" para o raciocínio sobre as propriedades dos líquidos colocados em recipientes ou dos sólidos que mudam de forma. As crianças desenvolvem tais componentes do pensamento de maneira inconsciente e "espontânea", isto é, sem ensino deliberado. Outros componentes do conhecimento, tais como as habilidades envolvidas na realização de permutações e combinações, desenvolvem-se mais vagarosamente, ou mesmo não se desenvolvem sem um ensino formal. No seu todo, este livro é um argumento de que em muitos casos importantes esta diferença de desenvolvimento pode ser atribuída à pobreza relativa de nossa cultura em materiais a partir dos quais estas estruturas intelectuais, aparentemente "mais avançadas", possam ser construídas. Este argumento será bem diferente das interpretações culturais de Piaget que buscam diferenças entre crianças de cidades européias ou americanas e crianças de tribos das selvas africanas. Quando me refiro à nossa cultura, refiro-me a algo menos local. Não quero contrastar Nova Iorque ao Chade. Estou interessado na diferença entre as culturas pré-computador (seja em cidades americanas ou em tribos africanas) e as "culturas com computadores" que podem estar desenvolvendo-se em qualquer lugar nestas próximas décadas.

Eu já indiquei uma razão para acreditar que a presença do computador deve ter efeitos mais fundamentais no desenvolvimento intelectual do que aqueles efeitos produzidos por outras tecnologias, inclusive a televisão e até mesmo a imprensa. A metáfora do computador como uma entidade que "fala" uma linguagem matemática coloca o aprendiz numa nova qualidade de relacionamento com um importante domínio do conhecimento. Mesmo o melhor em matéria de televi-

são educativa está limitado a oferecer progressos somente quantitativos para os tipos de aprendizagem que existiam sem a televisão. "Vila Sésamo" pode oferecer explicações melhores ou mais envolventes que as que a criança recebe dos pais ou de professores de pré-primário, mas a criança continua ainda na posição de ouvinte das explicações. Em contraste, quando a criança aprende a programar, o processo de aprendizagem é transformado. Em particular, o conhecimento é adquirido para um propósito pessoal reconhecível. A criança faz alguma coisa com ele. O novo conhecimento é uma fonte de poder e é experienciado como tal a partir do momento que começa a se formar na mente da criança.

Referi-me à matemática sendo aprendida de uma nova maneira. Mas muito mais, além da matemática, é afetado. É possível ter uma idéia da extensão do que é mudado, se examinarmos uma outra idéia de Piaget. Ele diferencia o pensamento "concreto" do pensamento "formal". O pensamento concreto já se encontra em formação quando a criança entra no primeiro ano escolar, aos seis anos, e é consolidado nos próximos anos. O pensamento formal não se desenvolve antes dos doze anos, ou por volta dos doze anos, e, como sugerem alguns pesquisadores, algumas pessoas nunca desenvolvem o pensamento formal de maneira completa. Eu não aceito por completo a distinção de Piaget, mas estou convencido de que ela está suficientemente próxima da realidade para nos auxiliar a compreender a idéia de que as conseqüências para o desenvolvimento intelectual provocadas por uma inovação poderiam ser qualitativamente maiores que os efeitos quantitativos acumulados de milhares de outras inovações. Minha suposição é que o computador pode concretizar (e personalizar) o formal. Sob este prisma, o computador não é somente mais um instrumento educacional poderoso. Ele é único a nos permitir os meios para abordar o que Piaget e muitos outros identificam com o obstáculo que deve ser transposto para a passagem do pensamento infantil para o pensamento adulto. Eu acredito que o computador pode nos permitir mudar os limites entre o concreto e o formal. Conhecimentos que só eram acessíveis através de processos formais podem agora ser abordados concretamente. A verdadeira mágica vem do fato de que estes conhecimentos incluem elementos necessários para tornar alguém um "pensador formal".

Esta descrição do papel do computador é bastante abstrata. Devo concretizá-la através do exame de alguns efeitos do trabalho com computador em dois tipos de pensamento que Piaget associa com o estágio formal do desenvolvimento intelectual: pensamento combinatório, onde se raciocina em termos do conjunto de todos os estados possíveis de um sistema, e pensamento auto-referencial, da reflexão sobre o próprio pensamento.

Num experimento típico em pensamento combinatório, é pedido à criança para formar todas as possíveis combinações (ou famílias) de contas de cores variadas. É realmente interessante que a maioria das crianças seja incapaz de formar combinações de maneira sistemática e acurada antes de chegar à 5ª ou 6ª série. Por que isto deve ser assim? Por que esta tarefa parece ser tão mais difícil que outros feitos intelectuais realizados por crianças de sete ou oito anos de idade? Essa estrutura lógica é essencialmente mais complexa? É possível que ela requeira um mecanismo neurológico que não amadurece antes da entrada na puberdade? Eu acho que uma explicação mais plausível é propiciada pela observação da natureza da cultura. A tarefa de combinar famílias de contas pode ser vista como a construção e execução de um programa bastante comum, no qual duas repetições são encadeadas (*nested loops*): fixe uma primeira cor e combine-a com todas as segundas cores possíveis, repita isso até que todas as primeiras cores tenham sido esgotadas. Para alguém habituado com computadores e programação, não existe nada de "formal" ou abstrato nesta tarefa. Para uma criança numa cultura de computador, isto seria tão concreto quanto combinar garfos e facas na mesa de jantar. Até mesmo o erro de incluir a mesma família duas vezes (por exemplo: vermelho-azul e azul-vermelho) seria bem conhecido. Nossa cultura é rica em pares, duplas e correspondências um-a-um de todos os tipos, e tem uma rica linguagem para se falar de todas essas coisas. Esta riqueza provê o incentivo e um suprimento de modelos e ferramentas para a criança construir maneiras de pensar em coisas tais como: três pedaços grandes de doce são mais ou menos que quatro pedacinhos bem menores? Para tais problemas nossas crianças adquirem um excelente senso intuitivo de qualidade. Porém, nossa cultura é relativamente pobre em modelos de procedimentos sistemáticos. Até bem recente-

mente, não havia nem mesmo um nome na linguagem popular para programação, muito menos idéias de como programar bem. Não existe uma palavra para *nested-loop* nem uma palavra para o erro de contagem duplicada. Mais ainda, não existem palavras para as poderosas idéias conhecidas como *bug* e *debugging*.

Sem o incentivo ou os materiais para construir formas poderosas e concretas para se pensar problemas que envolvem sistematização, as crianças são forçadas a abordá-los de maneiras tateantes e abstratas. Assim, fatores culturais comuns tanto à cidade americana como às aldeias africanas podem explicar a diferença na idade em que as crianças constroem seu conhecimento intuitivo de quantidade e de sistematização.

Quando trabalhava em Genebra, tornei-me sensível à maneira pela qual materiais da então muito jovem cultura de computador estavam permitindo aos psicólogos desenvolver novas formas de pensar sobre o pensar.¹ De fato, minha entrada no mundo dos computadores foi fortemente motivada pela idéia de que as crianças poderiam também beneficiar-se, talvez até mais que os psicólogos, da maneira pela qual os modelos do computador pareciam capazes de dar forma concreta a áreas do conhecimento que pareciam ser anteriormente intangíveis e abstratas.

Comecei por examinar como crianças que haviam aprendido a programar computadores podiam usar modelos concretos do computador para pensar sobre o pensar e aprender sobre o aprender, e assim fazendo, aumentar seus poderes como psicólogos e como epistemólogos. Por exemplo, muitas crianças têm sua aprendizagem retardada porque possuem um modelo de aprendizagem onde só existe o "acertou" e o "errou". Mas, quando se aprende a programar um compu-

¹ O programa UMA PERSEGUIÇÃO (veja nota 4 da Introdução) é um exemplo bem simples de como uma poderosa idéia cibernética (controle através de reforço negativo) pode ser usada para elucidar um fenômeno biológico ou psicológico. Mesmo simples, o exemplo ajuda a diminuir a lacuna entre modelos físicos de "mecanismo causal" e fenômenos psicológicos tais como a "intenção". Os psicólogos teóricos têm usado programas mais complexos dentro do mesmo espírito para construir modelos de praticamente todos os fenômenos psicológicos conhecidos. Uma formulação precisa do espírito dessa pesquisa pode ser encontrada em Herbert A. Simon, *Sciences of the Artificial*, (Cambridge, MIT Press, 1969).

tador dificilmente se acerta na primeira tentativa. Especializar-se em programação é aprender a se tornar altamente habilitado a isolar e corrigir *bugs*, as partes que impedem o funcionamento desejado do programa. A questão a ser levantada a respeito do programa não é se ele está certo ou errado, mas se ele é executável. Se esta maneira de avaliar produtos intelectuais fosse generalizada para o como a cultura pensa sobre conhecimento e sua aquisição, poderíamos ser menos intimados pelo medo de "estar errado". Esta influência potencial do computador na mudança de nossas noções de sucesso e fracasso é um exemplo de uso do computador como um "objeto-de-pensar-com". Obviamente não é necessário trabalhar com o computador para adquirir boas estratégias de aprendizagem. Certamente, estratégias de *debugging* foram desenvolvidas por aprendizes bem-sucedidos muito antes do computador existir. Mas refletir sobre a aprendizagem por analogia com o desenvolvimento de um programa é uma maneira acessível e poderosa de começar a ser mais articulado em suas próprias estratégias de *debugging* e mais deliberado em aperfeiçoá-las.

Minha discussão sobre uma cultura de computadores e seu impacto sobre o pensamento pressupõe uma penetração maciça de computadores poderosos na vida das pessoas. Que isso vai acontecer não há a menor dúvida. A calculadora, os jogos eletrônicos e o relógio digital chegaram até nós como resultado de uma revolução industrial que fez baixar rapidamente o preço dos artigos eletrônicos num mesmo período em que todos os outros preços subiam com a inflação. Essa mesma revolução tecnológica, que aconteceu graças ao circuito integrado, está nos trazendo agora os computadores pessoais. Grandes computadores custavam milhões de dólares porque eles eram construídos com milhões de partes fisicamente separadas. Nessa nova tecnologia um circuito complexo não é montado com partes separadas, mas construído como um todo, uma entidade sólida de onde vem o termo "circuito integrado". O efeito da tecnologia do circuito integrado sobre os custos pode ser entendido se o compararmos com a atividade de imprimir livros. O principal gasto ao se fazer um livro ocorre bem antes da impressora começar a funcionar. Os maiores gastos são escrever, editar e preparar os tipos. Outros gastos ocorrem após a impressão: encader-

nação, distribuição e comercialização. O custo real da impressão de cada livro é insignificante. E isto é verdade tanto para um livro importante como para um livro banal. Da mesma maneira a maior parte dos custos de um circuito integrado está nos processos preparatórios; o custo real para se fabricar um circuito integrado é insignificante se for garantido que muitos serão vendidos para ratear o custo de todo o processo de desenvolvimento. As conseqüências dessa tecnologia nos custos da computação são dramáticas. Computadores que teriam custado centenas de milhares de dólares nos anos sessenta, e dezenas de milhares no início dos anos setenta, podem agora ser feitos por menos de um dólar. A única limitação é que um circuito em particular deve caber no que corresponde a uma "página" — isto é, a pastilha de silicone (*silicon chips*) em que os circuitos são gravados através de corrosão.

Mas a cada ano, de maneira regular e previsível, a arte de gravar circuitos nos *chips* de silicone está se tornando cada vez mais refinada. Cada vez mais circuitos complexos podem ser espremidos num *chip* e o poder do computador, que pode ser produzido com menos de um dólar, aumenta. Minha previsão é que bem antes do final do século, as pessoas comprarão brinquedos com tanto poder computacional quanto o dos grandes computadores IBM à venda hoje por milhões de dólares. Quanto aos computadores que serão usados como tal, a maior parcela de seu custo será relativa aos equipamentos periféricos, como o teclado. Mesmo que esses preços não caiam, é provável que um supercomputador custe o equivalente a uma máquina de escrever ou a uma televisão.

Todos os especialistas realmente concordam que os preços dos computadores cairão a um nível tal que eles farão parte do dia-a-dia das pessoas em grande quantidade. Alguns serão usados como computadores propriamente ditos, ou seja, máquinas programáveis. Outros poderão aparecer como jogos de complexidade sempre crescente, ou em supermercados automatizados onde as prateleiras, e talvez até as latas, falarão. Com relação a este assunto podemos realmente deixar que a nossa imaginação voe alto. Não há dúvidas de que o lado material da vida se tornará diferente para todo mundo, e talvez muito mais para as crianças. Entretanto, tem havido diferenças significativas de opinião sobre os efeitos que a presença do computador acarretará. Tentarei distinguir

meu pensamento de duas correntes às quais passarei a me referir aqui como a "cética" e a "crítica".

Os céticos não acham que a presença do computador possa acarretar mudanças nas maneiras como as pessoas aprendem e pensam. Eu tenho formulado uma série de explicações possíveis sobre por que eles pensam assim. Em alguns casos, acho que os céticos vêem a educação e o efeito que os computadores podem ter sobre ela numa perspectiva muito limitada. Ao invés de considerarem efeitos culturais em geral, eles focalizam sua atenção no uso de computadores como uma máquina de instrução programada. Os céticos concluem então que, embora os computadores possam produzir algumas melhoras na aprendizagem escolar, não é provável que levem a mudanças fundamentais. Num certo sentido, também, acredito que o ponto de vista dos céticos deriva de uma falha na apreciação de quanto a "aprendizagem piagetiana" ocorre à medida que uma criança cresce. Se uma pessoa entende o desenvolvimento intelectual das crianças (ou mesmo o desenvolvimento moral ou social) como uma derivação direta do ensino deliberado, então tal pessoa provavelmente seria capaz de subestimar o efeito potencial que a presença maciça de computadores e outros meios interativos pode ter sobre elas.

Os críticos,² por outro lado, acreditam que a presença de computadores fará diferença e sentem-se apreensivos. Por

² Os críticos e céticos a que nos referimos aqui são inferências e de muitos anos de debates públicos e privados. Essas atitudes são muitas vezes assumidas mas, infelizmente, raramente publicadas, e dessa forma geralmente não são discutidas com nenhum rigor. Um crítico que deu um bom exemplo ao publicar seus pontos de vista é Joseph Weizenbaum, em *Computer Power and Human Reason: From Judgement to Calculations* (São Francisco, W. H. Freeman, 1976).

Infelizmente, o livro de Weizenbaum discute duas questões separadas (embora relacionadas): se os computadores ferem a maneira das pessoas pensarem e se os computadores por si sós podem pensar. A maioria das revisões críticas de Weizenbaum enfocam a última questão, em que ele se associa à Hubert L. Dreyfus, *What Computers Can't do: A Critique of the Artificial Reason* (Nova Iorque, Harper and Row, 1972).

Uma boa descrição de alguns dos principais participantes no debate sobre se os computadores podem ou não pensar é encontrada em Pamela McCorduck, *Machines Who Think*, (São Francisco, W. H. Freeman, 1979).

Há poucos dados publicados sobre se os computadores afetam realmente a maneira de pensar das pessoas. Esta questão foi estudada por S. Turkle e apresentada no seu livro *The Second Self: Computers and the Human Spirit* (Simon and Schuster, 1984).

exemplo, eles temem que maior interação e comunicação via computadores possa diminuir o nível de associação humana e resultar em fragmentação social. Desde que saber como usar um computador torna-se cada vez mais necessário para um bom desempenho econômico e social, a posição dos menos privilegiados poderia piorar e o computador aumentaria exacerbadamente as diferenças de classe existentes. Quanto aos efeitos políticos que os computadores terão, as preocupações dos críticos assemelham-se às imagens orwellianas de um 1984 em que os computadores domésticos serão parte de um complexo sistema de vigilância e controle mental. Os críticos também chamam a atenção sobre potenciais desastres trazidos à saúde mental pela penetração dos computadores. Alguns desses desastres são manifestações exageradas de problemas que já preocupam muitos observadores da vida contemporânea; outros são problemas de um tipo essencialmente novo. Um exemplo típico do primeiro caso é que nossa profunda ignorância a respeito do impacto psicológico da televisão torna-se ainda mais grave quando visualizamos uma era de supertevê. O presente poder e impacto psicológico da televisão poderiam ser aumentados pelo computador em pelo menos duas vezes. Os programas poderiam ser variados o bastante para agradar ao gosto de cada espectador e os *shows* poderiam tornar-se interativos, fazendo com que o telespectador entre em ação e faça parte do espetáculo. Tais coisas pertencem ao futuro, mas pessoas preocupadas com o impacto social do computador já citam casos de estudantes que passam noites em claro debruçados sobre um terminal de computador, chegando mesmo a negligenciar os estudos e os contatos sociais. Esse tipo de problema ocorre a alguns pais quando eles observam um tipo especial de fascínio na reação de seus próprios filhos ao brincar com os ainda rudimentares jogos eletrônicos.

Na categoria de problemas inteiramente novos que agravaram versões de problemas antigos, os críticos têm apontado a influência do processo de raciocínio alegadamente mecanizado dos computadores sobre a maneira de pensar das pessoas. A máxima de Marshall McLuhan, "o meio é a mensagem", poderia ser aplicada aqui: se o meio é um sistema interativo que reconhece palavras e responde como uma pessoa, é fácil entender a mensagem de que máquinas são como

peças e pessoas são como máquinas. O que isto poderia acarretar para o desenvolvimento dos valores e da auto-imagem das crianças em crescimento é difícil de prever. Mas não é difícil enxergar razões para se preocupar.

Apesar desses receios eu sou essencialmente otimista — alguns diriam utópico — sobre os efeitos dos computadores na sociedade. Não menosprezo os argumentos dos críticos. Pelo contrário, eu também vejo a presença dos computadores como uma potente influência sobre a mente humana. Estou absolutamente ciente do atual poder de um computador interativo e de como o seu uso como um modelo pode influenciar a maneira como pensamos sobre nós mesmos. Na verdade, o trabalho com LOGO, a que dediquei a maior parte dos últimos dez anos, consiste precisamente em desenvolver tais forças em direções positivas. Por exemplo, o crítico fica horrorizado com a idéia de uma criança ser hipnotizada por uma supermáquina futurística de fliperama, computadorizada. No trabalho com LOGO nós inventamos versões de tais máquinas em que importantes idéias de física, matemática ou lingüística estão embutidas de uma maneira que permitem ao “jogador” aprendê-las de forma natural, assim como a criança aprende a falar. O tal “poder” do computador, tão temido pelos críticos, torna-se uma ferramenta educacional muito útil. Ou tome-se um outro exemplo, mais profundo. O crítico tem medo de que as crianças venham a adotar o computador como modelo e eventualmente passem a “pensar mecanicamente” como ele. Seguindo em direção oposta, inventei maneiras de tirar vantagens educacionais da oportunidade de dominar a arte de *deliberadamente* pensar como um computador, de acordo, por exemplo, com o estereótipo de um programa que é executado de maneira seriada, literal e mecânica. Há situações em que esse estilo de pensamento é apropriado e útil. Algumas das dificuldades das crianças em aprender matérias formais como gramática ou matemática devem-se à sua incapacidade para entender a utilidade deste estilo de pensamento.

Uma segunda vantagem educacional é indireta mas, em última instância, mais importante. Ao aprender deliberadamente a emitir o pensamento mecânico, o estudante torna-se capaz de articular o que é pensamento mecânico e o que não é. Esse exercício pode aumentar a confiança na habilidade de

escolher um estilo cognitivo que sirva a um determinado problema. A análise do “pensamento mecânico” e de como ele difere dos outros, bem como a prática na análise de problemas podem resultar num novo grau de sofisticação intelectual. Ao fornecer um modelo bem concreto de um estilo de pensamento específico, trabalhar com o computador pode tornar mais fácil a compreensão de que existe algo como um “estilo de pensamento”. E dar às crianças a oportunidade de escolher um estilo ou outro proporciona condições para desenvolver a habilidade necessária para optar entre diferentes estilos. Assim, ao invés de induzir ao pensamento mecanicista, o contato com computadores poderia acabar sendo o melhor antídoto contra isso. Para mim, o que é mais importante nisto é que, através dessas experiências, as crianças estariam desenvolvendo o seu aprendizado como epistemólogos, isto é, aprendendo a pensar articuladamente sobre o pensamento.

Os ambientes intelectuais oferecidos às crianças pelas sociedades atuais são pobres em recursos que as estimulem a pensar sobre o pensar, aprender a falar sobre isto e testar suas idéias através da exteriorização das mesmas. O acesso aos computadores pode mudar completamente esta situação. Até mesmo o mais simples trabalho com a Tartaruga pode abrir novas oportunidades para tornar mais acurado nosso ato de pensar sobre o pensar: programar a Tartaruga começa com a reflexão sobre como nós fazemos o que gostaríamos que ela fizesse; assim, ensiná-la a agir ou “pensar” pode levar-nos a refletir sobre nossas próprias ações ou pensamentos. E à medida que as crianças progridem, passam a programar o computador para tomar decisões mais complexas e acabam engajando-se na reflexão de aspectos mais complexos de seu próprio pensamento.

Em resumo, embora o crítico e eu acreditemos que trabalhar com computadores pode ter grande influência na maneira de pensar das pessoas, dediquei toda a minha atenção ao estudo de como essa influência poderia ter direções mais positivas.

Eu vejo dois tipos de contra-argumentos que podem ser usados para rebater minha argumentação contra os críticos. O primeiro tipo questiona minha convicção de que ser um epistemólogo é uma coisa boa para as crianças. Muitos dirão

que um pensamento demasiadamente analítico e verbalizado é contraproducente, mesmo se ele é deliberadamente escolhido. O segundo tipo de objeção questiona minha afirmação de que é provável que o computador influencie um tipo de pensamento mais reflexivo e autoconsciente. Muitos dirão que o tipo de trabalho com o computador tem em geral o efeito oposto. Essas duas objeções requerem diferentes tipos de análise e não podem ser discutidas simultaneamente. A primeira delas suscita questões técnicas sobre a psicologia da aprendizagem, o que será discutido nos capítulos 4 e 6. A segunda objeção pode ser mais diretamente abordada dizendo-se que não há, por enquanto, nenhuma certeza de que os computadores terão o efeito que espero ver. Nem todos os sistemas computacionais permitem isto. A maioria dos computadores utilizados hoje em dia não o fazem. Vi centenas de crianças que, ao usar LOGO, engajavam-se em animadas discussões sobre seus conhecimentos pessoais à medida que tentavam transmiti-los à Tartaruga sob a forma de programas para fazê-la desempenhar as ações que eles sabiam muito bem como fazer. É claro que a simples presença do computador não é o bastante para garantir que esse tipo de conversa ocorrerá sempre. Longe disso. Em milhares de escolas e em dezenas de milhares de lares as crianças estão vivenciando hoje experiências bem diferentes com o computador. Na maioria dos casos o computador está sendo usado como um jogo eletrônico extremamente versátil ou como uma "máquina de ensinar" programadas para ajudar as crianças nas atividades de aritmética ou ortografia. E mesmo quando essas crianças são ensinadas pelos pais, por um amigo ou por um professor a escrever programas numa linguagem como BASIC, esta atividade é completamente dissociada do tipo de reflexão epistemológica que vemos nos ambientes em que se trabalha com LOGO. Assim, eu partilho com os críticos um ceticismo sobre o que está sendo feito agora com a computação. Mas estou interessado em estimular uma mudança mais radical no sentido de como as coisas podem ser. A linha-base para tais mudanças é política. O que está acontecendo hoje em dia é uma questão empírica. O que pode acontecer é uma questão técnica; mas o que acontecerá é uma questão política, dependente das opções sociais.

As questões centrais em aberto a respeito do efeito dos

computadores sobre as crianças nos anos oitenta são: que pessoas serão atraídas para o mundo dos computadores, que talento elas trarão e que gostos e ideologias imporão à crescente cultura dos computadores? Eu já descrevi casos em que crianças trabalhando com LOGO engajam-se em discussões auto-referenciais sobre seu próprio pensamento. Isso é possível porque a linguagem LOGO e a Tartaruga foram criadas por pessoas que têm prazer nesse tipo de discussão e se empenharam muito para criar um meio que a encorajasse. Os criadores de outros sistemas de computação têm interesses e idéias diferentes sobre que tipos de atividades são mais adequadas para crianças. Que tipo de sistema irá prevalecer e em que subcultura é algo que não depende simplesmente de uma decisão burocrática tomada, por exemplo, em um Ministério da Educação ou por comissões de especialistas. As tendências quanto ao estilo computacional emergirão de uma complexa teia de decisões tomadas por fundações de pesquisa com recursos suficientes para apoiar um ou outro estilo, por empresas preocupadas com seu mercado, por escolas, pelos indivíduos que decidirão fazer carreira num novo campo de atividade e pelas crianças que participarão destas decisões através de sua preferência e do que elas farão com isso. As pessoas freqüentemente perguntam se as crianças do futuro programarão os computadores ou se estarão absorvidas em atividades pré-programadas. A resposta é que algumas farão uma coisa, algumas a outra, algumas farão ambas e algumas não farão nenhuma delas. Mas a decisão a respeito de quais crianças e, principalmente, que classe social de crianças fará parte de qual categoria, será influenciada pelo tipo de atividades e pelos tipos de ambientes computacionais criados ao redor delas.

Como um exemplo, consideremos uma atividade que pode não ocorrer à maioria das pessoas quando pensam sobre computadores e crianças: seu uso como um instrumento para escrever. Para mim, escrever um artigo significa fazer um rascunho e aperfeiçoá-lo, gastando nisso um considerável período de tempo. Minha auto-imagem como escritor inclui a expectativa de uma primeira versão "inaceitável" que irá se desenvolvendo através de sucessivas alterações até chegar a uma forma apresentável. No entanto, eu não poderia ter essa imagem se fosse um aluno de 3ª série. O próprio ato de escre-

ver seria algo vagaroso e muito trabalhoso. Eu não teria secretária. Para a maioria das crianças, reescrever um texto é tão trabalhoso que o primeiro rascunho acaba sendo a versão final, e a habilidade de reler o texto com olhos críticos nunca é adquirida. Isso muda drasticamente quando a criança tem acesso a computadores capazes de processar textos. A primeira versão é elaborada diretamente no computador. As correções podem ser feitas facilmente. A cópia em uso está sempre limpa e bem apresentada. Já presenciei uma criança passar da total rejeição à redação para um intenso envolvimento (acompanhado de rápida melhora na qualidade dos textos) depois de poucas semanas de trabalho usando computador. Mudanças mais dramáticas foram registradas em crianças que apresentavam deficiências físicas que em geral tornam o ato de escrever à mão muito difícil ou até mesmo impossível.

Essa maneira de usar o computador está sendo adotada até mesmo por escritores profissionais. A maioria dos jornais fornece a seus funcionários equipamentos dotados de processadores de textos. Muitos escritores que trabalham em casa estão comprando seu próprio computador, e os terminais de computadores estão substituindo implacavelmente a máquina de escrever como ferramenta fundamental das secretárias. A idéia de crianças usando o computador para escrever é um exemplo perfeito de minha teoria de que aquilo que é bom para os profissionais é bom para as crianças. No entanto, essa imagem de que o computador pode ajudar as crianças a dominar a arte de escrever é diametralmente oposta à que está se enraizando nas escolas de 1º grau. Ali, o computador é visto como um instrumento de ensino. Ele fornece à criança os exercícios sobre a distinção entre verbos e substantivos, sobre ortografia, e é utilizado para responder testes de múltipla escolha sobre o significado de pequenos textos. Do meu ponto de vista, a divergência não é somente uma questão técnica de opção entre duas estratégias de ensino. Ela reflete uma diferença fundamental de filosofias da educação. Mais precisamente, reflete uma diferença de pontos de vista em relação à natureza da infância. Acredito que o uso de computadores como um instrumento para escrever oferece à criança uma oportunidade de se tornar mais semelhante aos adultos, e até mesmo aos profissionais mais competentes, tanto na relação

com sua produção intelectual quanto na sua relação consigo mesma. Entretanto, esse modo de utilização do computador provoca um verdadeiro choque com muitos aspectos da escola cujo efeito, para não dizer intenção, é "infantilizar" a criança.

Processadores de textos *podem* mesmo tornar a experiência de escrever, para a criança, bastante parecida à de um escritor. Mas isso pode ser solapado se os adultos que estão à volta da criança não conseguirem apreciar o que é ser um escritor. Por exemplo, é muito comum observar adultos, inclusive professores, dizendo que corrigir e recorrer um texto é perda de tempo ("Por que você não faz algo novo?" ou "Suas correções estão sendo improdutivas; se você quer melhorar sua redação, por que não melhora a ortografia?").

O que acontece com o ato de escrever pode acontecer com composição musical, jogos, gráficos complexos ou qualquer outra coisa: o computador não é uma cultura em si mesmo, mas serve para promover diferentes perspectivas culturais e filosóficas. Por exemplo, poderíamos pensar na Tartaruga como um instrumento para ensinar assuntos do currículo tradicional, como noções de ângulos, formas e sistemas de coordenadas. De fato, a maioria dos professores que me consultam sobre seu uso estão, compreensivelmente, tentando usá-la dessa maneira. Suas dúvidas são sobre a organização em sala de aula, sobre quando usá-la, e sobre questões pedagógicas relativas à introdução da Tartaruga e, em especial, sobre como a Tartaruga se relaciona conceitualmente com o resto do currículo. Certamente a Tartaruga pode colaborar no ensino do currículo tradicional, mas eu a vejo fundamentalmente como um veículo para estimular a aprendizagem piagetiana, que, para mim, é aprender sem currículo.

Há os que pensam em criar um "currículo piagetiano" ou "métodos de ensino piagetianos". Mas para mim essas frases e as atividades que elas representam são contradições. Eu vejo Piaget como o teórico da aprendizagem sem currículo, o teórico do tipo de aprendizagem que ocorre sem o ensino deliberado. Transformá-lo no teórico de um novo tipo de currículo é colocá-lo de ponta-cabeça.

Mas "ensinar sem currículo" não quer dizer salas de aula completamente livres nem simplesmente "deixar a criança por conta própria". Significa dar todo o apoio à criança

enquanto ela constrói suas estruturas intelectuais com materiais obtidos na cultura que a circunda. Nesse modelo, a intervenção educacional significa mudanças na cultura, a introdução de novos elementos construtivos e a eliminação de elementos perniciosos. Esse empreendimento é muito mais ambicioso do que a introdução de uma mudança no currículo, mas é algo plausível nas condições que começam agora a emergir.

Suponhamos que trinta anos atrás um educador concluisse que a melhor maneira de resolver o problema do ensino da matemática seria fazer com que uma significativa parcela da população se tornasse fluente em (e entusiasmada com) uma nova linguagem matemática. A idéia poderia ter sido boa a princípio, mas na prática teria sido um absurdo. Ninguém teria a possibilidade de implementá-la. Hoje em dia as coisas são diferentes. Milhões de pessoas estão aprendendo linguagens de programação por razões que não têm nada a ver com a educação de crianças. Assim, torna-se bastante exequível a proposta de influenciar a forma das linguagens que essas pessoas aprendem e a possibilidade de que seus filhos venham a aprendê-las também.

O educador deve atuar como um antropólogo. E, como tal, sua tarefa é trabalhar para entender que materiais dentre os disponíveis são relevantes para o desenvolvimento intelectual. Assim, ele deve identificar que tendências estão ocorrendo no meio em que vivemos. Uma intervenção significativa só acontece quando se trabalha de acordo com essas tendências. Em meu papel de educador-antropólogo eu vejo novas necessidades sendo geradas pela penetração dos computadores na vida das pessoas. As pessoas que têm computadores em casa ou as que os usam no trabalho querem ser capazes de falar sobre eles a seus filhos. Elas vão querer também ser capazes de ensinar suas crianças a usar as máquinas. Dessa maneira, poderia ocorrer uma demanda cultural por algo como LOGO, de uma maneira que nunca aconteceu, e talvez nunca poderia acontecer, com a demanda cultural pela matemática moderna.

Ao longo desse capítulo venho discutindo as maneiras pelas quais as decisões tomadas por educadores, fundações, governos e indivíduos podem afetar as mudanças potencialmente revolucionárias de como as crianças aprendem. No entanto, fazer boas escolhas nem sempre é fácil, em parte

porque escolhas feitas no passado podem muitas vezes causar-nos obsessões. Há uma forte tendência para que os primeiros produtos utilizáveis de uma nova tecnologia se cristalizem de tal forma que chegam a ser tomados como padrão rígido. Costumo chamar esse fenômeno de fenômeno QWERTY.

A fila de cima das teclas alfabéticas de uma máquina de escrever comum forma em suas seis primeiras letras o vocábulo QWERTY. Para mim isso simboliza a maneira pela qual a tecnologia pode muitas vezes servir não como uma força de progresso mas como algo para manter tudo como está. O arranjo QWERTY não tem uma explicação racional, somente uma razão histórica. Ele foi introduzido como a solução de um problema existente nos primórdios da máquina de escrever: as teclas se encavalavam muito umas nas outras. A idéia foi minimizar o problema de colisão separando as teclas que eram mais freqüentemente usadas em seqüência. Poucos anos depois, o aperfeiçoamento tecnológico resolveu esse problema, mas o QWERTY permaneceu. Uma vez adotado, resultou em muitos milhões de máquinas de escrever e até em um método (na verdade quase um currículo completo) para aprender datilografia. Os custos sociais de uma mudança (por exemplo, colocar as teclas mais usadas *juntas* no teclado) são enormes pelo fato de que muitos dedos hoje sabem usar o teclado QWERTY. Assim, QWERTY permanece, apesar da existência de outros sistemas mais "racionais". Por outro lado, se você consultar algumas pessoas sobre o QWERTY, elas poderão justificá-lo através de critérios "objetivos". Elas dirão que esse tipo de teclado "otimiza isso" ou "minimiza aquilo". Embora essas justificativas não tenham qualquer fundamentação racional, elas ilustram um processo, um processo social na verdade, de construção de mitos, que nos permite elaborar justificativas para o primitivismo em qualquer sistema. Acredito que estejamos prestes a fazer exatamente o mesmo com o computador. Estamos no processo de nos afundarmos num anacronismo ao tentar preservar práticas que não têm nenhuma base racional além de razões históricas enraizadas num período anterior de desenvolvimento teórico e tecnológico.

O uso de computadores para exercitar e praticar certas habilidades é somente um exemplo de fenômeno QWERTY no domínio da computação. Outros exemplos ocorrem quan-

do se fazem tentativas para permitir que os estudantes aprendam a programar o computador. Como veremos em capítulos posteriores, aprender a programar computadores envolve a aprendizagem de uma "linguagem de programação". Há muitas linguagens disponíveis — por exemplo, FORTRAN, PASCAL, BASIC, SMALLTALK e LISP, e uma menos conhecida, LOGO, que nosso grupo tem usado na maioria de nossos experimentos com computadores e crianças. O fenômeno QWERTY ocorre intensamente quando escolhemos a linguagem na qual a criança vai aprender a programar. Argumentarei com detalhes que essa é uma questão que acarreta conseqüências. Uma linguagem de programação assemelha-se a uma língua natural, humana, na medida em que favorece certas metáforas, imagens e maneiras de pensar. A linguagem usada determina em grande parte a cultura computacional. Pareceria natural que os educadores interessados no uso de computadores e sensíveis às influências culturais prestassem especial atenção à escolha da linguagem. Mas nada disso tem acontecido. Pelo contrário, educadores, muito tímidos em questões tecnológicas ou muito ignorantes para tentar influenciar as linguagens oferecidas pelos fabricantes de computadores, aceitaram algumas delas da mesma maneira que aceitaram passivamente o teclado QWERTY. Um exemplo típico disso é a maneira pela qual a linguagem de programação BASIC³ se estabeleceu como sendo a linguagem mais óbvia a ser usada para ensinar as crianças americanas a programar os computadores. A informação técnica relevante é a seguinte: é

³ Muitas versões de BASIC permitiriam que um programa produzisse uma forma como a conseguida pelo programa UMA CASA, feito em LOGO. O exemplo mais simples ficaria mais ou menos assim:

```
10 PLOT (0,0)
20 PLOT (100,0)
30 PLOT (100,100)
40 PLOT (75,150)
50 PLOT (0,100)
60 PLOT (0,0)
70 END
```

Escrever um programa como esse tem muitas desvantagens comparado a um programa em LOGO como uma primeira experiência em programação. Exige mais do principiante, em particular, conhecimentos sobre coordenadas cartesianas. Essa exigência seria menos séria se o programa, uma vez escrito, pudesse

fácil fazer um computador de pequeno porte compreender BASIC, enquanto que outras linguagens exigem mais do computador. Desta forma, nos tempos em que a capacidade de computação era extremamente cara, havia uma justificativa técnica genuína para o uso de BASIC, particularmente em escolas onde o orçamento era sempre pequeno. Hoje em dia, na verdade de uns anos para cá, o custo da memória do computador caiu a tal ponto que as vantagens econômicas do uso da BASIC tornaram-se insignificantes. Mesmo assim, na maioria das escolas secundárias, essa linguagem continua sendo sinônimo de programação, apesar da existência de outras linguagens que são comprovadamente mais fáceis de aprender e mais ricas em benefícios intelectuais que podem decorrer de seu aprendizado. A situação é paradoxal. A revolução do computador apenas começou e já está criando seu próprio conservadorismo. Se examinarmos mais de perto a linguagem BASIC teremos um exemplo de como um sistema social conservador consegue se apropriar e neutralizar um instrumento potencialmente revolucionário.

BASIC é para a computação o que QWERTY é para a datilografia. Muitos professores aprenderam BASIC, muitos livros foram escritos sobre BASIC, e muitos computadores foram construídos de tal forma que a linguagem passou a fazer parte integrante de seu *hardwars*. No caso das máquinas de escrever, vimos como as pessoas inventam "racionaliza-

tornar-se uma ferramenta poderosa para outros projetos. Os programas QUADRADO, TRIÂNGULO e CASA, em LOGO, podem ser usados para desenhar quadrados, triângulos e casas em qualquer posição e orientação na tela. O programa em BASIC permite que se desenhe uma determinada casa em uma posição. Para conseguir com que um programa em BASIC desenhe casas em muitas posições, é necessário usar variáveis algébricas como em PLOT (x, y), PLOT (x + 100, y) e assim por diante. As versões comumente usadas de BASIC não permitem definir novos comandos, tais como QUADRADO, TRIÂNGULO e CASA, ou pelo menos estão aquém disso, de maneira que não se consegue fazê-lo através do uso de modernos métodos de programação. Defensores do BASIC podem replicar que: 1) essas objeções referem-se somente à experiência de principiantes; e 2) essas deficiências do BASIC poderiam ser sanadas. O primeiro argumento simplesmente não é verdadeiro: o primitivismo prático e intelectual do BASIC estende-se até o nível mais avançado de programação. O segundo argumento foge um pouco do ponto central de minhas objeções. É claro que se poderia transformar BASIC em LOGO ou SMALLTALK, ou qualquer outra coisa e ainda chamá-lo BASIC. Minha objeção é que o que está sendo introduzido no mundo da educação não tem sido "consertado". Mais ainda, fazê-lo seria semelhante a "reformatar" uma casa de madeira para transformá-la num arranha-céu.

ções” para justificar o *status quo*. No caso da BASIC, o fenômeno foi muito mais longe, a ponto de se assemelhar ao processo de formação de ideologia. Argumentos complexos são inventados para justificar características da BASIC, inicialmente introduzidas porque a tecnologia primitiva da época assim exigia ou porque outras alternativas não eram ainda bem conhecidas no período em que a linguagem foi desenvolvida.

Um exemplo da ideologia BASIC é o argumento de que ela é fácil de aprender por ter um vocabulário bastante reduzido. A validade aparente desse argumento é logo posta em dúvida se ele for aplicado ao contexto de como as crianças aprendem línguas. Imaginemos a hipótese de inventar uma linguagem especial para ajudar as crianças a aprender a falar. Essa linguagem teria um pequeno vocabulário de somente cinquenta palavras, mas cinquenta palavras tão bem escolhidas que todas as idéias poderiam ser expressas por elas. Seria mais fácil aprender essa linguagem hipotética? Talvez fosse fácil aprender seu vocabulário, mas seu uso para expressar o que se quer dizer seria tão distorcido que somente as crianças mais motivadas e brilhantes aprenderiam a dizer mais que “oi!”. Esta situação é bem próxima do que acontece com BASIC. Seu pequeno vocabulário pode ser aprendido rapidamente, mas usá-lo é um outro problema. Os programas em BASIC adquirem uma estrutura tão *labiríntica* que somente as crianças mais motivadas e brilhantes (as mais “matemáticas”) aprendem a usá-las para fins além daqueles mais triviais.

Alguém poderia perguntar por que os professores não notam a dificuldade que as crianças têm para aprender BASIC. A resposta é simples: a maioria dos professores não espera um alto desempenho dos alunos, especialmente numa área do conhecimento que parece ser tão “matemática” e “formal” quanto a programação. Assim, a percepção muito comum em nossa cultura de que a matemática é algo inacessível colabora para a manutenção da BASIC, o que por sua vez reforça essa percepção. Além disso, os professores não são os únicos cujas idéias e preconceitos alimentam o círculo vicioso que perpetua a BASIC. Há também os especialistas em computação, que tomam as decisões sobre que linguagens seus computadores serão capazes de “falar”. Essas pessoas, em geral engenheiros, acham BASIC bastante fácil de apren-

der, em parte por estarem acostumados a aprender tipos de sistemas muito técnicos e em parte pelo tipo de simplicidade apresentada na BASIC encontrar eco em seu sistema de valores. Dessa forma, uma subcultura em particular, dominada pelos engenheiros de computação, está influenciando o universo educacional no sentido de favorecer os estudantes que mais se identifiquem com essa subcultura. O processo é tácito, não intencional: ele nunca foi ventilado publicamente e muito menos avaliado. Por tudo isso, a penetração social da BASIC tem consequências sociais muito mais sérias do que os problemas acarretados pelo fenômeno QWERTY.

Há muitas outras maneiras através das quais os atributos das subculturas envolvidas com computadores são projetados no mundo da educação. Por exemplo, a idéia do computador como um instrumento de exercício e prática tão atraente para a maioria dos professores por assemelhar-se aos métodos de ensino tradicionais, também é atraente para os engenheiros que projetam os sistemas de computadores: aplicações em práticas repetitivas são previsíveis, simples de descrever e eficientes no uso dos recursos da máquina. Assim, o melhor do talento dos engenheiros acaba sendo usado para o desenvolvimento de sistemas de computação que favoreçam esse tipo de aplicação. Esse favorecimento ocorre muito sutilmente. Os projetistas das máquinas não decidem realmente o que será feito em sala de aula. Isso é definido pelos professores e ocasionalmente até por pesquisas e experimentos comparativos cuidadosamente controlados. Há, no entanto, uma certa ironia nesses experimentos controlados: eles são ótimos para dizer se pequenos efeitos detectados nos melhores resultados são reais ou dependem de sorte. Mas eles não têm capacidade de avaliar os efeitos reais (e provavelmente mais poderosos) dos preconceitos embutidos nas máquinas.

Já observamos que as tendências mais conservadoras infiltradas no uso de computadores em educação também ocorreram quando do aparecimento de outras novas tecnologias. A primeira utilização de uma nova tecnologia acontece naturalmente de maneira muito semelhante à que acontece antes de seu aparecimento. Passaram-se muitos anos até que os projetistas de automóveis aceitassem a idéia de que se tratava de carros, e não mais de “carruagens sem cavalos”, e os precursores das fitas de cinema modernas eram peças

teatrais em que os atores atuavam como se houvesse público, na verdade agora à frente somente de uma câmera. Foi necessária toda uma geração para que a arte do cinema se firmasse como algo bem distinto de uma composição linear de teatro e fotografia. A maior parte de tudo o que tem sido feito até hoje sob o nome genérico de "tecnologia educacional" ou "computadores em educação" acha-se ainda no estágio da composição linear de velhos métodos instrucionais com novas tecnologias. Os tópicos que passarei a discutir são algumas das primeiras investigações visando uma interação mais orgânica de princípios educacionais fundamentais e novos métodos para transformá-los em realidade.

Estamos hoje em um ponto da história da educação em que uma mudança radical é possível, e a possibilidade para que tal mudança ocorra está diretamente vinculada ao impacto do computador. Hoje o que se oferece no "mercado" educacional é em grande parte determinado pelo que é aceitável num sistema moroso e conservador. Mas é exatamente aí que a presença do computador contribui para o processo da criação de um ambiente próprio a mudanças. Considerem-se as condições nas quais uma nova idéia educacional pode ser colocada em prática hoje e num futuro próximo. Suponhamos que hoje eu tenha uma idéia de como as crianças poderiam aprender matemática de maneira mais efetiva e humana. Suponhamos também que eu tenha sido capaz de persuadir um milhão de pessoas de que minha idéia é boa. Para muitos produtos, um mercado com tal potencial teria sucesso garantido. Porém, no universo da educação de hoje, isso teria pouco impacto: um milhão de pessoas espalhadas por todo o país ainda significaria uma minoria no sistema escolar de cada pequena cidade, e assim não haveria um canal de expressão para esse milhão de vozes. Dessa maneira, não somente boas idéias educacionais mofam nas estantes, mas o próprio processo de invenção é sufocado. Essa inibição da invenção influencia, por sua vez, a seleção de pessoas que se envolvem em educação. Muito poucas com a imaginação, a criatividade e a determinação necessárias para inventar coisas novas chegam a procurar o campo educacional. E a maioria das que o fazem acabam por abandoná-lo por frustração. O conservadorismo no mundo da educação tornou-se um fenômeno social autoperpetuador.

Felizmente, há um elo fraco nesse círculo vicioso. Num futuro próximo, cada vez mais os computadores serão propriedade privada de indivíduos, o que devolverá a cada um, gradualmente, o poder de determinar seus próprios padrões educacionais. A educação acabará por tornar-se algo mais privado, e pessoas com boas idéias, idéias interessantes, diferentes e empolgantes não se verão mais no dilema de ter que "vendê-las" a uma burocracia conservadora ou engavetá-las. Elas serão capazes de oferecê-las a um mercado aberto diretamente aos consumidores. Haverá novas oportunidades para a imaginação e a originalidade. E isto poderá até mesmo provocar o renascimento do pensamento sobre a educação.

Matofobia: o medo de aprender

Platão escreveu na sua porta: “Entrada permitida apenas para geômetras”. Os tempos mudaram. A maioria das pessoas que agora procuram penetrar no mundo intelectual de Platão não conhecem matemática nem percebem a mínima contradição no desdém de sua proibição. A separação esquizofrênica de nossa cultura entre “humanas” e “ciências” reforça seus sentimentos de segurança. Platão era filósofo e filosofia pertence à área de humanas, assim como certamente a matemática pertence à de ciências.

Essa grande divisão está solidamente estabelecida em nossa língua, em nossa visão de mundo, em nossa organização social, em nosso sistema educacional e, mais recentemente, mesmo em nossas teorias de neurofisiologia. É um círculo vicioso perpétuo: quanto mais a cultura é dividida, mais cada lado constrói separações em seus novos domínios.

Já sugeri que o computador pode atuar como uma força para destruir a divisão entre as “duas culturas”. Sei que o humanista pode achar questionável que uma “tecnologia” possa mudar seus pressupostos sobre que tipo de conhecimento é relevante para a sua perspectiva de compreensão das pessoas. E, para o cientista, a diminuição do rigor pela intro-

missão do “tolo” pensamento humanista pode ser não menos ameaçador. Entretanto, acho que a presença do computador pode plantar sementes que conseguiriam gerar uma cultura epistemológica menos dissociada.

O *status* da matemática na cultura contemporânea é um dos sintomas mais agudos dessa dissociação. O aparecimento de uma matemática “humanista”, que não seja entendida como sendo tão distante do estudo do homem e das áreas de humanas, pode bem ser o prenúncio de que uma mudança está acontecendo. Tentarei mostrar neste livro como a presença do computador pode levar as crianças a uma relação mais humanística, assim como mais humana, com a matemática. Ao fazê-lo, terei que ir além da discussão sobre a matemática. Terei que desenvolver uma nova perspectiva do processo de aprendizagem em si mesmo.

Não é raro que adultos inteligentes se tornem observadores passivos de sua própria incompetência em qualquer coisa além da matemática mais rudimentar. Eles podem perceber as conseqüências diretas desta paralisia intelectual em termos de limitação das possibilidades de emprego, por exemplo. Mas as conseqüências indiretas, secundárias, são ainda mais sérias. Um dos principais tópicos aprendidos pelas pessoas nas aulas de matemática é o sentido de possuir limitações rígidas. Adquirem uma imagem do conhecimento humano cheio de divisões que passam a ver como uma colcha de retalhos de territórios separados por cortinas de ferro intransponíveis. Minha objeção não é com relação à supremacia dos territórios intelectuais, mas sim às restrições impostas à livre movimentação entre eles. Não pretendo reduzir a matemática à literatura, ou vice-versa, mas quero argumentar que seus respectivos processos de raciocínio não são tão separados como se supõe usualmente. Assim, uso a imagem da Matelândia — onde a matemática se tornaria um vocabulário natural — para desenvolver minha idéia de que a presença dos computadores poderia aproximar as culturas humanística e matemático-científica. Nesse livro, Matelândia é o primeiro passo numa argumentação mais ampla sobre como a presença do computador pode mudar não somente a maneira como ensinamos matemática às crianças, mas, muito mais fundamentalmente, a maneira como nossa cultura como um todo pensa sobre conhecimento e aprendizagem.

Aos meus ouvidos, a palavra matofobia leva a duas associações. Uma delas é o conhecido medo da matemática, que muitas vezes tem a intensidade de uma verdadeira fobia. A outra vem do significado do radical *mathe*. Em grego significa “aprender” de maneira geral.*

Em nossa cultura, o medo de aprender não é menos endêmico (embora mais freqüentemente dissimulado) do que o medo da matemática. As crianças iniciam sua vida como aprendizes ávidas e competentes. *Aprendem* a ter problemas com a aprendizagem em geral e com a matemática em particular. Em ambos os sentidos de “mathe” há uma mudança de “matófilo” para “matófobo”, de amante da matemática e da aprendizagem para uma pessoa fóbica em ambas. Veremos aqui como ocorre essa transformação e desenvolveremos algumas idéias sobre como a presença do computador poderia servir para neutralizá-la. Começarei fazendo algumas reflexões sobre o que é aprender como uma criança.

Que as crianças aprendem muito parece tão óbvio à maioria das pessoas que elas acreditam não valer a pena documentar. Uma área em que é muito claro que ocorre um alto grau de aprendizagem é a da aquisição do vocabulário falado. Aos dois anos, muito poucas crianças conhecem mais que algumas centenas de palavras. Quatro anos mais tarde, quando entram no pré-primário, conhecem milhares de palavras. Elas estão evidentemente aprendendo a cada dia muitas palavras novas.

Embora nós possamos “ver” que as crianças aprendem palavras, não é tão fácil ver que elas estão aprendendo matemática numa razão igual ou ainda maior. Mas isto é precisamente o que foi mostrado por Piaget ao longo de toda uma vida de estudos sobre a origem do conhecimento na criança. Uma das conseqüências mais sutis de suas descobertas é a revelação de que os adultos não conseguem avaliar a extensão e a natureza do que as crianças estão aprendendo porque as estruturas do conhecimento que assumimos como corretas tornaram invisível a maior parte daquela aprendizagem. Observamos isso mais claramente naquilo que passou a ser conhecido como “conservações” piagetianas (veja Figura 2).

* O significado original está presente na palavra “polímata”, uma pessoa de muitos aprendizados. Uma palavra menos conhecida com o mesmo radical, que usarei em capítulos posteriores, é Matética, que se relaciona com o aprendizado.

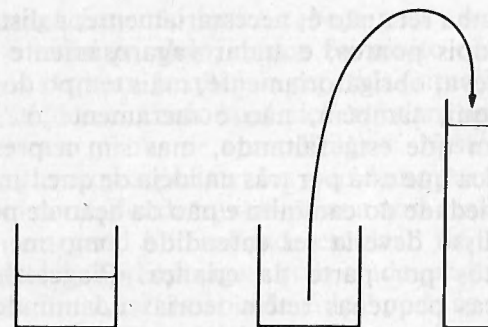


Figura 2

A conservação dos líquidos

Para um adulto é óbvio que despejar o líquido de um copo em outro não muda seu volume (ignorando-se algumas gotinhas derramadas ou deixadas como sobra). A conservação do volume é tão óbvia que não ocorreu a ninguém antes de Piaget que crianças de quatro anos poderiam não achar o fato absolutamente óbvio.* É necessário um crescimento intelectual substancial antes das crianças desenvolverem a visão “conservacionista” do mundo. A conservação do volume é somente uma dentre as várias conservações que todos nós aprendemos. Outra é a conservação dos números. Novamente, não ocorre à maioria dos adultos que uma criança precisa aprender que contar uma certa quantidade de objetos numa ordem diferente leva ao mesmo resultado. Para os adultos, contar é simplesmente um método de determinar quantos objetos há. O resultado da operação é um “fato objetivo”, independente do ato de contar. Mas a separação entre números e o ato de contar (entre produto e processo) baseia-se em pressuposições epistemológicas não somente desconhecidas das crianças pré-conservacionistas, como também estranhas à sua visão de mundo. Essas conservações são somente parte de uma vasta estrutura de conhecimento matemático “escondido”, que as crianças aprendem por si mesmas. Na geometria intuitiva da criança de quatro ou cinco

* As pessoas convivem com crianças por muito tempo. O fato de que tivemos que esperar até que Piaget nos dissesse como elas pensam, e o fato de que todos nós esquecemos o que pensávamos quando crianças são tão significativos que chegam a sugerir um modelo Freudiano de “repressão cognitiva”.

anos, uma linha reta não é, necessariamente, a distância mais curta entre dois pontos, e andar vagarosamente entre dois pontos não leva, obrigatoriamente, mais tempo do que andar depressa. Aqui, também, não é meramente o “item” da aprendizagem que está faltando, mas sim a pressuposição epistemológica que está por trás da idéia de que “mais curto” é uma propriedade do caminho e não da ação de percorrê-lo.

Nada disso deveria ser entendido como mera *falta* de conhecimentos por parte da criança. Piaget demonstrou como crianças pequenas retêm teorias do mundo que, em seus próprios termos, são perfeitamente coerentes. Essas teorias “aprendidas” espontaneamente por todas as crianças têm componentes muito bem desenvolvidos que, embora expressando uma matemática diferente, não são menos “matemáticos” do que os geralmente aceitos em nossa cultura (adulta). O processo de aprendizagem “escondida” tem pelo menos duas fases: já nos anos da pré-escola, toda criança primeiro constrói uma ou mais teorias pré-adultas do mundo e só depois move-se em direção a uma visão mais parecida à do adulto. E tudo isso se dá através do que chamei de aprendizado piagetiano, um processo que tem muitas características que as escolas deveriam invejar: é efetivo (todas as crianças chegam lá), é barato (parece prescindir de professores e currículos) e é humano (as crianças parecem passar por ele despreocupadamente, sem receber explicitamente recompensas ou punições externas).

A extensão na qual os adultos de nossa sociedade perderam a postura positiva das crianças frente à aprendizagem varia de indivíduo para indivíduo. Uma parcela desconhecida, mas certamente significativa, da população desistiu quase que completamente de aprender. Essas pessoas raramente (para não dizer nunca) se empenham de modo deliberado em aprender alguma coisa e vêm-se ou como incompetentes ou como incapazes de sentir prazer em aprender. O custo pessoal e social é enorme: a matofobia pode, cultural e materialmente, limitar a vida das pessoas. Muitas outras pessoas ainda não desistiram completamente de aprender, mas sentem-se fortemente impedidas por opiniões negativas muito arraigadas sobre suas próprias capacidades. A deficiência torna-se uma identidade: “não consigo aprender francês, não tenho ouvido para línguas”; “nunca poderia ser um

homem de negócios, não tenho cabeça para contas”; “não aprenderei o esquí paralelo, nunca fui muito coordenado”. Essas crenças são com frequência repetidas ritualisticamente, como superstições, e, como superstições, criam um mundo de tabus; nesse caso, tabus de aprendizagem. Neste e no Capítulo 3, discutiremos experimentos que demonstram que essa auto-imagem corresponde muitas vezes a uma realidade muito limitada — em geral à “realidade escolar” de uma pessoa. Num ambiente de aprendizagem com o adequado apoio intelectual e emocional, o “descoordenado” pode aprender habilidades circuncas como malabarismo,* e aqueles “sem cabeça para contas” aprendem não só que podem fazer matemática como também gostar disso.

Embora essas auto-imagens negativas possam ser superadas, na vida de um indivíduo elas são extremamente fortes e auto-reforçáveis. Se as pessoas acreditam muito firmemente que não podem entender matemática, quase certamente conseguirão abster-se de tentar executar qualquer coisa que reconheçam como matemática. A consequência de tal auto-sabotagem é o insucesso pessoal, e cada fracasso reforça a convicção original. E tais convicções podem ser ainda mais insidiosas quando assumidas não só por indivíduos, mas por toda a nossa cultura.

Nossas crianças crescem numa sociedade permeada pela idéia de que há “pessoas espertas” e “pessoas estúpidas”. Do ponto de vista social, o indivíduo é constituído por um punhado de aptidões. Há pessoas “boas em matemática” e outras que “não podem entender matemática”. Tudo é preparado para as crianças atribuírem suas primeiras experiências de aprendizagem desagradáveis ou mal-sucedidas à sua própria inabilidade. Como resultado, as crianças vêm suas falhas como passaporte para o grupo das “pessoas estúpidas” ou, mais frequentemente, para o grupo das pessoas “fracas em x” (onde, como já dissemos, x muitas vezes é igual a matemática). Dentro desse quadro, as crianças se autodefinirão em termos de suas limitações, e essa definição será consolidada e reforçada no decorrer de toda a sua vida. Só muito

* O malabarismo que o autor refere-se aqui é o “juggling”. A capacidade de manter 3 ou mais objetos (geralmente bolas) no ar ao mesmo tempo através de um processo alternado de jogá-los e apanhá-los (ver ilustrações no capítulo 4). (N.T.).

raramente um evento excepcional leva as pessoas a uma reorganização de sua auto-imagem intelectual de modo a abrir novas perspectivas sobre o que pode ser aprendido.

Essa crença sobre a estrutura das habilidades humanas é dificilmente ignorada. Nunca é fácil desarraigar crenças populares. Aqui, a dificuldade é incrementada por muitos outros fatores. Primeiro, teorias populares sobre aptidões humanas parecem ser fundamentadas em teorias "científicas". Afinal, os psicólogos não falam em medir aptidões? Mas o significado do que é medido é seriamente questionável pela simples experiência mental de imaginar a Matelândia.

Embora essa experiência mental deixe em aberto a questão de como uma Matelândia poderia realmente ser criada, ela é bastante rigorosa como uma demonstração de que as crenças aceitas sobre aptidão matemática não partem de evidências válidas.¹ Mas desde que leitores altamente matofóbicos poderiam apresentar problemas realizando essa experiência por si próprios, reforçarei a argumentação colocando-a de forma diferente. Imagine que as crianças fossem obrigadas a passar uma hora por dia desenhando passos de dança em papel quadriculado e que tivessem que ser testadas nessa "dança teórica" antes que lhes fosse permitido dançar fisicamente. Não seria de esperar então que o mundo estivesse cheio de "dançofobos"? Poderíamos dizer que aqueles que tiveram acesso às salas de dança e à música tinham maior "aptidão para a dança"? No meu ponto de vista, isso é tão impróprio quanto tirar conclusões sobre a aptidão matemática a partir da má vontade das crianças para passar centenas de horas fazendo somas.

Poderíamos ter esperanças de que passando de metáforas para métodos mais rigorosos de psicologia conseguiríamos dados mais "confiáveis" sobre os reais limites de competência atingíveis pelos indivíduos. Mas isso não ocorre: o paradigma em uso na psicologia educacional contemporânea está centrado em investigações de como as crianças aprendem ou (mais comumente) não aprendem matemática na

¹ Os experimentos *Gedanken* têm desempenhado um papel importante nas ciências, particularmente em física. Esses experimentos encorajariam atitudes mais críticas se usados mais freqüentemente na reflexão sobre educação.

anti-Matelândia em que vivemos. A direção de tais estudos é análoga à seguinte parábola:

Imagine alguém vivendo no século XIX e que sinta necessidade de aperfeiçoar os meios de transporte. Essa pessoa está persuadida de que o caminho para novos meios começa com um profundo conhecimento dos problemas existentes. Assim, inicia um estudo cuidadoso das diferenças entre vários tipos de veículos puxados a cavalo. Documenta cuidadosamente, pelos métodos mais sofisticados, como a velocidade varia de acordo com a forma e consistência de vários tipos de eixos, de capacidade, e de técnicas de atrelamento.

Sabemos, retrospectivamente, que o desenvolvimento dos transportes a partir do século XIX foi bastante diferente. A invenção do automóvel e do avião não surgiu de um estudo detalhado de como seus predecessores, tais como os veículos puxados a cavalo, funcionavam ou não. Apesar disso, esse é o modelo para a pesquisa educacional contemporânea. Os paradigmas-padrão de pesquisa educacional tomam o ambiente de sala de aula existente ou a atividade extracurricular como objeto principal de estudo. Há muitos estudos acerca das limitadas noções de matemática ou ciências adquiridas na escola tal como ela é hoje. Há mesmo uma argumentação "humanística" muito difundida de que a "boa" pedagogia deveria ter como ponto de partida essas limitadas maneiras de pensar. É fácil simpatizar com essa intenção humana. No entanto, acho que essa estratégia implica um comprometimento em preservar o sistema tradicional. É análoga ao aperfeiçoamento dos eixos das carroças. A verdadeira questão, pode-se dizer, é se podemos inventar o "automóvel educacional". Uma vez que essa questão (o tema central deste livro) não tem sido abordada pela psicologia educacional, devemos concluir que as bases "científicas" que fundamentam as crenças sobre aptidões são realmente muito fracas. Mas essas crenças estão institucionalizadas nas escolas, nos sistemas de testes e nos critérios de exames vestibulares, e, conseqüentemente, suas bases sociais estão tão firmes como estão enfraquecidas suas bases científicas.

A partir do jardim de infância, as crianças são testadas em suas aptidões verbais e quantitativas, reconhecidas como entidades reais e separáveis. Os resultados desses testes passam a fazer parte da construção social de cada criança, vista

como um punhado de aptidões. Uma vez que Joãozinho e seu professor compartilham a mesma percepção de Joãozinho como sendo uma pessoa que é “boa em arte” e “sofrível em matemática”, essa percepção tem forte tendência a enraizar-se cada vez mais. Tudo isso é amplamente reconhecido pela psicologia educacional contemporânea. Mas há casos mais graves de como a escola constrói essas aptidões. Consideremos o exemplo de uma criança que eu observei quando ela estava com oito e nove anos. Jim era uma criança altamente verbal e matofóbica que provinha de uma família de profissionais liberais. Seu amor pelas palavras e por falar evidenciaram-se muito cedo, bem antes de ele entrar na escola. A matofobia desenvolveu-se na escola. Minha teoria é que ela apareceu como resultado direto de sua precocidade verbal. Seus pais me contaram que Jim havia desenvolvido muito cedo o hábito de descrever em palavras, freqüentemente em voz alta, tudo o que estava fazendo, à medida que o fazia. Esse hábito causou-lhe pequenas dificuldades com os pais e com os professores da pré-escola. O verdadeiro problema surgiu quando começou seu programa de aritmética. Até este momento ele já havia aprendido a manter seu “pensar em voz alta” sob controle, mas creio que ainda manteve o hábito de comentar consigo próprio suas atividades. Nas aulas de matemática ele se sentia acuado: simplesmente não sabia como falar sobre fazer somas. Faltava-lhe um vocabulário (como para quase todos nós) e um sentido de utilidade. A partir da frustração de seus hábitos verbais, desenvolveu-se uma aversão pela matemática, e a partir dessa aversão desenvolveu-se o que testes posteriormente confirmaram como falta de aptidão.

Para mim, a história é pungente. Estou convencido de que o que aparenta ser deficiência intelectual muitas vezes surge, como no caso de Jim, de um grande poder intelectual. E não são somente os poderes verbais que solapam os outros. Qualquer observador de crianças atento deve ter visto processos similares agindo em diferentes direções. Por exemplo, uma criança que tenha ficado enamorada pela ordem lógica está a caminho de ser desestimulada pela ortografia e, a partir daí, desenvolver uma aversão generalizada pela atividade de escrever.

O conceito da Matelândia mostra como usar os computadores como veículos para escapar da situação de Jim e da oposta, dos disléxicos. Ambas as crianças são vítimas da rígi-

da separação imposta por nossa cultura entre o verbal e o matemático. Na Matelândia, que descreveremos neste capítulo, o amor e a habilidade de Jim pela linguagem poderiam ser mobilizados para favorecer seu desenvolvimento matemático ao invés de opor-se a ela, e o amor pela lógica da outra criança poderia ser recrutado para servir ao desenvolvimento do interesse pela linguagem.

O conceito de mobilizar os vários interesses e facilidades de uma criança para promover todos os domínios da atividade intelectual é uma resposta à sugestão de que diferentes aptidões podem refletir diferenças reais no desenvolvimento do cérebro. Tornou-se muito comum falar como se houvesse diferentes cérebros ou “órgãos” separados no cérebro, para matemática e para linguagem. De acordo com essa maneira de pensar, as crianças dividem-se em aptas verbal ou matematicamente, dependendo de que partes de seu cérebro são mais fortes. Mas o argumento que parte da anatomia para chegar ao intelecto reflete um conjunto de pressuposições epistemológicas. Assume, por exemplo, que há somente uma rota para a matemática e que se ela estiver “anatomicamente bloqueada” a criança não pode chegar ao seu destino. De fato, para a maioria das crianças das sociedades contemporâneas, há realmente só uma rota para a matemática “avançada”, a rota via matemática escolar. Mas, mesmo que pesquisas posteriores em biologia do cérebro confirmem que esse caminho depende de órgãos anatômicos do cérebro que podem estar faltando em algumas crianças, não seguiria obrigatoriamente que a matemática é dependente desses mesmos órgãos. Ao contrário, implicaria que deveríamos procurar outros caminhos. Uma vez que este livro argumenta que estas alternativas existem, ele deve ser lido como uma tentativa de mostrar como a dependência das funções do cérebro é em si mesma um construto social.

Vamos supor, para os propósitos da argumentação, que haja uma certa parte do cérebro especialmente capaz de desempenhar as manipulações mentais de números que ensinamos às crianças na escola, e vamos chamá-la DAM (Dispositivo de Aquisição de Matemática).² Em cima desta supo-

² Há um trocadilho aqui; os leitores não familiarizados com os trabalhos recentes de Noam Chomsky podem não entendê-lo. Noam Chomsky acredita que nós

sição, faria sentido que, ao longo da história, a humanidade tivesse aperfeiçoado métodos de fazer e ensinar matemática que tirassem o máximo de proveito do DAM. Mas, mesmo que esses métodos funcionassem para a maioria das pessoas, e assim, para a sociedade como um todo, confiar neles seria catastrófico para um indivíduo cujo DAM tivesse sido lesado ou fosse inacessível por alguma outra razão (talvez “neurótica”). Tal pessoa fracassaria na escola e seria diagnosticada como uma vítima de “descalculia”. E enquanto insistirmos em fazer as crianças aprenderem aritmética pelas vias padronizadas, continuaremos a “provar” por testes objetivos que elas realmente não podem “fazer Aritmética”. Mas isso é como provar que crianças surdas não adquirem a linguagem porque não ouvem. Assim como as linguagens de sinais usam mãos e olhos para deixar de lado os órgãos da fala mais comuns, da mesma maneira formas alternativas de aprender matemática que deixam de lado o DAM podem ser tão boas quanto as usuais, mesmo se diferente delas.

Mas, não precisamos apelar para a neurologia para explicar por que algumas crianças não se tornam fluentes em matemática. A analogia da aula de dança sem música ou sem pista de dança é muito séria. Nossa cultura educacional fornece aos estudantes de matemática poucos recursos para que eles entendam o que estão aprendendo. Como resultado, nossas crianças são forçadas a seguir um dos piores modelos para aprender matemática: é o modelo da “decoreba”, em que o material é tratado como sem sentido; é um modelo *dissociado*. Algumas das nossas dificuldades em ensinar matemática de uma maneira culturalmente integrada devem-se a um

temos um dispositivo de aquisição de linguagem. Eu não; o DAM parece tão improvável quanto o DAL. Ver Noam Chomsky, *Reflections on Language*, (Nova Iorque, Pantheon, 1976), onde sua visão do cérebro é apresentada como sendo composta de órgãos neurológicos especializados combinados para realizar funções intelectuais específicas. Penso que a questão fundamental para o futuro da educação não é se o cérebro é um “computador para usos genéricos”, ou uma coleção de dispositivos especializados, mas sim se nossas funções intelectuais são redutíveis de uma forma unívoca a estruturas neurologicamente determinadas. Parece fora de dúvida que o cérebro possui vários “dispositivos” inatos. Mas certamente esses “dispositivos” são muito mais primitivos do que os sugeridos pelos nomes DAM e DAL. Vejo o aprendizado de linguagem ou o aprendizado de matemática utilizando numerosos “dispositivos” cuja função original não apresenta nenhuma semelhança com as complexas funções intelectuais que eles passam a atender.

problema objetivo: antes dos computadores, havia pouquíssimos bons pontos de contato entre o que é mais fundamental e envolvente na matemática e qualquer coisa existente na vida cotidiana. Mas o computador — um ser com linguagem matemática fazendo parte do dia-a-dia da escola, dos lares e do ambiente de trabalho — é capaz de fornecer esses elos de ligação. O desafio à educação é descobrir meios de explorá-los.

A matemática não é, certamente, o único exemplo de aprendizagem dissociada. Mas é um bom exemplo exatamente porque provavelmente muitos leitores estão, agora, desejando que eu falasse sobre alguma outra coisa. Nossa cultura é tão matofóbica, tem tanto horror da matemática que, se eu conseguisse demonstrar que o computador pode nos proporcionar uma nova relação com a matemática, eu teria poderosos fundamentos para declarar que ele também tem a capacidade de mudar nossa relação com outros tipos de aprendizados que nos apavoram. Experiências na Matelândia, tais como participar de uma “conversação matemática”, dão ao indivíduo um sentido de liberação das possibilidades de fazer uma variedade de coisas que anteriormente pareciam “difíceis demais”. Neste sentido, o contato com o computador pode abrir às pessoas acesso ao conhecimento, não mecanicamente, por fornecer-lhes informações processadas, mas por colocar objeções a algumas das suposições rígidas que elas desenvolveram a respeito de si mesmas.

A Matelândia alicerçada em computadores que propo-nho aqui estende o tipo de aprendizagem natural, piagetiano, que é responsável pela aquisição da língua materna, ao aprendizado da matemática. O aprendizado piagetiano está fortemente embutido em outras atividades. Por exemplo, não se destina à criança pequena períodos especiais para “aprender a falar”. Esse modelo coloca-se em oposição ao aprendizado dissociado, que ocorre relativamente separado de outros tipos de atividade, mental e física. Em nossa cultura, o ensino de matemática na escola é o paradigma do aprendizado dissociado. Para a maioria das pessoas, matemática é ensinada e ingerida como remédio. Nessa dissociação, nossa cultura aproxima-se bastante da caricatura de seus piores hábitos de alienação epistemológica. Nos ambientes LOGO nós eliminamos algumas fronteiras de demarcação: nenhuma atividade com o computador é diferenciada como “aprender matemática”.

A dificuldade em fazer com que a matemática tenha algum sentido para quem a estuda relaciona-se com outro problema, mais genérico, o de atribuir um sentido evidente à linguagem de “descrição formal”. Assim, antes de passar aos exemplos de como o computador pode ajudar a fornecer um sentido à matemática, examinaremos outros exemplos em que o computador ajudou a dar sentido à uma linguagem de descrição formal em áreas do conhecimento que as pessoas geralmente não consideram como matemática. Em nosso primeiro exemplo, essa área é a gramática, para muitas pessoas uma disciplina um pouco menos ameaçadora que a matemática.

Numa experiência de um ano, em que foram colocados computadores nas classes de um grupo de estudantes de 7ª série considerados “médios”, depois de algum tempo as crianças passaram a trabalhar no que chamaram de “poesia pelo computador”. Elas foram usando programas para gerar sentenças. Forneciam ao computador uma estrutura sintática para a qual eram feitas escolhas aleatórias de uma lista de palavras. O resultado é uma espécie de poesia concreta, conforme mostra o exemplo. Uma das alunas, uma garota de treze anos chamada Jenny, comoveu profundamente o pessoal ligado ao projeto perguntando, no primeiro dia de trabalho com o computador: “Por que fomos escolhidos para isso? Nós não somos os gênios...” A pesquisa exigia deliberadamente crianças de desempenho escolar “médio”.

Um dia, Jenny chegou muito contente. Fizera uma descoberta: “Agora sei porque temos substantivos e verbos”, disse. Durante muitos anos, na escola, Jenny exercitara categorias gramaticais. Ela nunca entendera as diferenças entre substantivos, verbos e advérbios. Mas agora se tornava evidente que sua dificuldade com gramática não se devia à inabilidade de trabalhar com categorias lógicas. Era alguma outra coisa. Ela simplesmente não vira nenhum sentido naquele exercício. Não fora capaz de entender o que era gramática e nem *para* que servia. E quando ela questionara sobre o assunto, a explicação que seus professores lhe deram foi obviamente desonesta. Ela contou que eles tinham dito: “Gramática ajuda você a falar melhor”.

DOIDA DEMORA FAZ PORQUE DOCE SNOOPY GRITA LOBO
SEXY AMA AQUILO PORQUE A MOÇA SEXY ODEIA HOMEM
FEIO AMA PORQUE CACHORRO FEIO ODEIA LOBO LOUCO
ODEIA PORQUE LOBO DOIDO PULA DEMORA SEXY GRITA
É PORQUE DEMORA SEXY ODEIA MAGRO SNOOPY CORRE
PORQUE LOBO GORDO SALTA QUERIDO FOGINY PULA
UMA MOÇA GORDA CORRE

Poesia concreta de Jenny

De fato, traçar a conexão entre aprender gramática e melhorar a fala exige uma visão bem mais distanciada do complexo processo de aprender linguagem que podia ter sido dado a Jenny na idade em que ela teve o primeiro contato com a gramática. Ela certamente não viu nenhuma maneira como a gramática poderia ajudá-la a falar, nem achou que sua fala precisasse de tal ajuda. Por isso, passou a ver a gramática com ressentimento. E, como é o caso com a maioria de nós, ressentimento é garantia de fracasso. Mas agora, no momento em que ela tentou fazer com que o computador gerasse poesia, alguma coisa excepcional aconteceu. Jenny viu-se classificando palavras em categorias, não porque lhe haviam pedido para fazê-lo, mas porque ela precisou disso. Para poder “ensinar” seu computador a fazer seqüências de palavras que pudessem ser consideradas sentenças do inglês, ela tinha que ensiná-lo a escolher palavras de uma certa classe. O que ela aprendeu de gramática a partir dessa experiência não teve nada de mecânico ou rotineiro. Seu aprendizado foi profundo e significativo. Jenny fez mais do que aprender definições de determinadas classes gramaticais. Ela compreendeu a idéia geral de que as palavras (assim como as coisas) podem ser colocadas em diferentes grupos ou conjuntos, e que se assim o fizesse funcionaria para ela. Jenny não só “entendeu” gramática, ela mudou sua atitude em relação ao assunto. Era algo “dela”, e durante o ano em que usou o computador, ocorrências como essa ajudaram-na a mudar sua auto-imagem. Seu desempenho também mudou; suas notas, até então baixas, tornaram-se ótimas até o seu último ano de escola. Ela aprendeu, afinal, que poderia ser um “gênio”.

É fácil entender por que matemática e gramática não fazem sentido para as crianças quando elas fracassam em

entender o mundo ao redor delas e por que ajudar as crianças a entendê-las exige mais do que um professor que explique tudo corretamente ou use o diagrama adequado na lousa. Perguntei a muitos professores e pais o que eles pensavam sobre matemática e por que era importante aprendê-la. Poucos tinham uma visão que fosse suficientemente coerente para justificar a dedicação de centenas de horas da vida de uma criança para aprendê-la, e as crianças percebem isso. Quando o professor fala para o aluno que a razão daquelas inúmeras horas de aritmética é ser capaz de conferir o troco no supermercado, o professor é simplesmente desacreditado. As crianças vêem tais “razões” como mais um exemplo de conversa ambígua de adultos. O mesmo efeito é produzido quando as crianças ouvem que matemática escolar é divertida, quando elas sabem muito bem que os professores que dizem isso gastam suas horas de lazer com qualquer coisa menos com esta “divertida” atividade. Nem tampouco ajuda dizer-lhes que precisam de matemática para tornar-se cientistas — a maioria das crianças não têm esse plano. As crianças podem ver perfeitamente que o professor não gosta de matemática muito mais do que elas e que a razão para estudá-la é simplesmente o fato que ela faz parte do currículo. Tudo isso corrói a confiança das crianças no mundo dos adultos e no processo educacional. *Além disso, acho que introduz um sério elemento de desonestidade na relação educacional.*

As crianças percebem a retórica da escola sobre matemática como uma conversa ambígua. Para remediar a situação devemos, em primeiro lugar, reconhecer que a percepção da criança está fundamentalmente correta. O *tipo de matemática* impingido às crianças na escola não é significativa, divertida, e nem mesmo muito útil. Isto não significa que uma criança em particular não possa transformá-la em um jogo pessoal, agradável e valioso. Para algumas, esse jogo é tentar conseguir boas notas; para outras, é enganar o professor e o sistema. Para muitas, a matemática escolar é agradável por sua repetição, precisamente porque é tão estúpida e dissociada, o que fornece um refúgio para não ter de pensar no que acontece na classe. Mas o que tudo isso mostra é a ingenuidade das crianças. Não é uma justificativa para a matemática ensinada na escola dizer que, *apesar* de sua monotonia intrínseca, crianças inventivas podem encontrar nela alegria e significado.

É importante lembrar a distinção entre *matemática* — um vasto domínio de investigações cuja beleza raramente é avaliada pela maioria dos não-matemáticos — e uma outra coisa chamada “*matemática escolar*”.

Vejo a “matemática escolar” como um constructo social, uma espécie de QWERTY. Um conjunto de incidentes históricos (que serão discutidos logo mais) determinou a escolha de certos tópicos como a bagagem matemática que os cidadãos deveriam ter. Como no caso da sequência QWERTY das máquinas de escrever, a matemática escolar teve sua razão de ser num certo contexto histórico. Mas, assim como QWERTY, ela se tornou tão arraigada que as pessoas a consideram inquestionável e inventam racionalizações para defendê-la mesmo depois que as condições históricas que a justificaram deixaram de existir. Na verdade, para a maioria das pessoas em nossa cultura, é inconcebível que a matemática escolar pudesse ser muito diferente: esta é a única matemática que conhecem. Para quebrar esse círculo vicioso, conduzirei o leitor a uma nova área da matemática, a geometria da Tartaruga, que meus colegas e eu criamos como sendo uma primeira parte da matemática formal para crianças, melhor e mais significativa. Os critérios para a elaboração da geometria da Tartaruga podem ser melhor entendidos se olharmos um pouco mais de perto as condições históricas responsáveis pela existência da matemática escolar tal como a conhecemos.

Algumas dessas condições históricas foram pragmáticas. Antes das calculadoras eletrônicas, havia uma necessidade social prática de que muitas pessoas fossem “programadas” para executar operações, tais como grandes divisões, rápida e acuradamente. Mas agora, que podemos comprar calculadoras por um preço bem mais barato, deveríamos reconsiderar a necessidade de toda criança passar centenas de horas de sua vida aprendendo tais funções aritméticas. Não quero negar o valor intelectual de algum conhecimento, na verdade, de muito conhecimento, sobre números. Longe disso. Mas podemos agora selecionar este conhecimento em bases coerentes e racionais. Podemos libertarmo-nos da tirania das considerações pragmáticas e superficiais que ditou nossa opção no passado sobre o que deveria ser aprendido e em que idade.

Mas a utilidade foi somente uma das razões que justifi-

caram a matemática escolar. Outras foram de origem *matética*. Matética é o conjunto de princípios norteadores que regem a aprendizagem. Algumas das justificativas históricas para a matemática escolar estavam relacionadas ao que era ensinável e ao que podia ser aprendido na época pré-computador. Segundo meu ponto de vista, um importante fator que determinou qual área da matemática faria parte do currículo escolar foi o que poderia ser feito no ambiente das salas de aula com a primitiva tecnologia do papel e lápis. Por exemplo, as crianças podem desenhar gráficos com lápis e papel. Assim, foi decidido que elas deveriam fazer muitos gráficos. As mesmas considerações influenciaram a ênfase em certos tipos de geometria. Por exemplo, na matemática escolar, geometria analítica tornou-se sinônimo da representação de equações através de curvas. Como resultado disso, toda pessoa instruída lembra-se vagamente que $y = x^2$ é a equação de uma parábola. E, embora a maioria dos pais não tenham a mínima idéia acerca de por que alguém deveria saber isso, eles ficam indignados quando seus filhos não sabem. Assumem que deve haver alguma explicação profunda e objetiva, conhecida somente por aqueles que “entendem melhor essas coisas”. Ironicamente, sua matofobia mantém a maioria das pessoas afastadas de qualquer tentativa de examinar essas razões mais profundamente e os coloca assim à mercê dos que se autodenominaram especialistas em matemática. Muito poucas pessoas suspeitaram alguma vez que o motivo de um tópico estar ou não incluído na matemática escolar poderia ser puramente técnico, como a facilidade de produção de parábolas usando lápis! Isso é o que poderia sofrer mudanças mais profundas num mundo repleto de computadores: a quantidade de constructos matemáticos de fácil produção será enormemente aumentada.

Outro fator matético na elaboração da matemática escolar é a técnica da avaliação. Aprende-se uma língua viva falando-a e não é preciso um professor para verificar e dar notas a cada sentença. Uma língua morta requer constante *feedback* do professor. A atividade conhecida como “fazer contas de somar” desempenha essa função de *feedback* na matemática escolar. Esses pequenos e repetitivos exercícios têm um único mérito: são fáceis de avaliar. Mas este mérito garantiu-lhes um lugar central na matemática escolar. Em

resumo, afirmo que a escolha dos tópicos da matemática escolar foi fortemente influenciada pelo que pareceu ensinável quando ela era ensinada como algo “morto”, usando técnicas primitivas, tecnologias passivas do tipo pauzinho e areia, giz e quadro-negro, lápis e papel. O resultado foi um conjunto de tópicos intelectualmente incoerentes que violam os princípios matéticos mais elementares sobre o que torna alguns assuntos fáceis e outros quase impossíveis de serem aprendidos.

Confrontada com toda a herança escolar, a educação matemática pode ser abordada de duas maneiras: a tradicional aceita a matemática escolar como uma entidade indiscutível e luta para encontrar maneiras de ensiná-la. Alguns educadores usam computadores com esse objetivo. Assim, paradoxalmente, o seu uso mais comum em educação tem sido o de obrigar os alunos a engolir o material indigesto deixado como espólio da era pré-computadores. Na geometria da Tartaruga, o computador tem um uso completamente diferente. Aqui, o computador é usado como um meio de se expressar matematicamente, o que nos permite elaborar tópicos que as crianças aprendam facilmente e que sejam significativos e coerentes com seu interesse pessoal. Ao invés de colocar o problema educacional em “como ensinar a matemática escolar existente”, nós o colocamos como “reconstrução da matemática”, ou, mais genericamente, como reconstrução do conhecimento de tal maneira que não seja necessário grande esforço para ensiná-lo.

Todo “desenvolvimento de currículo” poderia ser descrito como “reconstrução do conhecimento”. Por exemplo, a reforma de currículo para introduzir a matemática moderna nos anos 60 fez algumas tentativas de mudança do conteúdo da matemática escolar. Mas ela não poderia ir muito longe, pois continuava aferrada à idéia de que era importante fazer contas de somar, ainda que essas contas fossem diferentes. O fato de que as novas somas operavam com conjuntos ao invés de números, ou aritmética na base dois ao invés de base dez, faz pouca diferença. Além disso, essa reforma não significou um desafio à inventividade dos matemáticos criativos e assim nunca adquiriu a vivacidade da excitação que marca o surgimento de uma nova idéia. O próprio nome, “matemática moderna”, era um nome inadequado. Havia muito pouca

coisa nova sobre seu conteúdo matemático: ela não nasceu de um processo de invenção da matemática pelas crianças, mas sim de um processo de trivialização da matemática dos matemáticos. As crianças precisam e merecem algo melhor do que simplesmente uma seleção de tópicos da matemática tradicional. Como as roupas passadas aos irmãos mais jovens, elas nunca servem confortavelmente.

A geometria da Tartaruga foi elaborada com o objetivo de servir às crianças. Seu critério fundamental foi ser *apropriável*. É claro que ela deveria ter conteúdo matemático sólido, mas veremos que “apropriabilidade” e pensamento matemático sólido não são, de maneira alguma, incompatíveis. Pelo contrário: ao final, compreenderemos que alguns dos conhecimentos considerados mais pessoais são também os mais profundos do ponto de vista matemático. De muitas maneiras as idéias matemáticas, como por exemplo a de espaço e movimento, e a de padrões de ação repetitivos, são as que chegam à criança de maneira mais natural. É dentro desta matemática que mergulhamos as raízes da geometria da Tartaruga. À medida que meus colegas e eu fomos trabalhando com essas idéias, vários princípios foram reforçando a estrutura do conceito de uma matemática “apropriável”. Primeiro, havia o *princípio de continuidade*: a matemática deve ter relação de continuidade com o conhecimento pessoal estabelecido de cada um, de onde possa herdar um sentido de afeição e valor bem como competência “cognitiva”. Depois, havia o *princípio de poder*: ela deve dar poder ao estudante de desenvolver projetos pessoalmente significativos que não poderiam ser feitos sem ela. Finalmente, havia o *princípio de ressonância cultural*: o tópico deve fazer sentido em termos de um contexto social mais amplo. Já mencionei que a geometria da Tartaruga faz sentido às crianças, mas isso não ocorrerá se ela não for plenamente aceita pelos adultos também. Uma matemática que seja digna para as crianças não pode ser algo que nós nos damos o direito de impingir-lhes, como um remédio horrível, embora não vejamos nenhuma razão para tomá-lo nós mesmos.

Geometria da Tartaruga: uma matemática feita para aprender

A geometria da Tartaruga é um estilo diferente de geometria, da mesma forma que o estilo axiomático de Euclides é bem diferente do estilo analítico de Descartes. O de Euclides é *lógico*, o de Descartes é *algébrico*. A geometria da Tartaruga é um estilo *computacional* de geometria.

Euclides construiu sua geometria a partir de um conjunto de conceitos fundamentais, um dos quais é o ponto. Um ponto é definido como uma entidade que tem uma posição e mais nenhuma outra propriedade — não tem cor, não tem tamanho, e nem forma. As pessoas que ainda não foram iniciadas na matemática formal, que ainda não foram “matematizadas”, muitas vezes acham difícil compreender essa noção, parecendo-lhes ser até mesmo bizarra. É quase impossível para elas relacionar essa noção com qualquer outra coisa que eles conhecem. A geometria da Tartaruga também tem uma entidade fundamental similar ao ponto de Euclides. Mas esta entidade, que chamo de “Tartaruga”, pode ser relacionada a coisas que as pessoas conhecem porque, ao contrário do ponto euclidiano, ela não é totalmente desprovida de outras propriedades e, ao invés de ser estática, é dinâmica. Além da posição, a Tartaruga tem uma propriedade muito importante: tem “orientação”. Um ponto euclidiano está em

algum lugar — tem uma posição, e isso é tudo que se pode dizer sobre ele. Uma Tartaruga está em algum lugar — ela, também, tem uma posição — mas, além disso, está voltada para alguma direção — sua orientação. Nisso, a Tartaruga é como uma pessoa — eu estou *aqui* e estou voltado para o norte —, ou como um animal ou um barco. E dessas similaridades provém a habilidade especial da Tartaruga de servir como uma primeira representação da matemática formal para a criança. As crianças podem *identificar-se* com a Tartaruga e, no processo de aprender geometria formal, são assim capazes de usar o conhecimento sobre o seu corpo e de como ele se move.

Para ver como tudo isso acontece, devemos saber mais uma coisa sobre as Tartarugas: elas são capazes de aceitar ordens ou comandos expressos numa linguagem chamada “linguagem da Tartaruga”. O comando PARAFRENTE faz com que ela se mova numa linha reta na direção que ela está apontando (veja Figura 3). Para dizer-lhe quanto avançar, PARAFRENTE deve ser seguido de um número: PARAFRENTE 1 causará um movimento muito pequeno, PARAFRENTE 100 produzirá um bem maior. Nos ambientes LOGO, muitas crianças foram iniciadas em geometria da Tartaruga utilizando uma tartaruga mecânica, um robô cibernético, que executará esses deslocamentos quando eles são digitados num teclado como o de uma máquina de escrever. Essa Tartaruga de chão tem rodas, uma forma de abóbada, e uma caneta para poder traçar linhas ao mover-se. Mas suas propriedades essenciais — posição, orientação e habilidade de obedecer comandos na “língua da Tartaruga” — são os mais importantes para se fazer geometria. A criança pode, mais tarde, encontrar essas três propriedades em outra forma de Tartaruga, a “tartaruga luminosa”: um objeto de forma triangular que “vive” numa tela de televisão. Ela também tem uma posição e uma orientação, e desloca-se em resposta a comandos da linguagem da tartaruga. Cada tipo de tartaruga tem suas vantagens: a de chão pode ser usada como um robô bem como um instrumento para desenhar; a “tartaruga luminosa” desenha linhas coloridas bem brilhantes, mais rápido do que os olhos conseguem acompanhar. Nenhuma das duas é melhor, mas o fato das duas existirem carrega em si uma idéia muito importante: duas entidades *fisicamente*

diferentes podem ser *matematicamente* a mesma (ou “isomórfica”).¹

Os comandos PARAFRENTE e PARATRÁS fazem com que a Tartaruga se movimente em linha reta, na direção da sua orientação: sua posição pode mudar, mas sua orientação permanece a mesma. Dois outros comandos mudam a orientação sem afetar a posição: PARADIREITA e PARA-ESQUERDA fazem com que a Tartaruga gire em torno de si mesma para mudar sua orientação sem sair do lugar. Tal como PARAFRENTE, um comando para girar deve ser seguido de um número — um dado de entrada — dizendo quanto a Tartaruga deve girar. Um adulto reconhecerá facilmente esses números como medida de ângulo, em graus. Para a maioria das crianças, esses números têm que ser explorados, e fazer isso é um processo cheio de prazer e divertimento.

¹ Uma vez que este livro foi escrito para leitores que podem não saber muita matemática, as referências matemáticas específicas são restritas ao mínimo necessário. As seguintes observações podem servir como tópicos de reflexão para leitores matematicamente sofisticados.

O isomorfismo de diferentes sistemas da Tartaruga é um dos numerosos exemplos de idéias matemáticas “avançadas” que aparecem na geometria da Tartaruga sob forma tanto “concreta” quanto “utilizável”. Dentre eles, conceitos de “cálculo” são especialmente importantes.

Exemplo 1: Integração. A geometria da Tartaruga prepara o acesso ao conceito de linha integral pela ocorrência freqüente de situações em que a Tartaruga tem que integrar alguma quantidade na medida em que avança. Muitas vezes o primeiro caso encontrado pelas crianças surge da necessidade da Tartaruga ter que manter controle de quanto ela girou ou de quanto ela se moveu. Um excelente projeto seria a simulação de alguns de seus tropismos que levariam o animal a, por exemplo, procurar o calor, a luz ou a concentração de alimento, representados como um campo na forma de uma função numérica de posição. É natural pensar em comparar dois algoritmos pela integração de quantidades de campo ao longo do caminho da Tartaruga. Uma versão simples disso pode ser conseguida se inserirmos no programa uma linha assim: COLOQUE (:TOTAL + :CAMPO)“TOTAL”, o que significa: tome a quantidade previamente atribuída a TOTAL, acrescente-lhe a quantidade CAMPO e coloque o resultado obtido em TOTAL. Essa versão apresenta um *bug* se as distâncias percorridas pela Tartaruga forem muito grandes ou de tamanhos variáveis. Ao tentar o *debugging* quando tais problemas são encontrados, o aluno encaminha-se numa progressão significativa à formação de um conceito de integral mais sofisticado.

A introdução precoce de uma versão simples de integração ao longo de um caminho ilustra um freqüente fenômeno inverso do que parecia ser uma ordenação pedagógica “natural”. No currículo tradicional, a integração é um tópico avançado, ao qual os alunos chegam após terem sido encorajados, durante muitos

Figura 3
Transcrição da primeira tentativa
de uma criança de desenhar um quadrado

Um quadrado pode ser reproduzido pelos comandos

PARAFRENTE 100
PARADIREITA 90
PARAFRENTE 100
PARADIREITA 90
PARAFRENTE 100
PARADIREITA 90
PARAFRENTE 100
PARADIREITA 90

PF 100
PD 100
PF 100
APAGUEDESENHO

(note as abreviações para diminuir a datilografia)

PD 10
PE 10
PD 10

(explorando com a Tartaruga à procura do ângulo correto)

PF 100
PD 100
PE 10

(chega mais depressa dessa vez)

PD 100
PE 10
PF 100
PD 10
PF 100
PD 90
PF 100

anos, a pensar em integral finita como a área sob uma curva, um conceito que parecia ser mais concreto no mundo matemático da tecnologia do papel e lápis. Mas o efeito acaba sendo o desenvolvimento de uma imagem errônea de integração, que deixa muitos alunos com a sensação de estarem perdidos quando encontram integrais para os quais a representação como a área sob uma curva é inadequada.

Exemplo 2: Equação Diferencial. A Tartaruga de Sensor (veja Introdução, nota 4) usou um método que surpreende muitas crianças por ser extremamente poderoso. Uma primeira abordagem típica de programar a Tartaruga para contornar um objeto é medi-lo e colocar suas dimensões no programa. Assim, se o objeto é um quadrado de lado 150 passos de Tartaruga, o programa incluirá a instrução PARAFRENTE 150. Mesmo se funcionar (o que geralmente não ocorre) essa abordagem não serve para generalizações. O programa citado na nota anterior funciona por usar passos bem pequenos que dependem exclusivamente das condições de vizinhança imediata à Tartaruga. Ao invés da operação "global" como PARAFRENTE 150, usa somente operações "locais" como PARAFRENTE 1.

Uma vez que aprender a controlar a Tartaruga é como aprender a falar uma língua, isto mobiliza a experiência e o prazer da criança em falar. Uma vez que é como estar em comando, isto mobiliza a experiência e o prazer da criança em comandar. Para fazer a Tartaruga desenhar um quadrado, a pessoa deve andar sobre um quadrado imaginário e descrever o que está fazendo, usando a linguagem da Tartaruga. Assim, trabalhar com a Tartaruga mobiliza a experiência e o prazer com o movimento. Toda essa experiência faz uso de um campo de conhecimento bem familiar à criança, a "geometria do corpo",* um ponto de partida para o desenvolvimento de conexões com a geometria formal.

O objetivo das primeiras experiências das crianças no ambiente da Tartaruga não é aprender regras formais, mas desenvolver a compreensão (o *insight*) sobre a maneira como elas se movem no espaço. Essa "compreensão" é descrita na linguagem da Tartaruga e assim torna-se um "programa" ou "procedimento" ou "equações diferenciais" para a Tartaruga. Vejamos bem detalhadamente como uma criança, que já saiba como movimentar a Tartaruga em linhas retas para desenhar quadrados, triângulos e retângulos, pode aprender como programá-la para desenhar um círculo.

Imaginemos, então, como já tenho visto centenas de vezes, uma criança que pergunta: como posso fazer a Tartaruga desenhar um círculo? O instrutor, num ambiente LOGO, não dá respostas a questões como essa mas sim introduz a

Ao fazê-lo captura-se uma parte central da noção de equação diferencial. Já vi crianças de escola de 1º grau que entendem perfeitamente por que equações diferenciais são a forma natural das leis de locomoção. Aqui vemos outra dramática inversão pedagógica: o poder da equação diferencial é compreendido antes do formalismo analítico do cálculo. Muito do que se conhece da versão da Tartaruga sobre idéias matemáticas foi organizado por H. Abelson e A. diSessa, *Turtle Geometry: Computation as a Medium for Exploring Mathematics* (Cambridge, MIT Press, 1981).

Exemplo 3: Invariável Topológica. Deixe uma Tartaruga passear ao redor de um objeto "somando" seus giros à medida que eles acontecem: giros para a direita sendo contados como positivos e para a esquerda como negativos. O resultado será 360º qualquer que seja a forma do objeto. Veremos que esse Teorema do Giro Total da Tartaruga é tão útil quanto belo.

* O tema original é *body-geometry*, que o autor usa para caracterizar o conhecimento que nós adquirimos ao andarmos, ao nos movimentarmos no espaço. É o conhecimento de geometria que adquirimos através do movimento do nosso "corpo" (N.T.).

criança em um método de resolver não somente esse, mas uma ampla variedade de outros problemas. Esse método é resumido na frase: "brinque de Tartaruga". A criança é encorajada a mover seu corpo do modo que a Tartaruga da tela deve se mover para fazer o desenho desejado. Para a criança que desejava fazer o círculo, mover-se em círculo pode levar a uma descrição do tipo: "Quando ando em círculo, dou um pequeno passo à frente e viro um pouquinho, e continuo a fazer isso". A partir dessa descrição, há somente um pequeno passo para um programa formal de Tartaruga.

UM CÍRCULO REPITA
(PARAFRENTE 1 PARADIREITA 1)

Outra criança, talvez menos experiente em programação simples e na heurística de "brincar de Tartaruga", pode necessitar ajuda. Essa ajuda não consistiria, primordialmente, em ensinar a criança a programar o círculo da Tartaruga, mas ensinar a ela um método, um procedimento heurístico. Esse método (que inclui a dica de "brincar de Tartaruga") tenta estabelecer firme conexão entre a atividade pessoal e a criação de conhecimento formal.

Na Matelândia da Tartaruga, imagens antropomórficas facilitam a transferência de conhecimentos de situações familiares para novos contextos. Por exemplo, a metáfora para o que é comumente chamado "programação de computadores" é ensinar à Tartaruga uma nova palavra. Uma criança que deseja desenhar muitos quadrados, pode ensinar à Tartaruga um novo comando que fará com que ela execute em seqüência os sete comandos usados para desenhar um quadrado, como mostrado na Figura 3. Isto pode ser fornecido ao computador de muitas maneiras diferentes, entre as quais estão:

UM QUADRADO
PARAFRENTE 100
PARADIREITA 90
PARAFRENTE 100
PARADIREITA 90
PARAFRENTE 100
PARADIREITA 90
PARAFRENTE 100
FIM

UM QUADRADO
REPITA 4 (PARAFRENTE 100 PARADIREITA 90)
FIM

UM QUADRADO :LADO
REPITA 4 (PARAFRENTE :LADO PARADIREITA 90)
FIM

Da mesma maneira, podemos programar um triângulo equilátero assim:

UM TRIÂNGULO
PARAFRENTE 100
PARADIREITA 120
PARAFRENTE 100
PARADIREITA 120
PARAFRENTE 100
FIM

UM TRIÂNGULO :LADO
REPITA 3 (PARAFRENTE :LADO PARADIREITA 120)
FIM

Esses programas alternativos conduzem quase que aos mesmos resultados, mas leitores informados notarão algumas diferenças. A mais evidente é que alguns programas permitem que se desenhem figuras com tamanhos diferentes: nesses casos, o comando para desenhar tal figura deve ser QUADRADO 50 ou QUADRADO 100, em vez de simplesmente QUADRADO. Uma diferença mais sutil é que alguns desses programas deixam a Tartaruga em seu estado original.* Programas escritos neste estilo claro são muito mais fáceis de entender e podem ser usados numa variedade de contextos. Ao notar essa diferença, as crianças aprendem dois tipos de coisa. Aprendem um "princípio matético" genético, produzindo componentes que favorecem a idéia de modularidade. E aprendem a usar a idéia importante de "estado".

A mesma estratégia de partir do familiar para o desconhecido coloca o estudante em contato com idéias genéricas poderosas e fundamentais: por exemplo, a idéia de organização hierárquica (de conhecimentos, de organizações, e de

* Estado da Tartaruga é definido pela sua posição, orientação e se sua caneta está levantada ou abaixada.

organismos), a idéia de planejar o desenvolvimento de um projeto e a idéia de *debugging*.*

Não é necessário usar o computador para desenhar um triângulo ou um quadrado. Papel e lápis bastariam. Mas quando esses programas são elaborados, tornam-se módulos que possibilitarão à criança criar hierarquias de conhecimento. Importantes habilidades intelectuais são desenvolvidas durante o processo, e isso é visto mais claramente ao se examinar alguns projetos elaborados pelas crianças após algumas sessões com a Tartaruga. Muitas delas seguiram espontaneamente o mesmo caminho de Pamela. Ela começou ensinando ao computador QUADRADO e TRIÂNGULO como descrito anteriormente (usando o comando REPITA). Daí, percebeu que poderia construir uma casa colocando o triângulo sobre o quadrado. Assim, ela tentou:

```
UMA CASA
QUADRADO
TRIÂNGULO
FIM
```

Mas, quando ela teclou o comando CASA, a Tartaruga desenhou:

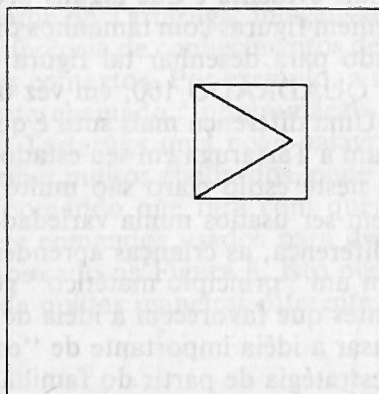


Figura 4

* Ao invés de erro, em LOGO diz-se que o programa tem um *bug* — a formiguinha no bolo. Achar ou eliminar o *bug* é um processo de *debugging*. Como em português não existe um termo especial para denotar o erro no mesmo estilo que o *bug* o faz, usaremos o termo *bug* e *debugging*, sem tradução (N.T.).

O triângulo saiu dentro do quadrado ao invés de ficar sobre ele!

Numa aula de matemática típica, a reação da criança a uma resposta errada é tentar *esquecê-la* o mais rápido possível. Mas no ambiente LOGO ela não é criticada por ter feito um erro ao desenhar. O processo de *debugging* é uma parte integrante do processo de compreensão de um programa. O programador é encorajado a estudar o *bug* ao invés de esquecê-lo. No contexto da Tartaruga há uma boa razão para estudá-lo: valerá a pena.

Há muitas maneiras de corrigir este *bug*. Pamela encontrou uma delas quando brincou de Tartaruga. Andando no caminho da Tartaruga, ela percebeu que o triângulo saiu dentro do quadrado porque o primeiro comando que girava a Tartaruga em TRIÂNGULO era um giro para a direita. Assim, ela modificou o programa fazendo com que os giros em TRIÂNGULO fossem à esquerda. Outra maneira comum de corrigir este *bug* é inserir um comando PARAESQUERDA 60 entre QUADRADO e TRIÂNGULO. Em ambos os casos o procedimento “reformado” resulta na seguinte figura:

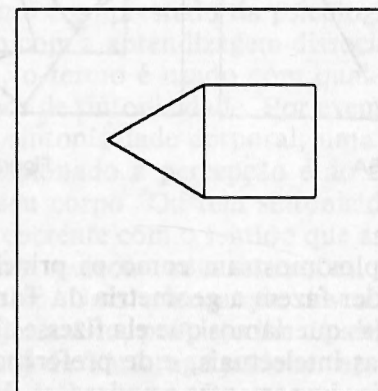


Figura 5

A criança vê progressos, e também percebe que as coisas não são sempre completamente certas ou erradas, mas que

estão num contínuo. A casa está melhor, mas ainda apresenta problemas. Brincando um pouco mais de Tartaruga, o *bug* é finalmente identificado e corrigido com um PARADIREITA 90 como primeiro passo do programa CASA.

Algumas crianças usam programas modulares para elaborar desenhos concretos como CASA. Outras preferem efeitos mais abstratos. Por exemplo, se a Tartaruga é comandada para fazer um QUADRADO, girar PARADIREITA 120 e fazer QUADRADO novamente, PARADIREITA 120 ou PARADIREITA 10, QUADRADO mais uma vez e continuar repetindo tudo isso, teremos o desenho da Figura 6A. Uma rotação menor resultará na Figura 6B.

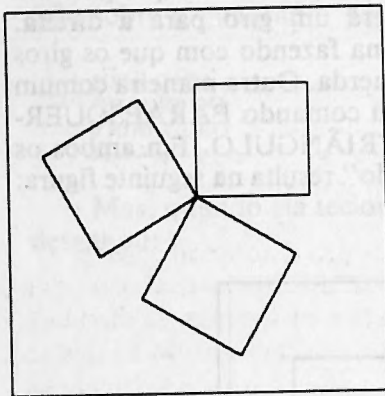


Figura 6A

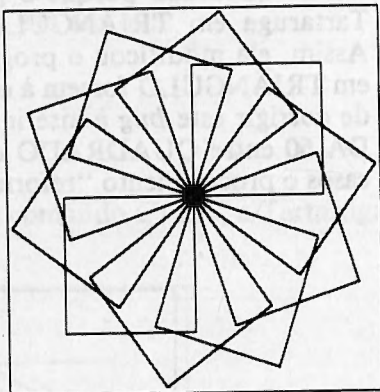


Figura 6B

Esses exemplos mostram como os princípios de continuidade e de poder fazem a geometria da Tartaruga fácil de ser aprendida. Mas queríamos que ela fizesse algo mais, como derrubar barreiras intelectuais, e de preferência atuar como portadora de idéias importantes e poderosas. Mesmo ao desenhar simples quadrados e estrelas, a Tartaruga é portadora de idéias importantes: ângulo, repetição controlada, operador de mudança de estado. Para darmos uma idéia mais sistemática daquilo que as crianças aprendem trabalhando com a Tartaruga, começaremos por fazer uma distinção entre dois tipos de conhecimento. Um tipo é *matemático*: as Tartarugas

são apenas um lado de uma grande área da matemática, a geometria da Tartaruga, um tipo de geometria que se aprende facilmente e um portador eficiente de idéias matemáticas genéricas. O outro tipo de conhecimento é *matético*: conhecimento sobre aprendizagem. Primeiro examinaremos mais de perto os aspectos matéticos da experiência com a Tartaruga e então nos preocuparemos com o lado mais técnico da matemática. Obviamente, os dois se sobrepõem.

Apresentamos aqui a geometria da Tartaruga, relacionando-a a um princípio *matético* fundamental: faça com que aquilo a ser aprendido tenha sentido. Lembremo-nos do caso de Jenny, que possuía os pré-requisitos conceituais para definir nomes ou verbos mas não conseguia aprender gramática, pois não se *identificava com* esse assunto. Nessa maneira, fundamental, gramática não fazia sentido para ela. A geometria da Tartaruga foi especialmente projetada para ser algo que fizesse sentido às crianças, que tivesse alguma ressonância com o que elas acham que é importante. E ela foi elaborada para ajudar as crianças a desenvolver a estratégia *matética*: para aprender algo, primeiramente faça com que isto tenha algum sentido para você.

A circunstância do círculo ilustra a *aprendizagem sintônica*.² Esse termo é emprestado da psicologia clínica e pode ser contrastado com a aprendizagem dissociada, já discutida aqui. Às vezes, o termo é usado com qualificadores que se referem aos tipos de sintonicidade. Por exemplo, o círculo da Tartaruga tem sintonicidade corporal, uma vez que ele está firmemente relacionado à percepção e ao conhecimento da criança sobre seu corpo. Ou tem sintonicidade com o ego, uma vez que é coerente com o sentido que as crianças têm de si mesmas como pessoas com intenções, metas, desejos, gostos e desgostos. Uma criança que desenha um círculo da Tartaruga deseja fazê-lo, pois isso lhe dá alegria e orgulho.

A geometria da Tartaruga pode ser aprendida porque é *sintônica*. E ela ajuda a aprender outras coisas porque encoraja o uso consciente e deliberado de estratégias *matéticas* e

² A frase "ego-sintônica" é usada por Freud. É um "termo usado para descrever instintos ou idéias que sejam aceitáveis ao ego, isto é, compatíveis com a integridade do ego e com suas necessidades". Ver J. Laplanche e J-B Pontalis, *The Language of Psycho-analysis*, (Nova Iorque, Norton, 1973).

de resolução de problemas. O matemático George Polya³ tem argumentado que métodos genéricos para resolver problemas deveriam ser ensinados. Algumas das estratégias usadas na geometria da Tartaruga são casos especiais das sugestões de Polya. Por exemplo, ele recomenda que sempre que abordarmos um problema deveríamos percorrer uma lista mental de perguntas heurísticas, tais como: esse problema pode ser subdividido em problemas mais simples? Pode ser relacionado a outro problema que já sei como resolver? A geometria da Tartaruga presta-se a esse tipo de exercício. A chave para descobrir como fazer a Tartaruga desenhar um círculo é referir-se a um problema cuja solução é bem conhecida — o problema de andar em um círculo. A geometria da Tartaruga proporciona excelentes oportunidades de praticar a arte de subdividir dificuldades. Por exemplo, CASA foi feita com QUADRADO e TRIÂNGULO. Em resumo, acredito que a geometria da Tartaruga presta-se tão bem aos princípios de Polya que a melhor maneira de introduzir Polya aos estudantes é deixá-los aprender a geometria da Tartaruga. Assim, ela acaba servindo como portadora de idéias genéricas de uma estratégia heurística.

Por causa da influência de Polya, se tem sugerido, frequentemente, que professores de matemática dêem atenção explícita à heurística ou “processo”, assim como ao conteúdo. O fato dessa idéia não ter se enraizado no sistema educacional pode ser parcialmente explicado pela escassez de boas situações em que modelos simples e eficientes de conhecimento heurístico podem ser encontrados e interiorizados pelas crianças. A geometria da Tartaruga não é só parcialmente rica em tais situações, como também acrescenta um novo elemento à idéia de Polya: “Para resolver um problema procure algo semelhante que você já conheça e compreenda”. A idéia é abstrata; a geometria da Tartaruga torna-a um princípio concreto e sistemático. *Brinque de Tartaruga. Ponha-se no lugar dela.* No trabalho com a Tartaruga, temos à disposição uma fonte quase inesgotável de “situações similares”,

pois nos baseamos em nossa própria ação, em nosso próprio corpo. Assim, quando estamos em apuros, podemos brincar de Tartaruga. Isso concretiza a sugestão de Polya. A geometria da Tartaruga transforma-se numa ponte para Polya. A criança que trabalhou extensivamente com a Tartaruga se torna profundamente convencida da importância de se “procurar algo similar”, pois o conselho frequentemente tem sido recompensador. A partir desses sucessos, vêm a confiança e a habilidade necessária para aprender como aplicar esse princípio em situações como a maioria das que ocorrem na matemática escolar, onde as similaridades são menos evidentes. A matemática escolar, embora seja elementar em termos de conteúdo aritmético, é considerada assunto relativamente complexo para exercitar os princípios de Polya.

A aritmética é um domínio introdutório muito pobre para o aprendizado do pensamento heurístico. A geometria da Tartaruga é excelente. Por suas qualidades de sintonicidade com o corpo e com o ego, o ato de aprender a fazer a Tartaruga desenhar dá à criança um modelo de aprendizagem muito diferente daquele aprendizado dissociado, descrito por Bill, aluno da quinta série, para aprender tabuadas na escola: “Você aprende coisas como essas esvaziando sua cabeça e repetindo-as muitas vezes até sabê-las de cor”. Bill gastou muito tempo “aprendendo” suas tabuadas. Os resultados foram pobres, mostrando por si mesmos a acuidade do relato de Bill ao descrever seus próprios processos mentais de aprendizado. Ele falhou no aprendizado porque ele mesmo se forçou a um desvinculamento de qualquer relação com o assunto — ou melhor, adotou a pior delas como estratégia de aprendizagem, a dissociação. Seus professores pensavam que ele tinha “memória fraca” e chegaram até a levantar a possibilidade de lesão mental. No entanto, Bill tinha um profundo conhecimento de músicas populares e folclóricas, que ele não tinha nenhuma dificuldade em lembrar, talvez porque estivesse demasiadamente ocupado para pensar em esvaziar sua mente.

As teorias atuais sobre a independência das funções cerebrais poderiam sugerir que a “memória fraca” de Bill era especificamente relacionada com números. Mas o menino conseguia lembrar-se perfeitamente de números de referência, preços e datas de milhares de discos. A diferença entre o

³ Os livros de G. Polya, *How to Solve it* (Garden City, Nova Iorque, Doubleday-Anchor, 1954); *Introduction and Analogy in Mathematics* (Princeton, Princeton University Press, 1954); e *Patterns of Plausible Inference* (Princeton, Princeton, 1969).

que ele “podia” e “não podia” aprender não dependia do conteúdo do conhecimento, mas de seu relacionamento com o assunto. A geometria da Tartaruga, em virtude de sua conexão com ritmo, movimento e o conhecimento direcional necessário à vida cotidiana, permitiu a Bill relacionar-se com ela mais como fazia com as músicas do que com as tabuadas. Seu progresso foi espetacular. Através da geometria da Tartaruga, conhecimentos matemáticos que Bill antes rejeitava puderam penetrar em seu universo intelectual.

Agora, passemos de considerações matemáticas às matemáticas. Que tipo de matemática se aprende com a geometria da Tartaruga? Para fins dessa discussão, distinguimos três classes de conhecimento matemático, sendo que cada um deles se beneficia com o trabalho com a Tartaruga. Primeiro, há o grupo de conhecimentos da “matemática escolar”, que tem sido explicitamente escolhido (na minha opinião, mais por acidentes históricos) como o ponto central da matemática básica que todo cidadão deveria possuir. Segundo, há um grupo de conhecimentos que chamo de protomatemáticos, que é pressuposto pela matemática escolar, embora não esteja explicitamente citado no currículo tradicional. Parte desse conhecimento é de natureza “social”: por exemplo, conhecimento que diz respeito a por que devemos aprender matemática e como podemos fazer com que tenha algum sentido. Outro conhecimento nessa categoria é o tipo de estrutura fundamental para a qual a epistemologia genética chamou a atenção dos educadores: princípios dedutivos tais como a transitividade, as conservações, a lógica intuitiva de classificação, e assim por diante. Finalmente, há uma terceira categoria: o conhecimento que não está nem incluído e nem é pressuposto pela matemática escolar, mas que *deveria* ser considerado como necessário à bagagem intelectual do cidadão educado do futuro.

Penso que a compreensão das relações entre as geometrias euclidiana, cartesiana e diferencial pertence à terceira categoria. Para o aluno, desenhar um círculo com a Tartaruga é mais do que usar “bom senso” para desenhar um círculo. Coloca a criança em contato com um conjunto de idéias que estão na base do cálculo diferencial. Esse fato pode ser invisível a muitos leitores cujo único contato com o cálculo tenha sido algum curso no colegial ou na universidade, onde

o “cálculo” equivalia a algumas manipulações formais de símbolos. A criança, na circunstância do círculo da Tartaruga, não estava aprendendo sobre o *formalismo* do cálculo, por exemplo, que a derivada de x^h é hx^{h-1} , mas sim sobre seu uso e seu *significado*. De fato, o programa do círculo conduz a um formalismo alternativo que é tradicionalmente chamado “equação diferencial” e é um poderoso portador de idéias que estão subjacentes ao cálculo diferencial. Essa é a razão por que é possível entender tantos tópicos através da Tartaruga; *o programa da Tartaruga é um análogo intuitivo da equação diferencial, um conceito que qualquer pessoa pode encontrar em quase todos os exemplos da matemática aplicada tradicional.*

O cálculo diferencial deriva muito do seu poder da capacidade de descrever o crescimento através do que está acontecendo na extremidade que está crescendo. Isso é o que o transformou num instrumento tão útil às tentativas de Newton de entender o movimento dos planetas. Depois de equacionada a órbita de um planeta, são as condições locais do lugar onde ele se encontra no momento que determinam para onde ele irá em seguida. Em nossas instruções à Tartaruga, **PARAFRENTE 1** e **PARADIREITA 1**, nós nos referimos somente à diferença entre onde ela se encontra agora e para onde ela deverá ir momentaneamente. Isso é o que torna as instruções *diferenciais*. Nisso não há nenhuma referência a qualquer parte que esteja além do rastro deixado pela Tartaruga. Ela enxerga o círculo à medida que ele vai sendo construído e é cega a tudo o que estiver muito além do círculo. Essa propriedade é tão importante que os matemáticos têm um nome especial para ela: a geometria da Tartaruga é “intrínseca”. O espírito da geometria diferencial intrínseca é evidenciado se examinarmos diversas maneiras de pensar uma curva, por exemplo, o círculo. Para Euclides, a característica que define um círculo é a distância constante entre pontos desse círculo e um outro ponto, o centro, que não faz, por sua vez, parte do círculo. Na geometria cartesiana, nesse aspecto mais parecida com a de Euclides do que com a geometria da Tartaruga, os pontos são posicionados pela sua distância de algo que está fora deles, ou seja, os eixos das coordenadas perpendiculares. Linhas e curvas são definidas por equações conectando essas coordenadas. Assim, por exemplo, um círculo é descrito como:

$$(x - a)^2 + (y - b)^2 = R^2$$

Na geometria da Tartaruga um círculo é definido pelo fato de que a Tartaruga repete a ação: PARAFRENTE um pouco, VIRA um pouco. Essa repetição significa que a curva que ela desenha terá “curvatura constante”, onde curvatura significa quanto se vira para um dado movimento de avançar.⁴

A geometria da Tartaruga pertence a uma família de geometrias com propriedades não encontradas nos sistemas euclidianos ou cartesianos. Essas são as geometrias diferenciais desenvolvidas desde a época de Newton e que viabilizaram a maior parte da física moderna. Nós notamos que a *equação diferencial* é o formalismo através do qual os físicos foram capazes de descrever o movimento de uma partícula ou de um planeta. No Capítulo 5, onde esse assunto é discutido com mais detalhes, veremos que ela é, também, o formalismo adequado para descrever a locomoção de um animal ou a evolução de uma economia. Chegaremos a entender mais claramente que não é por coincidência que a geometria da Tartaruga tem vínculos tanto com a experiência de uma criança quanto com as realizações mais importantes da física. Isso porque as leis do movimento de uma criança, embora de forma menos precisa, compartilham a estrutura matemática da equação diferencial com as leis de movimento dos planetas girando ao redor do Sol e com as das mariposas voando em volta da chama de uma vela. E a Tartaruga é nada mais, nada menos, que a reconstrução, numa forma computacional intuitiva, do centro qualitativo dessa estrutura matemática. Quando voltarmos a essas idéias no Capítulo 5, veremos como essa geometria nos abre as portas para uma percepção intuitiva de cálculo, física e modelos matemáticos, tais como eles são usados nas ciências biológicas e sociais.

⁴ Definições mais usadas de curvatura parecem mais complexas mas são equivalentes a esta. Temos assim mais um exemplo de um conceito “avançado” em forma palpável.

O efeito de trabalhar com a geometria da Tartaruga em algumas áreas da matemática escolar é fundamentalmente *afetivo* ou *relacional*. Muitas crianças chegaram ao laboratório LOGO detestando números, como se eles fossem seres alienígenas, e acabaram por apaixonar-se por eles. Em outros casos, o trabalho com a Tartaruga propicia modelos intuitivos específicos para complexos conceitos matemáticos que a maioria das crianças acha difíceis. O uso de números para medir ângulos é um exemplo simples. No contexto da Tartaruga, as crianças adquirem essa habilidade quase que inconscientemente. Todas elas — inclusive alguns poucos alunos de primeira série e muitos de terceira série, com quem trabalhamos — saem da experiência com uma idéia muito melhor do que a maioria dos estudantes do colegial a respeito do que significa 45 graus, 10 graus ou 360 graus. Assim, estão preparadas para todos os tópicos formais — geometria, trigonometria, desenho, etc. — em que o conceito de *ângulo* desempenha um papel central. Mas estão, além disso, preparadas para algo mais, para um aspecto do uso da medida angular em nossa sociedade para o qual a matemática escolar tem se mostrado sistematicamente cega.

Uma das representações mais disseminadas da idéia de ângulo na vida dos americanos contemporâneos ocorre em navegação. Milhões de pessoas navegam barcos ou aviões ou lêem mapas. Para a maioria, há uma total dissociação entre essas atividades de *vida* e a matemática escolar, *morta*. Damos muita ênfase ao fato de que usar a Tartaruga como um portador metafórico da idéia de ângulo conecta-a firmemente à geometria corporal. Temos chamado isso de *sintonicidade corporal*. Aqui, vemos uma *sintonicidade cultural*: a Tartaruga liga a idéia de ângulo à navegação, atividade positiva e firmemente enraizada à cultura extracurricular de muitas crianças. À medida que os computadores se espalham pelo mundo, a sintonicidade cultural da geometria da Tartaruga se tornará mais e mais poderosa.

Um segundo conceito chave da matemática, cuja compreensão é facilitada pela Tartaruga, é a idéia de *variável*: a idéia de usar um símbolo para dar nome a uma entidade desconhecida. Para demonstrar como a Tartaruga contribui para isso, estendemos o programa dos círculos para um programa para espirais da Tartaruga (Figura 7):

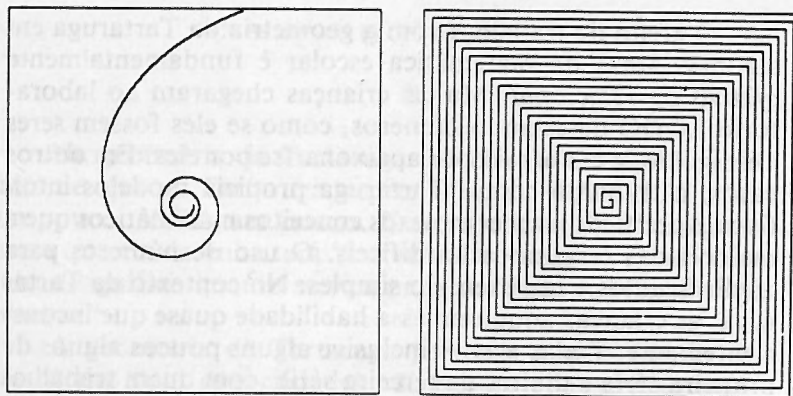


Figura 7

Veja, por exemplo, a espiral do caracol. Como o círculo, ela também pode ser feita de acordo com a receita: vá um pouco para a frente, vire um pouco. A diferença entre os dois é que o círculo é “o mesmo o tempo todo”, ao passo que a espiral vai ficando achatada, “menos curva” à medida que se afasta do centro. O círculo é uma curva de curvatura constante. A curvatura da espiral diminui à medida que se movimenta para fora. Para andar em espiral, uma pessoa poderia dar um passo, virar, dar um passo, virar, cada vez virando um pouco menos (ou dando passos um pouco maiores). Para transmitir essas instruções à Tartaruga seria necessário algum artifício para expressar o fato de que se está lidando com uma quantidade *variável*. Em princípio, poder-se-ia descrever esse processo através de um longo programa (veja Figura 8), que especificaria precisamente quanto a Tartaruga deve girar após cada passo. Isso é tedioso. Um método melhor é usar o conceito de denominação simbólica através de uma variável, uma das idéias matemáticas mais poderosas e importantes já inventadas.

UMA ESPIRAL	UM CARACOL
PARAFRENTE 10	PARADIREITA 5
PARADIREITA 90	PARADIREITA 5
PARAFRENTE 15	PARAFRENTE 5*.95
PARADIREITA 90	PARADIREITA 5
PARAFRENTE 20	PARAFRENTE 5*.95*.95
PARADIREITA 90	PARADIREITA 5
PARAFRENTE 25	PARAFRENTE 5*.95*.95*.95
PARADIREITA 90	PARADIREITA 5
PARAFRENTE 30	PARAFRENTE 5*.95*.95*.95*.95
PARADIREITA 90	PARADIREITA 5
PARAFRENTE 35	PARAFRENTE 5*.95*.95*.95*.95*.95
PARADIREITA 90	PARADIREITA 5
PARAFRENTE 40	PARAFRENTE 5*.95*.95*.95*.95*.95*.95
PARADIREITA 90	PARADIREITA 5
PARAFRENTE 45	PARAFRENTE 5*.95*.95*.95*.95*.95*.95*.95
PARADIREITA 90	PARADIREITA 5
PARAFRENTE 50	PARAFRENTE 5*.95*.95*.95*.95*.95*.95*.95*.95
PARADIREITA 90	PARADIREITA 5
etc.	etc.

Figura 8
Como NÃO desenhar espirais

Na linguagem da Tartaruga, as variáveis são apresentadas como meio de comunicação. O que queremos dizer à Tartaruga é: “dê um pequeno passo para a frente e daí vire um certo tanto, mas não posso lhe dizer agora quanto virar pois será diferente a cada vez”. Para desenhar a espiral “quadrado”, queremos dizer: “mova-se para a frente uma certa distância, que será diferente a cada vez, e daí vire 90”. Em linguagem matemática o “truque” para dizer algo assim é inventar um nome para a “quantidade que não posso lhe dizer agora”. Esse nome poderia ser uma letra X como uma palavra inteira como ÂNGULO ou DISTÂNCIA (uma das menores contribuições da cultura dos computadores à matemática é o hábito de se usar palavras mnemônicas ao invés de simples letras para nomes de variáveis). Para pôr em funcionamento a idéia de variável, a linguagem da Tartaruga nos permite criar um “procedimento com um dado de entrada”. Isso pode ser feito digitando-se:

UM PASSO : DISTÂNCIA
 PARAFRENTE : DISTÂNCIA
 PARADIREITA 90
 FIM

O comando PASSO 100 fará com que a Tartaruga ande 100 unidades para a frente e aí vire 90 graus à direita; da mesma forma PASSO 110 fará com que ela se mova 110 unidades para a frente e então vire 90 graus à direita. Nos ambientes LOGO, encorajamos as crianças a usar uma metáfora antropomórfica: o comando PASSO invoca um agente (o "homem do PASSO") cuja função é emitir dois comandos, à Tartaruga: PARAFRENTE e PARADIREITA. Mas esse agente não pode cumprir sua missão sem que lhe seja dada uma mensagem — um número que será dado ao "homem do PARAFRENTE", que, por sua vez, passará a mensagem à Tartaruga.

O procedimento PASSO não é lá muito interessante, mas uma pequena mudança fará com que passe a ser. Compare-o com o procedimento ESPIRAL, que é exatamente o mesmo, com exceção de uma linha a mais:

UMA ESPIRAL: DISTÂNCIA
 PARAFRENTE: DISTÂNCIA
 PARA DIREITA 90
 ESPIRAL : DISTÂNCIA + 5
 FIM

O comando ESPIRAL 100 chama o agente ESPIRAL e dá-lhe a mensagem com o dado 100 como entrada. O agente ESPIRAL emite então três comandos. O primeiro é igual ao primeiro comando do agente PASSO: diz à Tartaruga para caminhar 100 unidades para a frente. O segundo diz à Tartaruga para virar à direita. Aqui novamente não há nada de novo. Mas o terceiro faz algo extraordinário. Esse comando é ESPIRAL 105. Qual é seu efeito? Diz à Tartaruga para mover-se 105 unidades para a frente, daí virar 90 graus à direita e emitir o comando ESPIRAL 110. Temos, assim, um truque chamado "recursão" para estabelecer um processo que nunca termina e cujos passos iniciais são mostrados na Figura 9A.

De todas as idéias que apresentei às crianças, a recursão se destacou como uma idéia capaz de provocar uma resposta entusiástica. Acho que isso acontece em parte porque a idéia de continuar indefinidamente toca fundo nas fantasias de qualquer criança e também porque a recursão tem suas raízes na cultura popular. Há, por exemplo, a charada da recursão: "Se você tem dois desejos, qual é o segundo?" (Mais dois desejos.) Há, também, a figura sugestiva de um rótulo, que na verdade é um desenho de si mesmo. Oferecendo às crianças oportunidades de brincar com o infinito, o conjunto de idéias representadas pelo procedimento ESPIRAL as põe em contato com algo como "o que significa ser um matemático". Outro aspecto da vivência de uma experiência matemática é ilustrado pela Figura 9B, onde mostramos como um curioso fenômeno matemático pode ser explorado, variando o ângulo no procedimento ESPIRAL. Ângulos próximos de 90 fazem com que emergja um surpreendente fenômeno: os braços das galáxias como quadrados torcidos não foram realmente programados no procedimento. Aparecem como algo chocante e com bastante frequência motivam longas explorações em que o pensamento numérico e geométrico muitas vezes interage com a estética.

Num ambiente LOGO, as novas idéias são adquiridas como maneira de satisfazer uma necessidade pessoal de fazer algo que não se conseguia fazer antes. Na escola tradicional, o estudante iniciante se defronta com a noção de variável em pequenos problemas tais como:

$$5 + X = 8 \quad \text{Quanto vale } X?$$

Poucas crianças vêem isso como um problema pessoalmente relevante, e muito menos experienciam o método de solução como uma fonte de poder. Elas estão certas. No contexto de suas vidas, não podem fazer muita coisa com esse problema e sua resolução. No contato com LOGO, a situação é bastante diferente. Aqui a criança tem uma necessidade pessoal: fazer uma espiral. Nesse contexto, a idéia de variável é fonte de poder pessoal, poder de realizar algo desejado mas inacessível sem essa idéia. Certamente, muitas das crianças que são expostas à noção de variável num ambiente escolar

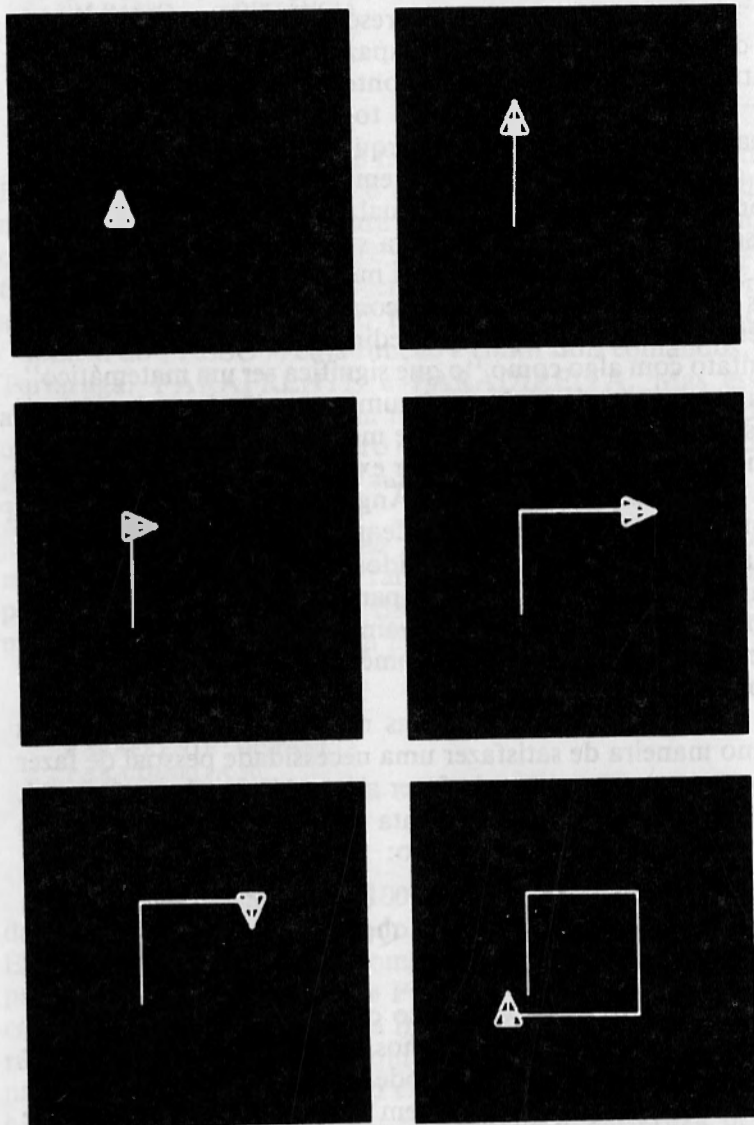


Figura 9A

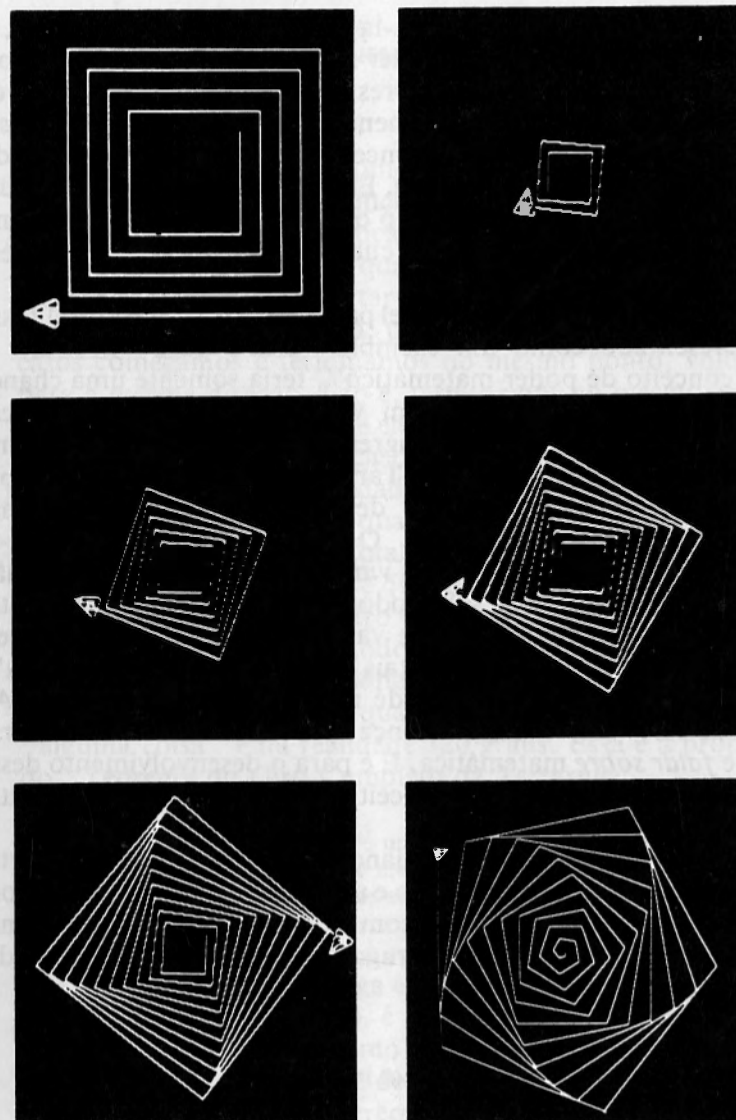


Figura 9B

tradicional aprendem a usá-la efetivamente. No entanto, a sensação de ter algum “poder matemático” raramente ocorre, nem mesmo aos melhores e mais brilhantes alunos de matemática. E este é justamente o ponto de maior contraste entre um encontro com o conceito de variável na escola tradicional e no ambiente LOGO. Em LOGO, o conceito dá poderes à criança, e ela vivencia o que para os matemáticos significa possibilitar a toda uma cultura fazer coisas que ninguém podia fazer antes.

Se o uso de uma variável para construir uma espiral fosse apresentado como um exemplo isolado para “ilustrar” o “conceito de poder matemático”, teria somente uma chance aleatória de estabelecer um vínculo com algumas poucas crianças (assim como as engrenagens tinham vínculos comigo). Mas na geometria da Tartaruga ela não é um exemplo isolado. É um caso típico de como todo o conhecimento matemático é encontrado. O *poder matemático*, pode-se dizer, *torna-se um estilo de vida*. O sentimento de poder não é associado somente a métodos que são aplicáveis imediatamente, tais como o uso de variáveis de medidas angulares, mas também a conceitos tais como “teorema”, “prova”, “heurística” ou “método de resolução de problemas”. Ao usar esses conceitos, a criança está desenvolvendo maneiras de *falar sobre* matemática. E é para o desenvolvimento dessa capacidade de articular conceitos matemáticos que nos voltamos agora.

Consideremos uma criança que já tenha feito a Tartaruga desenhar um quadrado e um círculo e que gostaria agora de desenhar um triângulo com os três lados iguais, do tamanho de 100 passos de Tartaruga. A forma do programa poderia ser:

```
UM TRIÂNGULO
REPITA 3 (PARAFRENTE 100 PARADIREITA ALGUMA COISA)
FIM
```

Para que a Tartaruga possa desenhar a figura, a criança precisa dizer-lhe algo mais. Qual é a quantidade chamada de “alguma coisa”? Para o quadrado, instruímos a Tartaruga para virar 90 graus em cada vértice, de maneira que o programa era:

```
UM QUADRADO
REPITA 4 (PARAFRENTE 100 PARA DIREITA 90)
FIM
```

Podemos ver agora como o preceito de Polya, “encontrar similaridades”, e o princípio dos procedimentos da geometria da Tartaruga, “brincar de Tartaruga”, podem atuar juntos. *O que é igual* no quadrado e no triângulo? Se nos pusermos no lugar da Tartaruga e percorrermos o caminho que desejamos que ela siga, perceberemos que em ambos os casos começamos e terminamos no mesmo ponto, voltados para a mesma direção. Isto é, terminamos no mesmo estado em que começamos. E entre eles fizemos uma volta completa. *O que é diferente* nos dois casos é que fizemos o giro em “três andadas” ou “quatro andadas”. O conteúdo matemático dessa idéia é tão poderoso quanto simples. A prioridade deve ser dada a noção de giro total — quanto se vira no total?

O fato surpreendente é que todos os giros completos são iguais, 360 graus. Os quatro 90 graus do quadrado somam 360 graus e, uma vez que todos os giros acontecem nos vértices, cada virada em um triângulo deve ser de 360 graus dividido por três. Assim, a quantidade que antes chamamos “alguma coisa” é na realidade 120 graus. Essa é a proposta do “Teorema do Giro Completo da Tartaruga”.

Se uma Tartaruga percorre um caminho ao redor do perímetro de qualquer área e termina no mesmo estado em que começou, então a soma total de todos os giros será 360 graus.⁵

Primeiro (ao menos no contexto LOGO), o Teorema do Giro Completo da Tartaruga é mais *poderoso*: a criança pode realmente usá-lo. Segundo, é mais *genérico*: aplica-se a quadrados e curvas, assim como a triângulos. Terceiro, é mais *compreensível*: sua prova é de fácil entendimento. É também mais pessoal: pode-se “percorrê-lo passo a passo”, e é um modelo para o hábito generalizado de relacionar a matemática ao conhecimento pessoal.

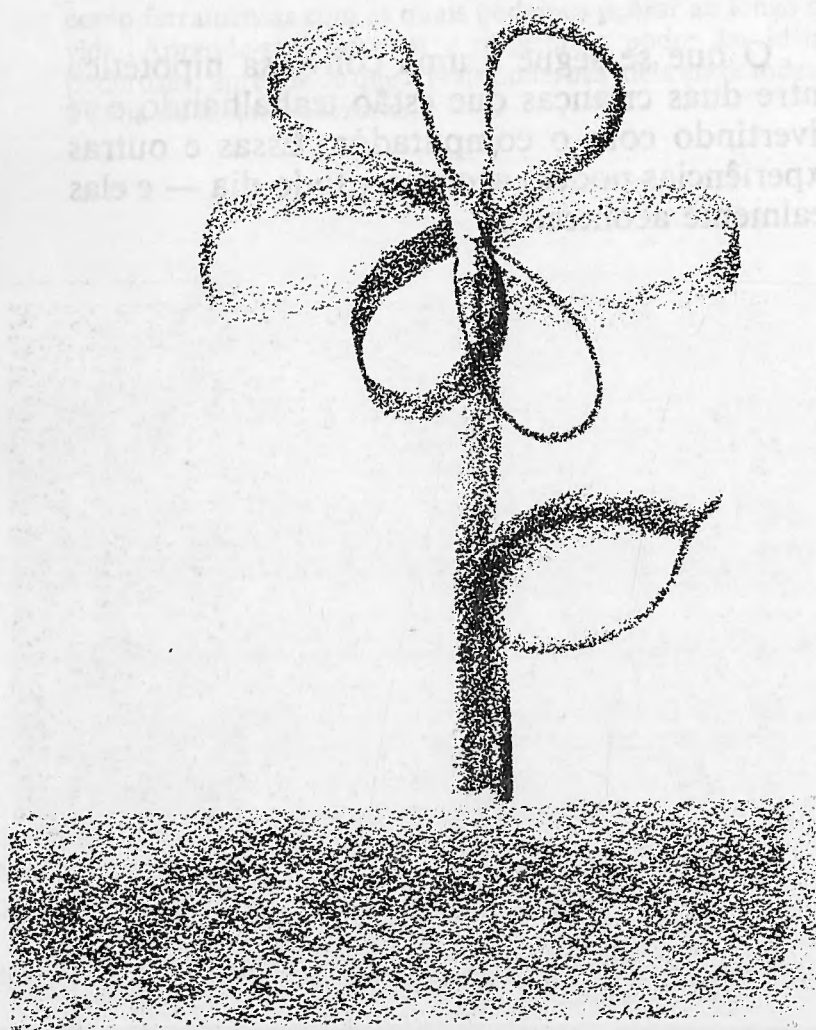
⁵ Se os giros podem ser para a direita ou para a esquerda, uma direção deve ser tratada como negativa. “Limite de uma área (conectada)” é uma maneira simples de dizer “curva simples fechada”. Se a restrição for retirada, a soma dos giros deve continuar a ser um múltiplo de 360°.

Vimos muitas crianças usarem o Teorema do Giro Completo da Tartaruga para desenhar um triângulo equilátero. Mas o que é mais importante é ver como esse teorema pode acompanhá-las em simples programas como este até outros bem mais avançados — as flores, reproduzidas a seguir, mostram um projeto nesta direção. Pois o que é importante, quando damos um teorema às crianças para que o utilizem não é que elas o memorizem. O que mais interessa é que, ao se desenvolver com alguns teoremas bastante poderosos, podemos vir a apreciar como certas idéias podem ser usadas como ferramentas com as quais podemos pensar ao longo da vida. Aprende-se a apreciar e respeitar o poder das idéias poderosas; aprende-se que a mais poderosa idéia entre todas é a idéia de idéias poderosas.

O que se segue é uma conversa hipotética entre duas crianças que estão trabalhando e se divertindo com o computador. Essas e outras experiências podem acontecer todo dia — e elas realmente acontecem.

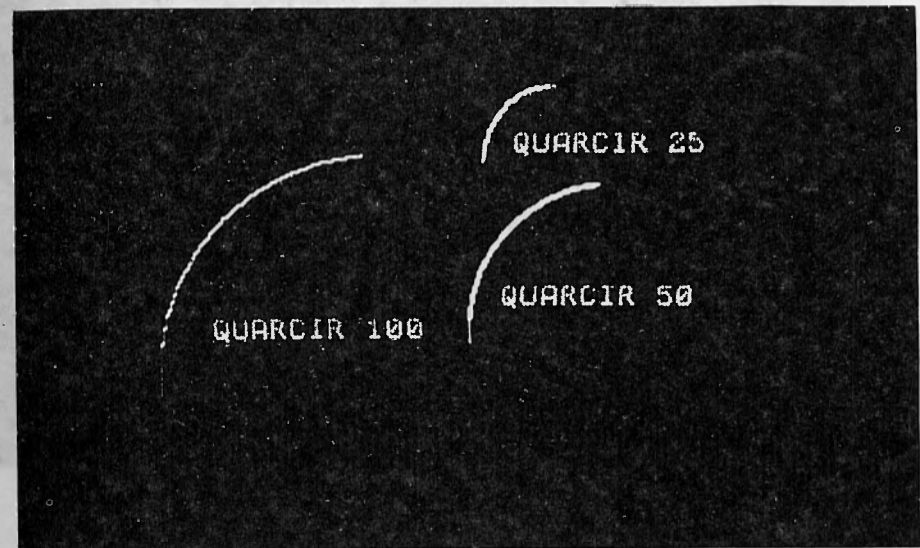
UM PLANO

- Vamos fazer o computador desenhar uma flor como essa?



ENCONTRANDO RECURSOS

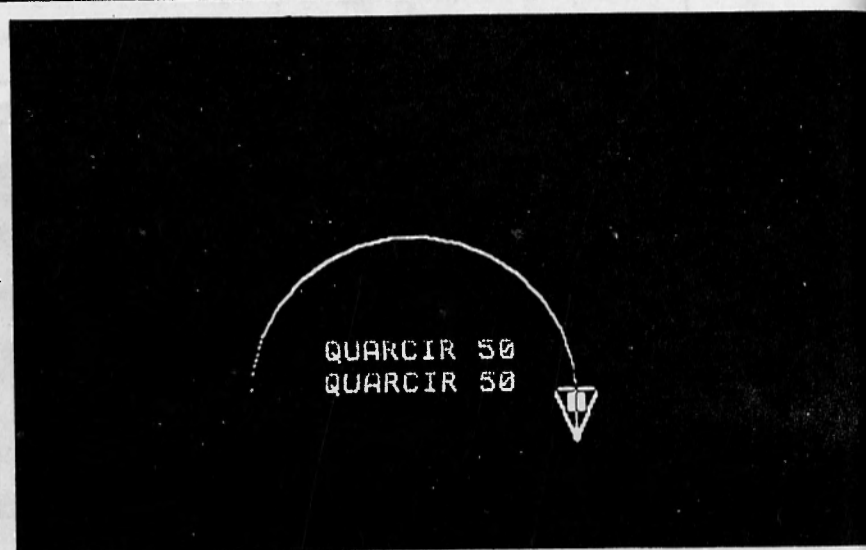
- Você tem algum programa que poderíamos usar?
- Sim, tenho aquele que desenha um quarto de círculo que fiz na semana passada.
- Mostre-me.



- Ele desenha um quarto de círculo onde quer que a Tartaruga esteja.
- É preciso que se introduza uma variável para que se altere o tamanho.

TENTANDO ALGUMA COISA

- Vamos fazer uma pétala colocando dois quartos de círculo juntos (QUARCIR).
- Ótimo. De que tamanho?
- Que tal 50?

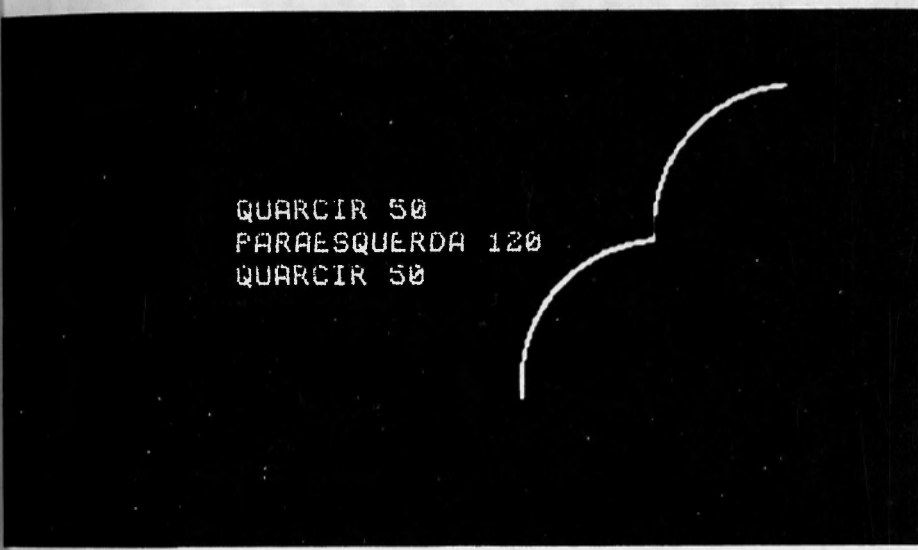


UM PRIMEIRO *BUG*!

- Não funcionou.
- Claro! Dois quartos de círculo formam um semicírculo!

CORRIGINDO UM *BUG*

- Temos que girar a Tartaruga entre os dois quartos de círculo.
- Vamos tentar 120 graus.
- Isso mesmo; funcionou para os triângulos.
- Vamos também esconder a Tartaruga, escrevendo *DESA-PAREÇA*.



QUARCIR 50
PARAESQUERDA 120
QUARCIR 50

É UM PÁSSARO!

- O que está acontecendo?
- Tente virar para a direita.

- Por que não ficamos simplesmente com o pássaro? Poderíamos fazer um bando deles.
- Você pode fazer isso. Eu quero minha flor.
- Poderíamos fazer a flor e depois os pássaros.

QUARCIR 50
PARADIREITA 120
QUARCIR 50

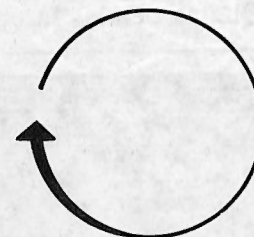


É UM PEIXE!

- Virar à direita é melhor.
- Mas não sabemos quanto virar.
- Poderíamos tentar alguns outros números.
- Ou poderíamos tentar alguns cálculos matemáticos.

O SALVAMENTO PELA MATEMÁTICA

- Você conhece o Teorema do Giro Completo da Tartaruga? Pense na Tartaruga percorrendo todo o caminho ao redor da pétala e some os ângulos de todas as suas viradas. Vai dar 360.



- A volta toda é 360.
- Cada QUARCIR vira a Tartaruga 90° . Isso dará 180° para dois QUARCIR.
- 360 no total. Tire 180 para os dois QUARCIR. Isso deixará 180 para as partes pontudas. 90 cada.
- Então deveríamos fazer PARADIREITA 90 em cada extremidade.
- Vamos tentar!

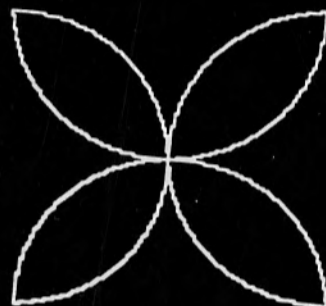
UM PROCEDIMENTO QUE FUNCIONA

```
UMA PETALA
#
QUARCIR 50
PARADIREITA 90
QUARCIR 50
PARADIREITA 90
FIM
```



— Quatro pétalas fazem uma flor!

```
UMA FLOR
#
PETALA
PARADIREITA 90
PETALA
PARADIREITA 90
PETALA
PARADIREITA 90
PETALA
PARADIREITA 90
FIM
```

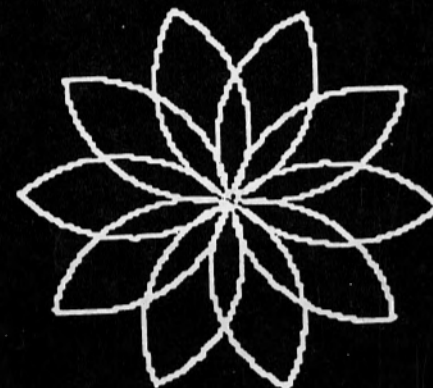


— Isso parece mais uma hélice!
— Vamos tentar 10 pétalas então.

UMA CONSTRUÇÃO MODULAR

- Teclar tudo isso vai acabar machucando meus dedos.
- Podemos usar REPITA.

```
UMA NOVA FLOR
REPITA 10
PETALA
PARADIREITA 360/10
FIM
```



- Agora sim!
- Mas é muito grande.
- Tudo o que temos de fazer é mudar o 50 em PÉTALA. Coloque 25.

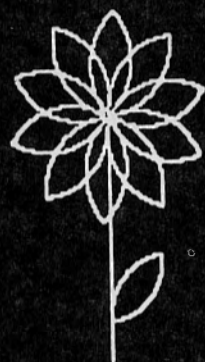
- Se fizermos com que PÉTALA tenha um dado de entrada, poderemos fazer flores grandes e pequenas.
- Isso é fácil. Basta mudar para UMA PÉTALA :TAMANH, QUARCIR :TAMANHO e assim por diante.
- Aposto que teremos *bugs* se tentarmos isso. Vamos experimentar só com 25 antes.
- Daí poderemos escrever um superprocedimento para desenhar uma planta.

PROJETO DE CONSTRUÇÃO

```

UMA PLANTA
NOVA FLOR
PARATRÁS 50
PÉTALA
PARATRÁS 50
FIM

```



OS FINS TORNAM-SE MEIOS

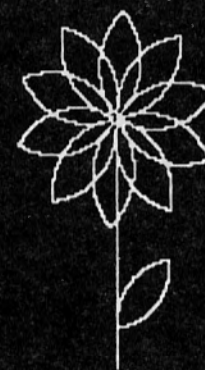
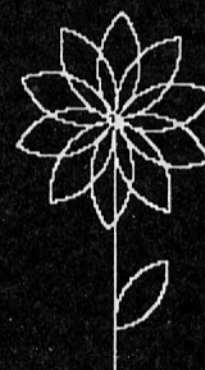
- Tenho um ótimo procedimento para colocar diversos desenhos juntos. Chama-se DESLOCAMENTO. É só comandar PLANTA DESLOCAMENTO PLANTA DESLOCAMENTO PLANTA DESLOCAMENTO.



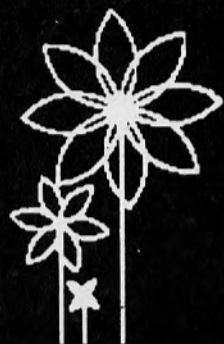
UM DESLOCAMENTO :DISTÂNCIA
 NÃO RISCUE
 PARADIREITA 90
 PARA FRENTE :DISTÂNCIA
 PARA ESQUERDA 90
 RISCUE

DESLOCAMENTO 30
 DESLOCAMENTO 60

TESTANDO A NOVA FERRAMENTA



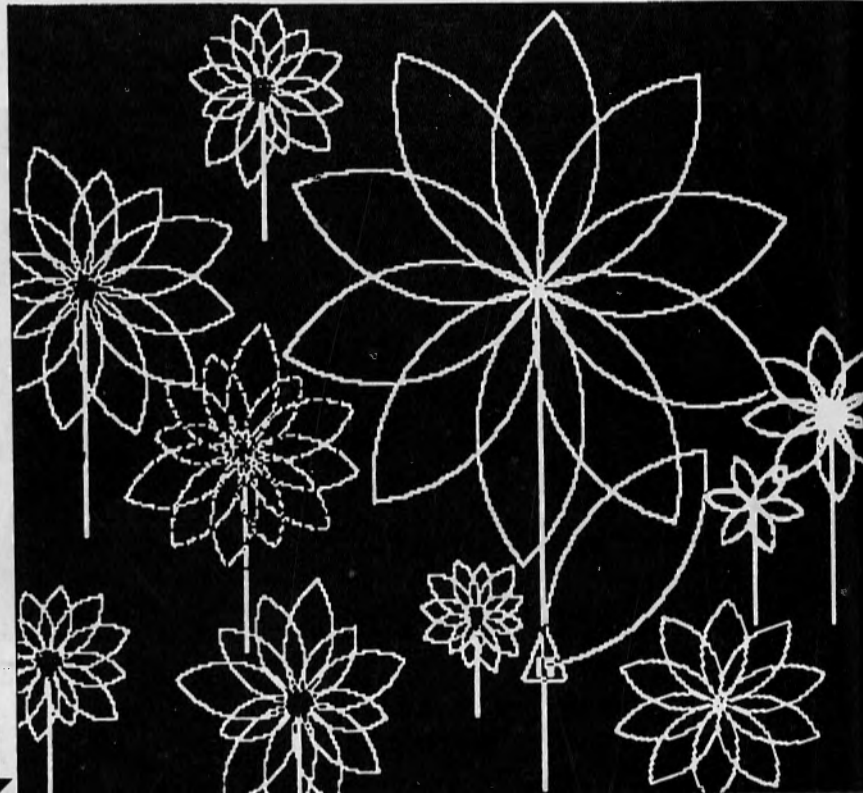
- Ficaria melhor com algumas pequenas e outras grandes.
- Então, vamos mudar o procedimento para aceitar dados de entrada.
- Se usarmos o comando NÚMERO ATÉ (um número escolhido aleatoriamente) poderemos fazer um jardim.



- Meu próximo projeto será um bando de pássaros.
- Talvez possamos colocar os pássaros e as flores juntos.
- Talvez.



JARDIM



JARDIM

AVENTURA

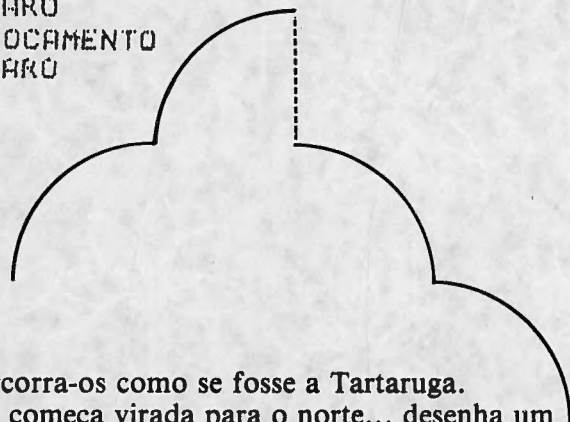
- Façamos um bando usando os comandos PÁSSARO DESLOCAMENTO PÁSSARO DESLOCAMENTO.
- Quero seis pássaros; para isso usarei REPITA.

```
UM BANDO
#
REPITA 6
PASSARO
DESLOCAMENTO 20
FIM
```



- Engraçado! Eu queria seis pássaros e todos na mesma direção, para cima.
- Mas é bonito. Antes de corrigirmos, deveríamos guardar uma cópia dele assim.

```
PASSARO
DESLOCAMENTO
PASSARO
```

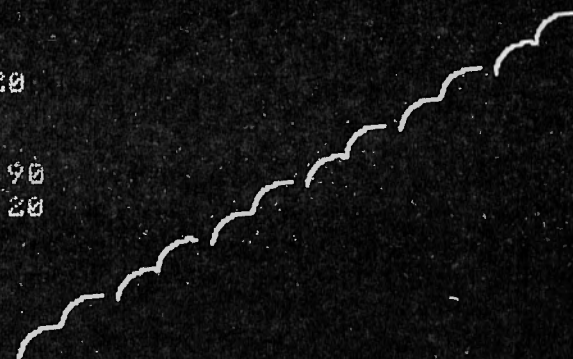


- Percorra-os como se fosse a Tartaruga.
- Ela começa virada para o norte... desenha um pássaro... agora está virada para o leste... esse é o erro.
- E o quinto está desenhado sobre o primeiro.

CORREÇÃO

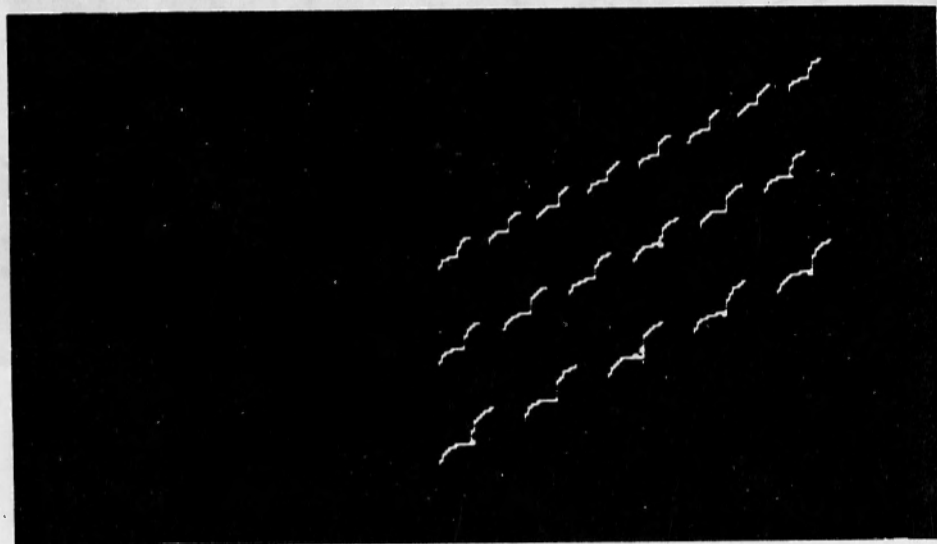
- Se você quiser corrigir o *bug*, gire a Tartaruga até que ela esteja voltada para o norte, após desenhar cada pássaro.
- Vamos fazê-los menores.

```
UM BANDO
#
PARADIREITA 20
REPITA 6
PASSARO
PARAESQUERDA 90
DESLOCAMENTO 20
FIM
```



- Aqui temos o bando.

- Ainda não terminamos. Vamos fazer com que BANDO possa aceitar novos dados a cada vez e colocar vários deles juntos.



- Como poderíamos fazê-los voar?
— Achei algo realmente interessante. Em PÁSSARO, use o comando RODA ao invés de PARADIREITA... Tem *bugs*, mas é legal.

... UM COMEÇO

A próxima fase do projeto produzirá os efeitos mais espetaculares à medida que os pássaros forem colocados em movimento. No entanto, as páginas impressas não podem captar o produto nem o processo: as aventuras descobertas, os *bugs* e inspirações matemáticas exigem movimento para serem apreciadas. Refletir sobre o que estamos perdendo me conduz a uma outra descrição de algo novo que o computador oferece à criança: a oportunidade de fazer desenhos animados, de até mesmo rabiscar e garatujar com movimento, assim como com linhas. Talvez elas estarão aprendendo, ao fazê-lo, a pensar mais dinamicamente.

Linguagem para os computadores e para as pessoas

"A centopéia vivia bem contente
Até que o sapo, por brincadeira,
Perguntou-lhe: "Que perna você move primeiro?"
Isso perguntou-a de tal maneira
Que hoje ela passa o dia inteiro
Pensando como andar novamente"

(anônimo)

A história da centopéia é perturbadora. Nós geralmente acreditamos que pensar e entender são, por definição, coisas boas para se fazer e, em particular, úteis à aprendizagem. Mas a centopéia ficou paranóica pensando em suas próprias ações. O mesmo poderia acontecer com as pessoas? Quer isso dizer que devemos desistir de pensar sobre nós mesmos? De fato, em nossa cultura "racional" ainda prevalece a noção de que o pensamento impede a ação, e até mesmo a aprendizagem. Eis a nossa maneira habitual de ensinar como se aprende a andar de bicicleta: "Continue tentando — um dia você conseguirá" é o conselho mais ou menos padronizado que os pais dão às crianças quando elas estão tentando dominar a bicicleta de duas rodas.

Muitos filósofos desenvolveram a idéia de que nem todo conhecimento pode ser descrito em palavras ou estar ao alcance do pensamento consciente. Essa idéia foi incluída em recentes reformas curriculares por defensores da aprendizagem

ativa e teve o apoio teórico de J. S. Bruner,¹ que propôs uma classificação das várias maneiras de conhecer: alguns conhecimentos são representados como ações, alguns como imagens, e somente uma terceira categoria como símbolos. Bruner afirmou que "palavras e diagramas" são "importantes" para representar certos tipos de conhecimento que só podem ser compreendidos como ações. Neste capítulo, tentarei desenvolver uma abordagem mais flexível desses problemas.

Minha abordagem é mais flexível porque rejeita a dicotomia verbalizável *versus* não-verbalizável. Nenhum conhecimento é inteiramente redutível a palavras e nenhum é totalmente indescritível. Minha abordagem é mais flexível também por reconhecer uma dimensão histórica: um importante componente da história do conhecimento é o desenvolvimento de técnicas que aumentam o potencial de "palavras" e diagramas. O que é historicamente verdadeiro também o é para o indivíduo: um componente importante para nos tornarmos bons aprendizes é aprender como expandir as fronteiras daquilo que podemos expressar com palavras. Desse ponto de vista a questão sobre a bicicleta não é se podemos ou não "dizer" a alguém "tudo" sobre como andar de bicicleta, mas sim o que pode ser feito para aprimorar nossa habilidade de comunicação com os outros (e até conosco mesmos, em diálogos internos), o suficiente para fazer alguma diferença no aprendizado do "andar de bicicleta". O tema central deste capítulo é o desenvolvimento de linguagens descritivas que nos permitam falar sobre aprendizagem. Daremos atenção especial a um dos tipos de aprendizagem que muita gente acredita ser adquirida somente pela prática — o aprendizado de habilidades físicas. Nossa abordagem aqui será

¹ Aqui, estou procurando briga com Jerry Bruner. Mas eu concordo com ele em muitos pontos, e isso é verdade não somente sobre a linguagem e a ação, mas também sobre a relação com o ensino e o aprendizado de matérias culturais. A diferença sistemática entre nós dois é vista mais claramente se compararmos nossas abordagens da educação matemática. Bruner, como psicólogo, toma a matemática como uma entidade dada e considera, na sua maneira particularmente rica, os processos de ensiná-la e aprendê-la. Eu tento fazer uma matemática que possa ser aprendida. Penso que algo do mesmo tipo nos separa em relação à linguagem e à cultura e nos leva a paradigmas diferentes para uma "teoria da aprendizagem". Ver J. S. Bruner, *Toward a Theory of Instruction* (Cambridge, Harvard University Press, 1966) e J. S. Bruner e outros *Studies in Cognitive Growth*, Nova Iorque, John Wiley, 1966).

exatamente oposta à maneira como as escolas vêem a educação física — como um assunto de cunho não intelectual. Nossa estratégia é tornar visível, até para as crianças, o fato de que aprender algo de educação física tem muito em comum com a construção de uma teoria científica.

A realização disso pode trazer muitos benefícios. Primeiro, a partir de nosso trabalho no laboratório de LOGO, observei que isso significa um aprendizado mais efetivo de habilidades físicas.² Sem esse benefício direto, procurar “motivar” uma idéia científica fazendo uma analogia com alguma atividade física poderia facilmente degenerar em outro exemplo de “conversa de professores”. Mas se pudermos encontrar um lugar honesto para o pensamento científico nas atividades que a criança sente como importantes e pessoais, estaremos abrindo as portas para um padrão de aprendizagem mais coerente e sintônico.

Neste capítulo mostro que isso pode ser feito e sugiro que relacionar ciências a atividades físicas pode fazer muito mais pelo aprendizado de ciências do que simplesmente propiciar o que os educadores chamam de “motivação”. Isso potencialmente pode colocar a criança numa situação em que ela sinta alguma identificação com os cientistas, ao saber que eles usam linguagens descritivas e formais e ao saber que ela também pode usar tais linguagens como ferramentas para aprender habilidades físicas — malabarismos manuais, por exemplo. A idéia é dar às crianças meios de pensar sobre si mesmas como se “fizessem ciência” quando estão fazendo algo agradável com seu corpo. Se as crianças pudessem ver a invenção da geometria das coordenadas de Descartes como algo não completamente estranho às suas experiências pessoais do cotidiano, isso faria com que Descartes tivesse para elas um maior significado e, ao mesmo tempo, ajudaria as crianças a verem a si próprias de maneira mais significativa.

Vejam mais de perto o que a nossa cultura pensa sobre a aprendizagem de habilidades físicas. Em relação a esse aspecto ela não é mais consistente do que em relação aos assuntos matemáticos mais “abstratos” discutidos anterior-

mente. Embora a sabedoria popular e grande parte da Psicologia educacional estejam de acordo em que aprender habilidades físicas faz parte de um domínio em que o pensamento “consciente” não é útil, os esportistas profissionais nem sempre concordam com isso. Alguns dos treinadores de maior sucesso dão grande ênfase à análise e à verbalização dos movimentos que devem ser aprendidos e aperfeiçoados. Um escritor especializado em esportes, Timothy Gallwey, canalizou a sensibilidade popular em relação a esta contradição e garantiu seu sucesso editorial. Em seu livro *Inner Tennis*, ele dá algumas sugestões para ajudar a resolver o dilema. Gallwey encoraja o aprendiz a pensar como se fosse feito de dois “eus”: um analítico, mais verbal, e outro mais global, intuitivo. O ideal, ele argumenta, é que cada um desses “eus” esteja alternadamente no controle; na verdade, uma parte importante do processo de aprendizagem é ensinar a cada “eu” quando comandar — quando calar-se para dar vez ao outro.

A descrição de Gallwey sobre as negociações e transações que ocorrem numa aprendizagem bem sucedida é praticamente desconhecida nos círculos educacionais. Na escolha entre um modo analítico de pensamento e outro mais global, Gallwey passa o controle para o aprendiz. Isso é muito diferente do que em geral ocorre na definição do currículo escolar. Os reformadores de currículo preocupam-se com a escolha entre o aprendizado experimental verbal e não-verbal. Mas a estratégia deles é fazer esta escolha *a priori*, e incluí-la no currículo. A estratégia de Gallwey é ajudar as pessoas a aprender como tomar decisões por si próprias, uma abordagem que se alinha perfeitamente com a visão da criança como epistemólogo, já sugerida aqui, em que a criança é encorajada a tornar-se “craque” no reconhecimento e na escolha entre vários estilos de pensamento.

Tomando Timothy Gallwey como exemplo, não pretendo endossar tudo o que ele diz. A maioria de suas idéias me parecem problemáticas. Penso, porém, que ele está perfeitamente correto quando reconhece que as pessoas necessitam de um número maior de alternativas mais estruturadas para falar e para pensar sobre a aprendizagem de habilidades. A linguagem contemporânea não é suficientemente rica nesse domínio.

² O estudo mais sistemático está em H. Austin, “A Computational Theory of Physical Skill”, (tese de doutoramento, MIT, 1976).

Numa sociedade onde haja computadores em abundância, as linguagens computacionais, que oferecem simultaneamente os meios de controlar os computadores e novas e poderosas linguagens capazes de descrever o pensamento, serão, sem dúvida, incorporadas à cultura. Terão um importante efeito na linguagem que usamos para descrever nós mesmos e nossa aprendizagem. De alguma forma isso já acontece. É freqüente pessoas sem nenhum conhecimento de computação usarem conceitos tais como *input*, *output* e *feedback* para descrever seus processos mentais. Daremos um exemplo desse processo mostrando como alguns conceitos de programação podem ser usados como estrutura conceitual na aprendizagem de uma habilidade física, em particular o malabarismo manual.* Dessa forma, usaremos a programação como fonte de dispositivos descritivos, ou seja, como uma maneira de expandir a linguagem.

Muitas descobertas matemáticas e científicas têm desempenhado uma função lingüística similar ao fornecer palavras e conceitos para descrever o que anteriormente parecia amorfo demais para o pensamento sistemático. Um dos exemplos mais impressionantes do poder de uma linguagem descritiva é o aparecimento da geometria analítica, que teve papel decisivo no desenvolvimento da ciência moderna.

Diz a lenda que Descartes inventou a geometria analítica deitado na cama uma manhã, ao observar uma mosca no teto. Podemos imaginar qual deve ter sido seu raciocínio: a mosca, movendo-se para cá e para lá, traçou um caminho tão real como os círculos e as elipses da matemática euclidiana, mas que não se enquadrou na descrição da linguagem euclidiana. Descartes viu, então, uma maneira de explicar isto: a cada momento a posição da mosca podia ser descrita dizendo-se quão distante ela se encontrava das paredes. Pontos no espaço podiam ser descritos por pares de números; uma trajetória podia ser descrita por uma equação ou relação que é verdadeira para os pares de números cujos pontos estão sobre a curva. O poder de simbologia deu um passo adiante quando Descartes descobriu como usar uma linguagem algébrica para

descrever o espaço, e uma linguagem espacial para descrever um fenômeno algébrico. O método cartesiano de coordenadas geométricas nascido dessa circunstância, forneceu as ferramentas que a ciência tem usado para descrever o movimento de moscas e de planetas, e o "movimento" de objetos mais abstratos, as coisas da matemática pura.

A descoberta de Descartes tem muito em comum com a experiência da criança no episódio de fazer a Tartaruga desenhar um círculo. A criança estava explicitamente procurando uma maneira de descrever o processo de andar em círculo. Em LOGO, essa descrição assume uma forma muito simples, e a criança só tem que inventar a descrição. Descartes teve que fazer mais que isso. Mas em ambos os casos a recompensa é a possibilidade de descrever analiticamente algo que até aquele momento era conhecido somente de maneira global ou cinestética. Nem a criança nem Descartes sofreram a sina da centopéia: ambos podiam andar em círculo tanto antes como depois de saber descrever seus movimentos.

Mas o formalismo de Descartes, poderoso como ele é para descrever processos no mundo da física, não é o adequado para descrever processos no campo das atividades físicas.

Usar cálculo para descrever um jogo de malabarismo ou como a centopéia anda seria evidentemente muito confuso. Tentativas de usar tais descrições para aprender habilidades físicas provavelmente *deixariam* o aprendiz atordoado, mísero como a centopéia. Esse tipo de descrição formal não é o adequado para o caso. Mas outros são.

Os pesquisadores em educação não têm trabalhado no sentido de desenvolver tais formalismos. Mas, outra comunidade de pesquisa, a dos cientistas da computação, foram forçados (por suas próprias razões) a trabalhar no problema das linguagens descritivas e, dessa maneira, se tornaram uma fonte inesperada de inovação educacional. Os computadores são requisitados para fazer muitas coisas, e para conseguir que um computador faça alguma coisa exige que o processo subjacente seja descrito, em determinado nível, com precisão suficiente para que possa ser executado pela máquina. Assim, os cientistas de computação têm dedicado muito de seu talento e energia para desenvolver poderosos formalismos descritivos. Pode-se até mesmo dizer que o nome "ciência da computação" é inadequado: a sua maior parte não é uma ciência

* O autor refere-se ao *juggling* que, consiste em manter dois ou mais objetos (geralmente bolas) no ar através do lançar e do pegar alternadamente os objetos. Ver ilustrações nas páginas seguintes. (N.T.)

de computadores, mas sim uma ciência de descrições e de linguagens descritivas. Alguns dos formalismos descritivos produzidos pela ciência da computação são exatamente o que era necessário para se conseguir dominar o processo de aprendizagem de uma habilidade física. Isto será demonstrado aqui, escolhendo um importante conjunto de idéias de programação: o conceito de programação estruturada, ilustrado pela experiência de um aluno de 5ª série num laboratório LOGO.

Keith estabeleceu como objetivo fazer o computador desenhar a figura simplificada de um homem, como se vê na Figura 10A:

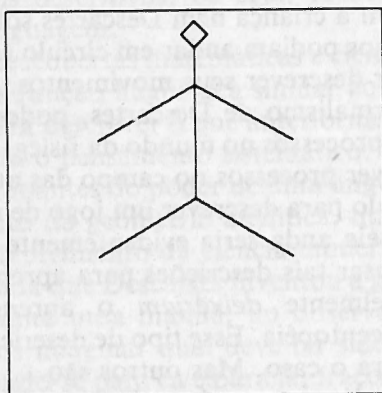


Figura 10A
Objetivo

Seu plano era começar por um pé e fazer o restante com grandes traços — desenhados pela Tartaruga. Ao fazer isso, Keith está usando uma imagem familiar pertencente à sua cultura pré-computacional, onde ele aprendeu a desenhar conectando pontos e a descrever suas atividades passo a passo. Assim, é perfeitamente natural que ele adote esse método na nova situação. A tarefa parecia simples e até um pouco enfa-donha. Ele escreveu (Figura 10B):

```

UM HOMEM
PARAFRENTE 300
PARADIREITA 120
PARAFRENTE 300
PARADIREITA 180
PARAFRENTE 300
PARAESQUERDA 120
PARAFRENTE 300
PARAESQUERDA 120
PARAFRENTE 300
PARADIREITA 180
PARAFRENTE 300
PARADIREITA 120
PARAFRENTE 300
PARADIREITA 180
PARAFRENTE 300
PARAESQUERDA 120
PARAFRENTE 150
PARAESQUERDA 45
PARAFRENTE 50
PARADIREITA 90
PARAFRENTE 50
PARADIREITA 90
PARAFRENTE 50
PARADIREITA 90
PARAFRENTE 50
FIM
  
```

Figura 10B

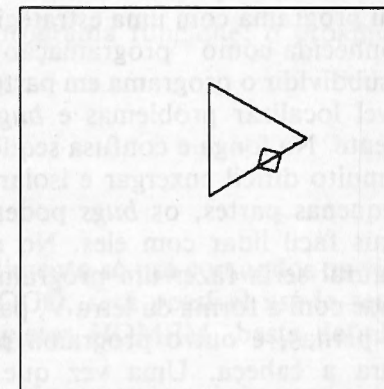


Figura 10C
Homem estranho

O que apareceu na tela foi o desenho totalmente inesperado de um **HOMEM ESTRANHO**, como se vê na Figura 10C. O que aconteceu de errado?

Keith estava preparado para surpresas desse tipo. Como já foi dito, uma das principais características do ambiente LOGO é o conjunto de conceitos relacionados ao *bug* e ao

debugging. Não se espera que tudo dê certo na primeira tentativa. Não se faz julgamentos do tipo “correto — você tem uma boa nota”, ou “errado — você tem uma nota baixa”. Pelo contrário, a atitude nesses casos de *bugs* é se questionar: “Como eu posso corrigir isso?” Para conseguir fazer essa correção, é necessário, antes de mais nada, que cada pessoa compreenda em seus próprios termos o que ocorreu. Somente agindo assim podemos fazer com que as coisas aconteçam da maneira que queremos. Mas, neste caso, Keith não foi capaz de descobrir o que tinha acontecido. Ele tinha escrito seu programa de uma maneira tal que era extremamente difícil localizar o *bug*. Onde estava o problema em seu programa? Que erro poderia ter causado tão grande transformação naquilo que tinha sido sua intenção inicial?

Para compreender a dificuldade de Keith, confrontamos seu programa com uma estratégia de programação diferente, conhecida como “programação estruturada”. Nosso intuito é subdividir o programa em partes naturais para que seja possível localizar problemas e *bugs* em cada parte, separadamente. Na longa e confusa sequência de instruções de Keith, é muito difícil enxergar e isolar um *bug*. Trabalhando com pequenas partes, os *bugs* podem ser identificados e é bem mais fácil lidar com eles. No nosso caso, uma subdivisão natural seria fazer um programa que desenhasse uma entidade com a forma da letra V, para ser usada para os braços e as pernas, e outro programa para desenhar um quadrado para a cabeça. Uma vez que esses “subprocedimentos” tenham sido elaborados e testados, fica extremamente fácil escrever o “superprocedimento” para desenhar a figura toda. Podemos escrever um programa extremamente simples para desenhar a figura:

```
UM HOMEM
VE
PARAFRENTE 50
VE
PARAFRENTE 25
CABEÇA
FIM
```

Este procedimento é bastante simples para ser entendido como um todo. Mas naturalmente ele só atinge essa simplicidade ao se supor que os comandos VE e CABEÇA são

entendidos pelo computador. Se esses comandos não tiverem sido definidos, o próximo passo deve ser justamente definir VE e CABEÇA. Podemos fazer isso dentro da mesma concepção de sempre trabalhar com um procedimento que pode ser entendido como um todo. Por exemplo:

```
UM VE
PARADIREITA 120
TRAÇO 50
PARADIREITA 120
TRAÇO 50
PARADIREITA 120
FIM
```

(Neste programa assumimos que o comando TRAÇO já foi definido; ele faz com que a Tartaruga vá para a frente e depois volte.)

Para fazer com que o programa funcione, o próximo passo é definir TRAÇO:

```
UM TRAÇO :DISTÂNCIA
PARAFRENTE :DISTÂNCIA
PARATRÁS :DISTÂNCIA
FIM
```

Uma vez que esse procedimento só usa comandos que já fazem parte da linguagem LOGO, será possível usá-lo sem outras definições. Para completar HOMEM, basta definir CABEÇA:

```
UMA CABEÇA
PARADIREITA 45
QUADRADO 20
FIM
```

Robert, um aluno de 7ª série, expressou sua “conversão” sobre esse estilo de programação dizendo: “Todos os meus procedimentos são mordidinhas que minha cabeça consegue digerir”. Ele ampliou a metáfora através de comentários tais como: “Eu costumava me atrapalhar com meus programas. Agora, eu só mordo o que posso mastigar”. Ele encontrou uma idéia poderosa: é possível construir um grande sistema intelectual sem nunca dar passos que não possam ser compreendidos. E construir com uma estrutura hierár-

quica possibilita entender o sistema como um todo, ou seja, ver o sistema "com uma visão de cima".

Keith, o autor do programa *HOMEM*, não-estruturado, tinha sido exposto à idéia de subprocedimentos mas havia resistido a ela. A forma "linear" do programa correspondia mais à maneira como ele costumava fazer as coisas. Ele não havia sentido a necessidade premente de utilizar a programação estruturada até o dia em que não conseguiu corrigir seu programa *HOMEM*. Nos ambientes *LOGO*, vimos isso acontecer inúmeras vezes. Quando uma criança nesta situação pergunta o que deve fazer, geralmente basta dizer: "Você sabe o que fazer!" Frequentemente a criança responde (às vezes triunfante, às vezes envergonhada): "Acho que deveria transformar tudo em subprocedimentos". A "maneira correta" não foi imposta a Keith; o computador deu-lhe flexibilidade e poder suficientes para que sua exploração fosse genuína e pessoal.

Esses dois estilos de abordagem do planejamento e da execução de um projeto são muito difundidos. Podem ser vistos na observação de diferentes estilos de aprendizagem de habilidades tanto "físicas" quanto "intelectuais". Consideremos, por exemplo, o caso de dois alunos de 5ª série que aprenderam atividades físicas e programação em nosso laboratório de aprendizagem:

Michael é uma criança atlética, forte, a seu próprio modo de ver, um "valentão"; Paul é mais introvertido, estudioso, de constituição mais delicada. Michael vai mal na escola, Paul é bom aluno; assim, quando Paul "deslanchou" no trabalho com o computador, progredindo rapidamente em programação estruturada de procedimentos bem complexos, nenhum dos dois se surpreendeu. Depois de várias semanas, Michael só conseguia escrever programas de maneira linear. Não havia dúvida de que ele dominava todos os conceitos necessários para escrever programas mais elaborados; mas ele ficou para trás devido à uma resistência clássica e poderosa a usar subprocedimentos.

Nesse mesmo período, os dois começaram a brincar com "pernas-de-pau". A estratégia de Michael foi estabelecer na sua mente um modelo, de forma sequencial: "Pé na barra, levantar-se, pé na outra barra, primeiro pé adiante..." Quando as primeiras tentativas resultaram em tombos, ele recomeçou intrépido, confiante que em algum momento ele conseguiria andar, o que de fato aconteceu. Mas, para surpresa de ambos, Paul atingiu isto primeiro.

A estratégia de Paul era diferente. Ele começou da mesma maneira mas, quando viu que não estava tendo nenhum progresso, tentou isolar e corrigir a parte do processo que estava causando problemas: o *bug*. Quando se dá um passo à frente, a tendência é deixar uma das pernas-de-pau para trás. Esse *bug*, uma vez identificado, é facilmente erradicado. Um bom "truque" é pensar em dar o passo com a perna-de-pau em vez do pé, e deixá-la "levar" o pé. Isto se consegue levantando-a com o braço, contra o pé. A analogia com sua abordagem de programação estava tão aparente para Paul, que poderia até ser um caso de "transferência" da atividade de programação ao aprendizado de uma habilidade física.

Na verdade, é mais provável que ambas as situações estivessem baseadas em características bem definidas do seu estilo cognitivo. Mas a experiência com *LOGO* possibilitou que Paul articulasse esses aspectos de seu estilo. A relação entre programar e andar com pernas-de-pau foi ainda mais clara no caso de Michael. Foi somente através dessa analogia que ele veio a reconhecer explicitamente a diferença entre seu estilo e o de Paul, no fato de andar com pernas-de-pau. Em outras palavras, a experiência em programação ajudou ambos a terem uma melhor percepção de suas próprias ações, uma visão mais articulada de si próprios.

O aspecto genérico da idéia de programação estruturada como um princípio matético, ou seja, como uma contribuição à aprendizagem, ficará mais evidente com o próximo exemplo, que descreve o processo envolvido no aprendizado de outra atividade física — o malabarismo manual. Nossa escolha não foi aleatória. O círculo da Tartaruga foi um bom meio de aprender matemática usando o próprio corpo. O malabarismo manual também parece ser um bom meio de aprender uma habilidade corporal "usando a matemática". É claro que o quadro é ainda mais complicado e também mais interessante, porque em ambos os casos o processo funciona em ambas as direções, da metáfora computacional à linguagem corporal e vice-versa. Ao passar pela experiência da geometria da Tartaruga, as crianças apuram as visões dos seus corpos e de seus movimentos físicos assim como suas compreensões de geometria formal. E as idéias teóricas sobre programação estruturada, quando expressas em termos de malabarismo — em termos realmente físicos e corporais — adquirem aspectos mais concretos e poderosos. Em ambos os casos, o conhecimento passa a englobar uma quantidade que caracterizamos como "sintônico".

Há vários tipos diferentes de malabarismos manuais. Quando as pessoas pensam em malabarismo, elas pensam em um procedimento que é chamado "malabarismo circular". Neste malabarismo, as bolas se movem uma após a outra, em "círculo", passando da esquerda para a direita no topo e da direita para a esquerda em baixo (ou vice-versa). Isso requer dois tipos de lançamentos: um curto, lançamento baixo para passar as bolas de uma mão para a outra na base do "círculo" (próximo às mãos), e um longo, lançamento alto para fazer com que as bolas passem na parte superior do "círculo" (veja a Figura 11).

O malabarismo do tipo "cascata" tem uma estrutura mais simples. As bolas não passam pela base do círculo; elas passam em ambas as direções na parte superior do arco. Nesse caso, há somente um tipo de lançamento: longo e alto (veja Figura 11). Sua simplicidade faz com que este seja uma melhor introdução ao malabarismo, assim como um melhor exemplo de nosso argumento.

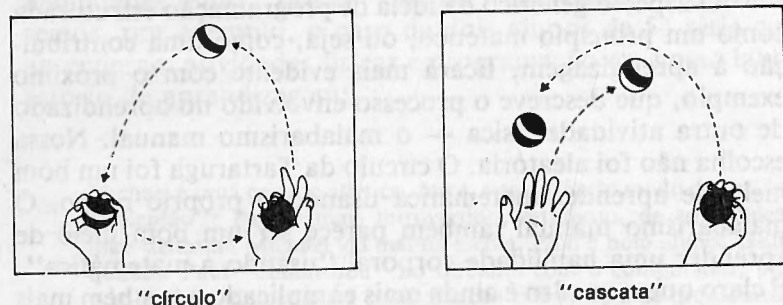


Figura 11
Duas formas de malabarismos

A questão que nos orienta é a seguinte: alguém que queira aprender malabarismo será ou não beneficiado com uma descrição verbal e analítica de como fazê-lo? A resposta é: tudo depende. Depende dos materiais de que a pessoa dispõe para fazer descrições analíticas. Usamos o estilo "cascata" para mostrar como bons modelos computacionais podem ajudar a elaborar bons "procedimentos para pessoas"

que aperfeiçoam o desempenho de habilidades físicas e como a reflexão sobre esses "procedimentos para pessoas" pode nos ajudar a aprender programação e a fazer matemática. Mas, claro, *algumas* descrições verbais poderão mais confundir do que ajudar. Considere, por exemplo, a descrição:

1. Comece com as bolas 1 e 2 na mão esquerda e a bola 3 na mão direita.
2. Atire a bola 1, numa parábola alta, para a mão direita.
3. Quando a bola 1 estiver no vértice da parábola, atire a bola 3 para a mão esquerda numa parábola alta similar, mas fazendo com que sua trajetória (da bola 3) fique sob a da bola 1.
4. Quando a bola 1 chegar à mão direita e a bola 3 estiver no vértice, pegue a bola 1 e atire a bola 2 numa trajetória que passe sob a da bola 3; e assim por diante.

Esta descrição é basicamente um programa linear do tipo força bruta. Não é uma descrição útil ao processo de aprendizagem. As pessoas alheias à cultura computacional poderiam dizer que ela se parece demais com um programa de computador, "simplesmente uma instrução após a outra". Ela é igual a alguns programas, como o primeiro programa *HOMEM* de Keith. Mas nós já vimos que simplesmente alinhar instruções juntas sem uma boa estrutura interna não é tampouco um bom modelo de programas computacionais, e veremos que as técnicas de programação estruturada que *são* boas para escrever programas são também boas como descrições matemáticas de malabarismos.

Nossa meta é criar um procedimento para pessoas: *UM MALABARISMO*. Como primeiro passo para definir esse procedimento, devemos identificar e dar nomes a subprocedimentos que tenham papel análogo ao dos subprocedimentos usados por Keith para desenhar sua figura (*UM VE, UMA CABEÇA, UM TRAÇO*). No caso do malabarismo, um par natural de subprocedimentos é o que chamaremos *LANCE-DIREITA* e *LANCE-ESQUERDA*. Assim como o comando *VE* foi definido funcionalmente pelo fato de que ele faz com que o computador desenhe na tela uma figura em forma de V, o comando *LANCEDIREITA*, dado ao nosso aprendiz de malabarismos, o faria lançar uma bola, que supomos estar em sua mão esquerda, para a mão direita.

Há, no entanto, uma diferença importante entre programar *UM HOMEM* e programar *UM MALABARISMO*.

O programador de UM HOMEM não precisa se preocupar com o elemento tempo, mas, para construir o procedimento para fazer malabarismo, *devemos* nos preocupar com ele. A pessoa deve executar as ações LANCEDIREITA e LANCE-ESQUERDA nos momentos certos, em um ciclo, e as duas ações terão de ocorrer ao mesmo tempo. Já que decidimos incluir as fases “pegar a bola” e “lançar a bola” no mesmo subprocedimento, o nosso LANCEDIREITA deve incluir pegar a bola quando ela chega à mão direita. Da mesma forma, LANCEESQUERDA é um comando para lançar a bola da mão direita para a esquerda e apanhá-la quando ela chegar.³

Já que a maioria das pessoas pode realizar essas ações, assumiremos LANCEDIREITA e LANCEESQUERDA como dadas e nos concentraremos em como elas podem ser combinadas para formar um novo procedimento que chamaremos UM MALABARISMO. Colocá-las juntas é essencialmente diferente da combinação de subprocedimentos UM VE e UMA CABEÇA para fazer o procedimento UM HOMEM. LANCEESQUERDA pode ter que ser iniciado antes que a ação iniciada pelo LANCEDIREITA anterior tenha sido

³ Esses procedimentos introduzem mais uma expansão em nossa imagem de programação. São capazes de funcionar simultaneamente, “em paralelo”. Uma imagem de programação que não consiga incluir essa expansão estará praticamente fora de contato com o mundo moderno da computação. Uma criança restrita à programação seriada está privada de uma fonte de poder prático e conceitual. Essa privação é percebida no momento em que a criança tenta introduzir o movimento num programa.

Suponha, por exemplo, que a criança deseja criar um filme na tela do computador com três objetos que se movem separadamente. A maneira “natural” de fazer isso seria criar um procedimento separado para cada objeto e executar os três. Sistemas “seriados” de computação forçam uma maneira menos lógica de fazer isso. Tipicamente, os movimentos de cada objeto seriam divididos em passos e seria criado um procedimento que executasse um passo de cada movimento em ordem cíclica.

O exemplo mostra duas razões pelas quais um sistema de computadores para crianças deve possibilitar programação paralela ou “processamento múltiplo”. Primeiro, de um ponto de vista instrumental, o processamento múltiplo torna sistemas complexos mais fáceis de serem entendidos e os torna conceitualmente mais claros. Programas seriados desintegram entidades que devem manter sua própria integridade. Segundo, como modelo de aprendizagem, a programação seriada faz algo ainda pior: trai o princípio da modularidade e torna impossível a programação estruturada verdadeira. A criança deve ser capaz de construir cada movimento em separado, experimentá-lo, depurá-lo e saber que ele funcionará (ou quase funcionará) como parte de um sistema maior.

completada. Em linguagem computacional, isso é expresso dizendo que estamos lidando com processos *paralelos*, em oposição aos processos estritamente *seqüenciais* usados para desenhar a figura do homem.

Para descrever a combinação de subprocedimentos, nós introduzimos um novo conceito de programação: o conceito do gênio QUANDO. Ele é exemplificado pela instrução QUANDO FAMINTO COMA. Numa versão LOGO, isso significa que sempre que a condição FAMINTO acontecer, induzirá a ação chamada COMA. A metáfora de um “gênio” exprime a idéia de que o comando cria uma entidade autônoma dentro do sistema do computador, que permanece adormecida até que ocorra um certo tipo de evento e aí, como um gênio, ele desperta para desempenhar sua ação. Para conseguir fazer o malabarismo, usaremos dois desses gênios QUANDO.

Sua definição será algo assim:

QUANDO alguma coisa LANCEESQUERDA
QUANDO alguma coisa LANCEDIREITA

Para aprender os “alguma coisa”, descrevemos duas condições, ou, mais precisamente, dois “estados” identificáveis no sistema que darão início à ação de lançar a bola.

Em um determinado momento no ciclo, as bolas estarão dispostas mais ou menos assim (Figura 12):

O processamento múltiplo requer muito mais recursos computacionais do que simples processamentos seriados. Nenhum dos computadores normalmente encontrados nas escolas e nas casas das pessoas são poderosos o bastante para permiti-lo. Os primeiros sistemas LOGO eram “puramente seriados”. Alguns mais recentes possibilitam algumas formas restritas de processamento múltiplo (tais como o gênio QUANDO descrito mais adiante neste capítulo), elaborados para que se possa programar gráficos dinâmicos, jogos e música. O desenvolvimento de uma linguagem de processamento múltiplo bem menos restritiva é a maior meta das pesquisas do grupo LOGO no MIT, pelo menos no momento em que escrevo este livro. Neste trabalho, nos aproximamos muito das idéias que foram desenvolvidas por Alan Kay para a linguagem SMALLTALK, dos conceitos das linguagens de “ACTOR” de Carl Hervitt e no livro de Minsky-Papert, *Society Theory of Mind*. Mas os problemas técnicos inerentes a tais sistemas não foram ainda completamente entendidos e muito mais pesquisa pode vir a ser necessária antes que haja um consenso sobre a maneira correta (ou o conjunto delas) para se chegar a um sistema de processamento múltiplo realmente bom para crianças.

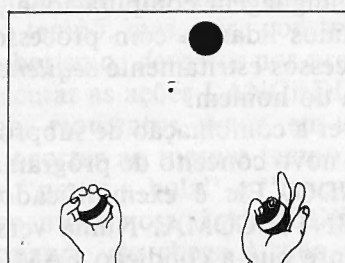
mão
esquerdamão
direita

Figura 12

Esse diagrama do estado do sistema é, todavia, incompleto, uma vez que não consegue mostrar em que direção a bola de cima está se movendo. Para completá-lo, acrescentamos setas para indicar a direção (Figura 13A) e obter duas descrições dos estados (Figura 13B e 13C):

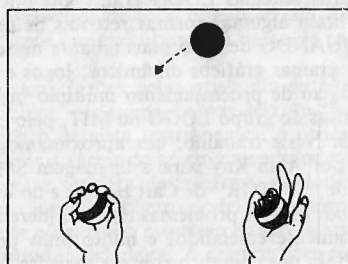


Figura 13A

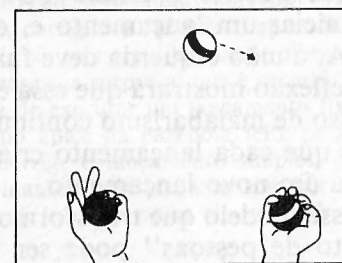


Figura 13B

TOPODIREITA: a bola está no alto, caindo para a direita

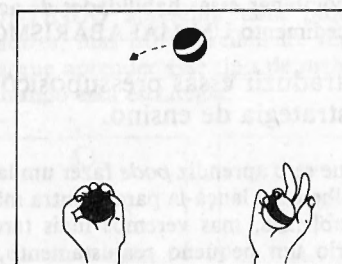


Figura 13C

TOPOESQUERDA: a bola está no alto, caindo para a esquerda.

Se assumirmos, com alguma segurança, que a pessoa pode reconhecer essas duas situações, o seguinte formalismo deveria ser auto-explicativo:

UM MALABARISMO CONTÍNUO
QUANDO TOPODIREITA LANCEDIREITA
QUANDO TOPOESQUERDA LANCEESQUERDA

Ou até mais simplesmente:

UM MALABARISMO CONTÍNUO
QUANDO TOPOX LANCEX

que diz que, quando ocorrer o estado TOPODIREITA, a mão direita deve iniciar um lançamento e, quando ocorrer TOPOESQUERDA, a mão esquerda deve fazer o lançamento. Um pouco de reflexão mostrará que essa é uma descrição completa: o processo de malabarismo continuará de maneira perpétua, uma vez que cada lançamento cria um estado do sistema que dispara um novo lançamento.

Como é que esse modelo que transformou malabarismo num "procedimento de pessoas" pode ser aplicado como uma estratégia de ensino? Primeiro, note que o modelo de malabarismo pressupõe vários pontos:

1. que a pessoa consegue executar LANCEDIREITA e LANCEESQUERDA;
2. que ela pode reconhecer os estados disparados TOPODIREITA e TOPOESQUERDA;
3. que ela pode combinar essas habilidades de acordo com as definições do procedimento UM MALABARISMO CONTÍNUO.

Vamos agora traduzir essas pressuposições e nosso procedimento numa estratégia de ensino.

1º passo. Verifique se o aprendiz *pode* fazer um lançamento. Dê-lhe uma bola e peça-lhe para lançá-la para a outra mão. Isso, em geral, acontece sem problemas, mas veremos mais tarde que frequentemente é necessário um pequeno reajustamento. O procedimento espontâneo tem um *bug*.

2º passo. Verifique se o aprendiz consegue combinar lançamentos. Tente com duas bolas, a partir das seguintes instruções:

UM CRUZAMENTO
LANCEDIREITA
QUANDO TOPODIREITA LANCEESQUERDA
FIM

A intenção aqui é trocar as bolas entre as mãos direita e esquerda. Embora pareça ser uma combinação simples de LANCEESQUERDA e LANCEDIREITA, em geral não funciona imediatamente.

3º passo. Procure *bugs* nos procedimentos dos lançamentos. Porque UM CRUZAMENTO não funciona? Tipicamente, nós descobrimos que a habilidade do aprendiz em lançar as bolas não é tão boa como pareceu no 1º passo. O desvio ou *bug* mais comum no procedimento é para lançar, seguir a bola com os olhos durante o seu lançamento. Uma vez que as pessoas só têm um par de olhos, seguir com eles o primeiro lançamento faz com que o segundo lançamento seja quase impossível, e assim acaba por terminar num desastre, com as bolas caindo no chão.

4º passo. Correção. Assumindo que o *bug* era seguir a primeira bola com os olhos, corrigimos fazendo o aprendiz voltar ao lançamento com uma bola só, sem segui-la com os olhos. A maioria das pessoas descobrem (para sua surpresa) que é necessário muito pouca prática até ser capaz de executar um lançamento fixando os olhos aproximadamente no ápice da parábola feita pela bola em movimento. Quando se corrige o lançamento simples, o aprendiz tenta novamente combinar os dois lançamentos. Na maioria das vezes isso agora funciona, embora possa ainda existir um ou outro *bug* a ser eliminado.

5º passo. Extensão para três bolas. Quando o aprendiz consegue executar, com alguma facilidade, o procedimento CRUZAMENTO, passamos à tentativa com três bolas. Para conseguir isso, comece com duas bolas em uma mão e uma na outra (Figura 14).

A bola 2 é lançada como na execução de CRUZAMENTO, ignorando a bola 1. LANCEDIREITA em CRUZAMENTO deixa as três bolas numa posição tal que possa ser iniciado o MALABARISMO CONTÍNUO. A transição de CRUZAMENTO para MALABARISMO CONTÍNUO apresenta uma pequena dificuldade para alguns aprendizes, mas isto é facilmente superado. A maioria das pessoas consegue aprender esse tipo de malabarismo em menos de meia hora, usando essa estratégia.

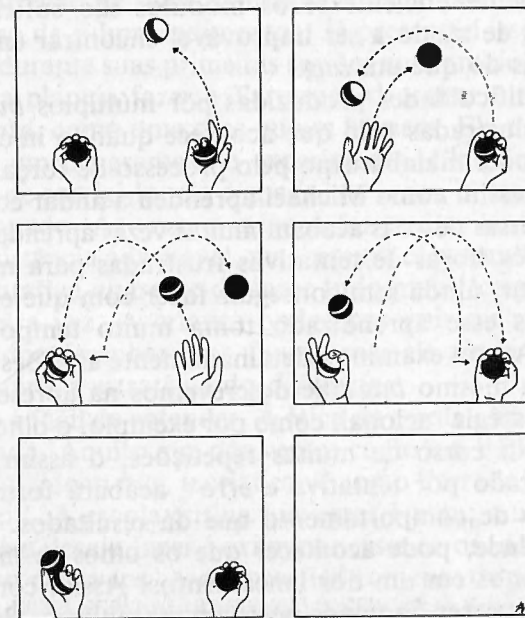


Figura 14
Malabarismo "cascata"

Variações dessa estratégia de ensino foram usadas por muitos professores de LOGO e estudadas em detalhes por um deles, Howard Austin, que desenvolveu a análise desse malabarismo como tópico de sua tese de doutoramento. Não há dúvida de que a estratégia é muito eficiente e há poucas dúvidas quanto ao porquê disso: o uso de conceitos de programação como uma linguagem descritiva facilita o processo de *debugging*.

Em nossa descrição de como desenhar a figura simplificada de um homem e de como aprender um malabarismo manual, um tema importantíssimo foi o de como a correção de *bugs* é facilitada pelo uso de uma descrição apropriada de um processo complexo. Em ambos os casos, a descrição refletia uma representação do processo de forma modular, isto é, separado em unidades naturais, unidades funcionais, e encontrar o *bug* era sempre facilitado pelo fato desse processo estar contido dentro de limites tão estreitos quanto possível. As piores condições para corrigir *bugs* são criadas quando muitos deles ocorrem simultaneamente. O processo de correção é especialmente eficiente se os módulos são suficientemente pequenos de modo a ser improvável encontrar em cada um deles mais do que um *bug*.

As dificuldades produzidas por múltiplos *bugs* podem ser bem ilustradas pelo que acontece quando iniciantes tentam aprender malabarismo pelo processo de força bruta. Na verdade (assim como Michael aprendeu a andar com pernas-de-pau), essas pessoas acabam muitas vezes aprendendo geralmente após horas de tentativas frustradas para manter três bolas no ar, ainda sem conseguir fazer com que elas se cruzam. Mas esse aprendizado toma muito tempo. Quando Howard Austin examinou detalhadamente as ações do aprendiz, viu o mesmo *bug* que descrevemos na apresentação de nossa estratégia racional, como por exemplo, o olho seguindo a bola. No curso de muitas repetições, o assim chamado "aprendizado por tentativa e erro" acabará formando um certo tipo de comportamento que dá resultados. Por mera probabilidade, pode acontecer que os olhos se movam um pouco menos em um dos lançamentos. Assim como outros animais, os seres humanos possuem mecanismos de aprendizagem que são capazes de perceber algo em tais eventos e assim aumentar a probabilidade de que eles ocorram de novo.

Eventualmente, os *bugs* são eliminados e o sujeito aprende o malabarismo. As pessoas são capazes de aprender como ratos em labirintos. Mas o processo é lento e primitivo. Podemos aprender mais, e mais rapidamente, tendo controle consciente do processo de aprendizagem, e articulando e analisando nosso comportamento.

O fato de que procedimentos computacionais favorecem o aprendizado não significa que todos os processos repetitivos podem ser magicamente removidos da aprendizagem, ou que o tempo necessário para aprender malabarismos pode ser reduzido a quase nada. Sempre leva tempo para se identificar e eliminar *bugs*. Sempre leva tempo para se aprender habilidades necessárias. O que pode ser eliminado são os métodos ineficientes e cheios de desperdícios. Aprender malabarismos para conseguir manter três bolas em movimento toma muitas horas se o aprendiz seguir uma estratégia inadequada. Se uma boa estratégia for adotada, o tempo pode ser reduzido, não passando às vezes de vinte ou trinta minutos.

As crianças desenvolvem, muitas vezes, uma "resistência" à correção de *bugs*, semelhante à que já vimos em relação ao uso de subprocedimentos. Já presenciei isso em várias crianças durante suas primeiras sessões num ambiente LOGO. A criança planeja fazer a Tartaruga desenhar uma determinada figura, como uma casa ou um homem. Ela escreve rapidamente um programa e o experimenta. Ele não funciona. Ao invés de corrigi-lo, ela o apaga. Às vezes, o projeto inteiro é abandonado. Às vezes a criança faz muitas tentativas com uma persistência admirável, mas sempre começando do nada, numa tentativa aparente de fazer tudo mais "corretamente" na primeira vez. A criança pode conseguir ou não fazer o computador desenhar uma figura, mas ela ainda não conseguiu adquirir a estratégia do *debugging*.

Isto é fácil de entender. A ética da escola está muito bem impregnada. Aquilo que nós vemos como um bom programa com um pequeno *bug*, a criança vê como "errado", "ruim", "um erro". A escola ensina que errar é mau; a última coisa que alguém deseja fazer é examinar esses erros, deter-se neles ou mesmo pensá-los. A criança fica contente de poder usar a capacidade do computador para apagar esses erros sem deixar vestígios para que ninguém os veja. A filosofia do *debugging* sugere uma atitude oposta. Os erros são benéficos porque nos

levam a estudar o que aconteceu, a entender o que aconteceu de errado, e, através do entendimento, a corrigi-los. A experiência com a programação do computador leva as crianças a “acreditar” no *debugging* de maneira mais efetiva do que qualquer outra atividade.

O contato com ambientes LOGO vai gradativamente minando resistências fortemente arraigadas em relação à utilização de *debugging* e subprocedimentos. Algumas pessoas que observam a crescente tolerância das crianças em relação aos seus “erros” atribuem tal mudança de atitude aos professores que ensinam com LOGO, que são realistas e não críticos na presença de programas que a criança vê como “errados”. Acredito que haja algo ainda mais fundamental acontecendo. Num ambiente LOGO, as crianças aprendem que o professor também é um aprendiz, e que *todos* aprendem a partir dos erros.

Um grupo de doze alunos de 5ª série tivera várias horas de contato semanal com LOGO desde o início do semestre, em setembro. No começo de dezembro, o grupo decidiu realizar um projeto coletivo. Uma Tartaruga mecânica seria programada para escrever “Feliz Natal” em grandes folhas de papel que seriam penduradas nos corredores da escola. Um projeto ideal. As letras foram divididas entre os membros do grupo. Cada um escreveria programas para duas ou três letras, para desenhos decorativos, e para mensagens inteiras, usando os programas das letras como subprocedimentos.

Mas tempestades de neve e outros contratemplos atrasaram o trabalho; e quando chegou a última semana de aula, os cartazes ainda não tinham sido feitos. A instrutora a cargo do grupo decidiu então infringir uma das regras e fazer ela mesma alguns dos programas. Ela trabalhou em casa, sem usar uma Tartaruga, e então no dia seguinte ela tinha uma coleção de programas que não tinham sido testados. Ela e as crianças iriam testá-los juntos. A instrutora e uma das crianças estavam no chão observando a Tartaruga desenhar o que deveria ser um N, mas a “perninha” da letra ficou fora do lugar. Onde estaria o *bug*? Enquanto eles estavam decifrando o problema juntos, o aluno teve uma revelação: “Quer dizer”, ele disse, “que você realmente não sabe como corrigir o programa?” A criança ainda não sabia como dizê-lo, mas o que lhe fora revelado era que ela e a instrutora estavam junta-

mente envolvidas num projeto de pesquisa. O incidente é pungente. Refere-se a todas as vezes que essa criança entrou no jogo dos professores do “vamos fazer isso juntos”, sempre sabendo de antemão que a colaboração era uma ficção. A descoberta não pode ser preparada; a invenção não pode ser planejada.

Nas salas de aula tradicionais, os professores tentam trabalhar em colaboração com a criança, mas, em geral, o material em si mesmo não gera espontaneamente problemas a serem pesquisados. Um adulto e uma criança podem genuinamente colaborar num projeto de aritmética elementar? Uma das características importantes do trabalho com o computador é que professor e aluno podem engajar-se numa verdadeira colaboração intelectual; juntos, podem tentar fazer com que o computador execute isto ou aquilo, e entender que ele realmente faz. Situações novas que nem o professor nem o aluno viram antes ocorrem freqüentemente e assim o professor não tem que fingir que não sabe. Compartilhar o problema e a experiência de resolvê-lo permite à criança aprender com um adulto, não “fazendo o que o professor diz”, mas “fazendo o que o professor faz”. E uma das coisas que o professor faz é persistir num problema até que ele tenha sido completamente entendido. O ambiente LOGO é especial porque fornece inúmeros problemas que crianças do 1º grau escolar podem entender com um nível de completude que raramente acontece na vida cotidiana. Para avaliar esse aspecto mais profundamente, pode ser útil pensar novamente nos exemplos de *debugging* discutidos anteriormente.

Os programas discutidos foram:

UMA CASA
QUADRADO
TRIÂNGULO
FIM

UM QUADRADO
REPITA 4 (PARAFRENTE 100 DIREITA 90)
FIM

UM TRIÂNGULO
REPITA 3 (PARAFRENTE 100 DIREITA 120)
FIM

Esse programa, no entanto, tem um *bug*; ele desenha o

triângulo dentro do quadrado, ao invés de sobre o quadrado. Por quê? Isto pode parecer misterioso, à primeira vista, para uma criança. Mas pode-se imaginar “por que a Tartaruga fez aquela coisa idiota” se seguirmos um conselho bem conhecido de heurística: brinque de Tartaruga. Faça-o você mesmo, mas finja ser tão ingênuo como a Tartaruga. Descobrir por que a Tartaruga cometeu este engano sugere quase que imediatamente uma maneira de corrigi-lo. Por exemplo, alguns podem dizer: “A Tartaruga virou-se *para dentro* do quadrado porque TRIÂNGULO comanda que ela vire PARADIREITA”. A cura (uma dentre outras igualmente simples) é inerente a este diagnóstico: faça um procedimento para o triângulo com giros para a esquerda.

Da mesma maneira, um adulto pensando que poderia fazer um triângulo com REPITA 3 (PARAFRENTE 100 PARADIREITA 60) ficaria espantado ao ver aparecer um hexágono. Mas é possível “entrar” dentro do programa e verificar por que isso acontece. Mais ainda, é possível realizar uma introspecção e verificar que o *bug* partiu de uma compreensão superficial de uma das mais comuns afirmações sobre o teorema euclidiano do triângulo: “A soma dos ângulos de um triângulo é 180 graus”.

Uma criança (e talvez a maioria dos adultos) vive num mundo em que tudo só é entendido parcialmente: talvez o suficiente, mas nunca completamente. Para muitos, entender a ação da Tartaruga tão completamente, de tal modo que não haja mais para se dizer sobre ela, é uma experiência rara, possivelmente única. Para alguns, é regozijante: podemos ver isto na alegria e na vivacidade das crianças quando nos explicam o que entenderam. Para todos, é o modelo melhor de clareza do conhecimento analítico jamais encontrado.

O leitor pode aqui objetar que, longe de entender “completamente” a Tartaruga, uma criança que programa não entende praticamente nada a respeito dos complexos mecanismos que trabalham “por trás da cena” quando uma Tartaruga executa algum comando LOGO. Estaremos de fato diante do perigo de mistificar as crianças ao colocá-las num ambiente de sofisticada tecnologia, cujas complexidades são só parcialmente entendidas pelos cientistas avançados de computação?

Essas preocupações nos levam de volta às questões com

as quais iniciei este capítulo. Por exemplo, eu propus a descrição do malabarismo manual sob a forma de um programa simples. Mas a mesma preocupação pode ser levantada: será que a descrição numa linguagem de procedimentos atinge a essência do processo do malabarismo, ou será que ela mistifica, encobrindo as complexidades do malabarismo?

Essas questões são muito genéricas e se referem a tópicos fundamentais do método científico. Newton “compreendeu” o universo reduzindo planetas inteiros a pontos que se movem de acordo com um conjunto definido de leis do movimento. Isso atinge a essência do mundo real ou encobre suas complexidades? Uma parte do que significa ser capaz de pensar como um cientista é ter uma compreensão intuitiva desses assuntos epistemológicos e eu acredito que trabalhando com a Tartaruga as crianças podem ter a oportunidade de conhecê-los.

Na verdade, é fácil para as crianças entender como a Tartaruga define um mundo *auto-suficiente*, em que certas questões são relevantes e outras não. O próximo capítulo discute como essa idéia pode ser desenvolvida construindo-se muitos desses “micromundos”, cada um com seu próprio grupo de suposições e restrições. As crianças aprendem o que é explorar as propriedades de um determinado micromundo que não sofre a perturbação de questões externas. Ao fazê-lo, elas aprendem a transferir hábitos de exploração de sua vida pessoal ao domínio formal da construção de teorias científicas.

A inteligibilidade interna dos mundos dos computadores oferece às crianças a oportunidade de desenvolver projetos de complexidade maior do que é usualmente possível no mundo físico. Muitas crianças imaginam estruturas complexas que elas poderiam construir com blocos ou têm fantasias de como poderiam organizar seus amigos em complexos empreendimentos. Mas quando elas tentam realizar tais projetos, descobrem logo as limitações ininteligíveis da matéria e das pessoas. Uma vez que programas de computação podem, em princípio, ser feitos para se comportarem exatamente da maneira como são previstos, eles podem ser combinados com maior segurança em sistemas complexos. Assim, as crianças são capazes de adquirir um sentimento em relação ao conceito de complexidade.

A ciência moderna e a engenharia, até recentemente, têm criado a oportunidade para se realizar projetos com um grau de complexidade dificilmente imaginável. Mas a ciência nos ensina o poder da simplicidade também e eu termino esse capítulo com o que penso ser uma história comovente de uma criança que aprendeu algo sobre isso numa experiência particularmente simples, mas pessoalmente importante.

Deborah, uma aluna da 6ª série que tinha problemas de aprendizagem, foi introduzida no mundo das Tartarugas de tela com a demonstração de como elas obedeceriam os comandos **PARAFRENTE**, **PARADIREITA** e **PARAES-QUERDA**. Muitas crianças vêem o fato de que se pode atribuir qualquer número a esses comandos como uma estimulante fonte de poder e uma área de exploração muito interessante. Deborah sentiu-se amedrontada, a mesma reação que ela costumava ter frente a quase tudo que fazia na escola. Em suas primeiras horas de trabalho com a Tartaruga, ela desenvolveu um nível de dependência do instrutor muito conturbado, solicitando constantemente reforço positivo antes de executar qualquer ato exploratório, por menor que fosse. Um fato importante ocorreu quando Deborah decidiu restringir seus comandos para a Tartaruga, criando um micromundo dentro do micromundo dos comandos da Tartaruga. Ela se permitiu somente um comando de rotação: **PARADIREITA 30**. Para girar a Tartaruga 90 graus, ela repetia três vezes **PARADIREITA 30**, e obtinha o efeito de **PARAES-QUERDA 30** repetindo o comando **PARADIREITA 30**, onze vezes. Para um espectador, pode parecer tedioso obter simples efeitos de maneiras tão complicadas. Mas para Deborah foi uma alegria ser capaz de construir seu próprio micromundo e descobrir o quanto ela podia fazer dentro de seus rígidos limites. A partir daí, ela não pediu mais permissão para fazer explorações. E um dia, quando o professor se ofereceu para mostrar-lhe uma "maneira mais simples" para atingir um determinado efeito, ela ouviu pacientemente e disse: "Eu não acho que farei isto desta maneira". E afinal, várias semanas mais tarde, quando estava pronta, ela ousou sair de sua redoma de autoproteção, já então de posse de um novo senso de confiança que se mostrou evidente, não somente em projetos mais ambiciosos com a Tartaruga, como também em seu relacionamento com tudo o mais que ela fez na

escola. Gosto de ver na experiência de Deborah uma pequena recapitulação de como o sucesso de certos pensadores como Copérnico e Galileu permitiu que as pessoas se desvencilhassem de superstições e dependências que não tinham nada a ver com a física. E, em ambos os casos — na história pessoal de Deborah e na história do pensamento ocidental —, o sucesso de uma teoria matemática desempenhou mais do que um papel instrumental: serviu como uma ratificação do poder das idéias e do poder da mente dos homens.

Micromundos: incubadores para o conhecimento

A matética, como tenho definido, é para a aprendizagem o que a heurística é para a solução de problemas: princípios de matética são idéias que iluminam e facilitam o processo de aprendizagem.

Neste capítulo focalizamos dois princípios matéticos importantes, que fazem parte do conhecimento do senso comum da maioria das pessoas, e que estão relacionados com o que fazer quando confrontamos um novo objeto, um passo de dança novo, uma nova idéia, ou uma nova palavra. Primeiro, relacione a novidade a ser aprendida com alguma coisa que você já sabe. Segundo, tome a coisa nova e torne-a sua: faça alguma coisa nova com ela, brinque com ela, construa com ela. Por exemplo, para aprender uma palavra nova, primeiro procuramos uma "raiz" familiar, e depois praticamos usando a palavra numa sentença de nossa própria construção.

Encontramos esse ditado de dois passos, que nos ensina como aprender, em teorias de aprendizagem populares, de senso comum: o procedimento descrito de como se aprende uma palavra nova tem sido passado a gerações de alunos por gerações de pais e professores. E isto também corresponde às

estratégias usadas nos processos iniciais de aprendizagem. Piaget estudou a aprendizagem espontânea em crianças e encontrou esses dois passos: a criança absorve o novo no velho por meio do processo que ele chama de *assimilação*, e a criança constrói seu conhecimento no processo de brincar ativamente com o mesmo.

Mas, freqüentemente há obstáculos nesse processo. O novo conhecimento muitas vezes contradiz o velho, e uma aprendizagem efetiva requer estratégias para lidar com tais conflitos. Algumas vezes as partes conflitantes do conhecimento podem ser reconciliadas, algumas vezes uma ou outra parte deve ser abandonada, e algumas vezes ambas podem ser "conservadas" se mantidas na mente em compartimentos separados. Consideraremos estas estratégias de aprendizagem examinando um caso particular em que uma teoria da física formal entra em conflito agudo com as idéias de física intuitivas ou de senso comum.

Um dos conflitos mais simples surge com o princípio fundamental da física newtoniana: um corpo em movimento continuará a se mover para sempre numa velocidade constante e em linha reta se não for perturbado. Este princípio do "movimento perpétuo" contradiz a experiência baseada no senso comum e, na verdade, velhas teorias de física, como as de Aristóteles.

Suponha que desejamos mover uma mesa. Aplicamos uma força, a mesa se move, e continuamos aplicando força até a mesa atingir a posição desejada. Quando paramos de empurrar, a mesa pára. Em nossa observação superficial, a mesa não se comporta como um objeto newtoniano. Se tal acontecesse, os livros-textos nos afirmam, um empurrão colocaria a mesa em movimento para sempre e seria necessária uma força oposta para fazê-la parar no local desejado.

Este conflito entre a teoria idealizada e a observação cotidiana é apenas um dos obstáculos para a aprendizagem de física newtoniana. Outros obstáculos derivam da dificuldade em se aplicar os dois princípios matéticos. De acordo com o primeiro, a pessoa que quiser aprender física newtoniana deve achar meios para relacioná-la com algo que já conhece. Mas ela pode não possuir nenhum conhecimento com o qual isto pode ser efetivamente relacionado. De acordo com o

segundo princípio, uma boa estratégia seria trabalhar com as leis do movimento de Newton, usá-las de maneira pessoal e lúdica. Mas isto também não é muito simples. Não se pode fazer nada com as leis de Newton a não ser que se tenha algum meio de compreendê-las e ter familiaridade com algum material onde elas possam ser aplicadas.

O tema deste capítulo é sobre como idéias computacionais podem servir como material para pensar as leis de Newton. A idéia central já foi antecipada. Vimos como a geometria formal torna-se mais acessível quando, ao invés do ponto, a Tartaruga é usada como a base. Aqui fazemos para Newton o que já fizemos para Euclides. As leis de Newton são formuladas usando o conceito de “uma partícula”, uma entidade matematicamente abstrata que é semelhante ao ponto por não ter dimensão, mas que possui outras propriedades além de posição: ela tem *massa* e *velocidade* ou, se alguém prefere fundir as duas, ela tem *momentum*.

Neste capítulo estendemos nosso conceito de Tartaruga a fim de incluir tanto as entidades que se comportam como partículas newtonianas como aquelas já introduzidas, que se assemelham aos pontos euclidianos. Essas novas Tartarugas, que chamamos Tartarugas Dinâmicas (DinaTart), são mais dinâmicas no sentido de que seu estudo inclui dois componentes de velocidade além dos dois componentes geométricos, posição e orientação, das Tartarugas geométricas discutidas anteriormente. Esse acréscimo de funções ao estado requer uma linguagem de comando um pouco mais rica: a LINGUAGEM DA TARTARUGA é expandida para permitir que ordenemos que a Tartaruga se mova numa dada velocidade. Esta LINGUAGEM DA TARTARUGA, além da compreensão da física, abre imediatamente muitas perspectivas. A DinaTart pode ser colocada em movimento por razões estéticas, fantasiosas ou de diversão, além da simulação de leis físicas reais ou inventadas. O professor de física de visão estreita poderia ver isto como uma perda de tempo: o importante é entender física. Mas desejo argumentar a favor de uma filosofia diferente de educação de física. Acredito que a aprendizagem da física consiste em colocar o conhecimento de física em contato com o conhecimento pessoal bastante diversificado. E, para que isto aconteça, devemos permitir que o aprendiz construa e trabalhe com sistemas

transitórios que os físicos talvez se recusem a reconhecer como física.¹

A maioria dos currículos de física são semelhantes aos de matemática no sentido de que eles forçam o aprendiz a um padrão dissociado de aprendizagem e adiam o material “interessante” para uma etapa posterior, quando a maioria dos estudantes já perdeu a motivação para aprendê-lo. As idéias poderosas e a estética intelectual da física é perdida na perpétua aprendizagem de “pré-requisitos”. A aprendizagem da física newtoniana pode ser tomada como um exemplo de como as estratégias matemáticas podem ser obstruídas e desobstruídas. Devemos descrever uma nova “seqüência de aprendizagem” para Newton que supera o obstáculo: um ambiente de aprendizagem interativa baseado no computador onde os pré-requisitos estão embutidos no sistema e onde os aprendizes podem tornar-se ativos, arquitetos construtores de sua própria aprendizagem.

Vamos começar com um exame mais detalhado do problema dos pré-requisitos. Alguém interessado em aprender aerodinâmica pode perder o interesse ao constatar o conjunto de pré-requisitos, incluindo mecânica e hidrodinâmica, que acompanham uma descrição empolgante do curso no catálogo da faculdade. Se alguém deseja aprender sobre Shakespeare, não há nenhuma lista de pré-requisitos. Parece justo pressupor que a lista de pré-requisitos é uma expressão do que os educadores acreditam ser a seqüência de aprendizagem num domínio do conhecimento. A seqüência de aprendizagem em aerodinâmica é matemática, e, como vimos em nossa cultura, o conhecimento matemático é truncado, tratado como “especial” — sobre o qual se fala somente em lugares especiais, reservados a esses conhecimentos exotéricos. Os ambientes não acadêmicos de aprendizagem da maioria das crianças fornecem pouco incentivo a esse desenvolvimento da matemática. Isto significa que escolas e universidades devem abordar o ensino de aerodinâmica através de uma seqüência de aprendizagem extremamente formal. O caminho para Shakespeare não é menos complexo, mas seus elementos

¹ O contribuinte mais prolífero para o desenvolvimento de tais sistemas é Andrea diSessa, que é o responsável, entre outras coisas, pelo termo “Dinatart”. H. Abelson e A. diSessa, *Turtle Geometry: Computations as a Medium for Exploring Mathematics* (Cambridge, MIT Press, 1981).

essenciais são parte de nossa cultura geral: pressupõe-se que muita gente será capaz de aprendê-lo informalmente.

O micromundo da física que nós desenvolveremos, análogo à nossa Matelândia baseada no computador, oferece uma sequência de aprendizagem piagetiana para as leis de movimento de Newton; um tópico usualmente considerado paradigmático para o tipo de conhecimento que pode ser alcançado somente através de uma sequência longa e formal. O pensamento newtoniano sobre o movimento é um conjunto complexo e anti-intuitivo de pressupostos acerca do mundo. Historicamente, levou muito tempo para evoluir. E, em termos do desenvolvimento individual, a interação da criança com o seu ambiente a leva a um conjunto de crenças pessoais sobre movimento muito diferente das de Newton, e em muitos aspectos mais próximas das de Aristóteles. Afinal, a idéia aristotélica de movimento corresponde à situação mais comum experienciada por nós. Alunos tentando desenvolver o pensamento newtoniano sobre movimento encontram três tipos de dificuldades, que um micromundo do computador poderia ajudar a superar. Primeiro, os alunos não tiveram quase nenhuma experiência direta com o movimento newtoniano puro. Claro, eles tiveram alguma experiência. Por exemplo, quando um carro derrapa numa estrada com gelo, ele se torna um objeto newtoniano: continuará em seu estado de movimento sem ajuda exterior. Mas o motorista não se encontra num estado de espírito apropriado para se beneficiar dessa situação de aprendizagem. Na ausência de experiências *diretas* e *físicas* com o movimento newtoniano, as escolas são forçadas a dar ao aluno experiências indiretas e altamente matematizadas de objetos newtonianos. Assim, o movimento é aprendido manipulando equações ao invés de objetos. Essa experiência, distante da vivência do aluno, é demasiadamente lenta para mudar suas intuições. E o manuseio de equações exige outros pré-requisitos formais. O estudante deve primeiramente saber como trabalhar com equações antes de usá-las para modelar um mundo newtoniano. O modo mais simples do nosso micromundo computadorizado poder ajudar é colocando o aluno num mundo simulado onde ele tem acesso direto ao movimento newtoniano. Isto pode ser feito enquanto o aluno é bem jovem. Não é necessário esperar que ele domine equações. Muito pelo contrário:

ao invés de fazer o aluno esperar pelas equações, esta simulação pode motivar e facilitar a aquisição de habilidades para manipular equações fornecendo um contexto intuitivamente bem compreendido para o uso delas.

A experiência direta com o movimento newtoniano é um recurso valioso para aprender a física newtoniana. Mas para aprendê-la é necessário mais do que intuição e vivência prática. O estudante necessita de meios para conceituar e “captar” esse mundo. Realmente, a parte central da grande contribuição de Newton foi a invenção de um formalismo, uma matemática apropriada para este fim. Ele chamou-a de “fluxos”; hoje em dia os alunos a chamam de “cálculo diferencial”. Na tela do computador, a DinaTart permite ao iniciante não só brincar com objetos newtonianos, mas o próprio conceito de DinaTart faz o estudante refletir sobre eles. E os programas para comandar o comportamento dessa Tartaruga fornecem um formalismo através do qual podemos ligar idéias que de outra forma nos ficariam muito soltas. Ao fazer isso, contorna-se o longo caminho (aritmética, álgebra, trigonometria, cálculo) para o formalismo, que sofreu somente algumas modificações superficiais ao passar dos escritos de Newton para os livros-textos modernos. E eu acredito que coloca o estudante mais próximo do que Newton deveria ter pensado antes de começar a escrever equações.

O terceiro pré-requisito é ligeiramente mais sutil. Deveremos logo mais examinar diretamente as proposições conhecidas em geral como as leis do movimento de Newton. À medida que fazemos isto muitos leitores certamente recordarão um sentimento de apreensão, evocado pela frase “lei do movimento”. Que espécie de coisa é essa? Que outras leis de movimento existem além das de Newton? Poucos alunos podem responder a essas perguntas quando encontram Newton pela primeira vez, e creio que isto contribui para explicar a dificuldade da maioria dos aprendizes em física. Os alunos não podem se apropriar de algo sem saber o que é esse algo. Portanto, o terceiro pré-requisito é que devemos achar meios para facilitar a apropriação de modo pessoal não apenas do movimento newtoniano e das leis que o descrevem, mas da noção geral de leis que descrevem o movimento. Fazemos isso ao projetar uma série de micromundos.

O Mundo da Tartaruga era um micromundo, um “lu-

gar", uma "província da Matelândia", onde certos tipos de pensamentos matemáticos poderiam brotar e se desenvolver com extrema facilidade. O micromundo era uma incubadora. Projetaremos agora um micromundo para servir como uma incubadora para a física newtoniana. O projeto do micromundo o fez um "lugar de crescimento" para espécies específicas de idéias poderosas ou estruturas intelectuais. Assim, nós projetamos micromundos que exemplificam não apenas as idéias "corretas" de Newton, mas também muitas outras: as de Aristóteles, importantes dos pontos de vista histórico e psicológico, as idéias mais complexas de Einstein, e até mesmo uma "lei generalizada do mundo do movimento", que age como um modelo para uma variedade infinita de leis do movimento que os indivíduos podem inventar por si mesmos. Desse modo, os aprendizes podem progredir de Aristóteles até Newton e mesmo até Einstein através de tantos mundos intermediários quanto eles desejarem. Na descrição a seguir os obstáculos matemáticos à compreensão de Newton são superados: os pré-requisitos estão baseados no conhecimento pessoal e o aprendiz é envolvido numa exploração criativa das idéias e da variedade de leis do movimento.

Vamos começar a descrever os micromundos pela definição das três leis de Newton, apresentadas aqui "formalmente" e numa forma que os leitores não têm que entender em detalhe:

1. Cada partícula continua em seu estado de repouso ou de movimento com velocidade constante numa linha reta a não ser que seja compelida a mudar aquele estado por uma força.
2. A força resultante (F) que produz a mudança do movimento é igual ao produto da massa (m) pela aceleração (a) da partícula: $F = ma$.
3. Todas as forças surgem da interação de partículas, e sempre que uma partícula age sobre a outra há uma reação igual e no sentido contrário agindo sobre a primeira.

Como tínhamos observado, o acesso das crianças à essas leis é bloqueado não apenas pela linguagem misteriosa em que elas são apresentadas. Analisaremos esses bloqueios a fim de inferir os critérios utilizados para o projeto dos nossos micromundos. O primeiro bloqueio é que as crianças não conhecem nada que se assemelhe a essas leis. Antes de se tor-

narem receptivas às leis de Newton, elas deveriam conhecer outras leis de movimento. Deveria haver um primeiro exemplo de leis de movimento, mas certamente elas não deveriam ser tão complexas, sutis e contra-intuitivas como as leis de Newton. O mais sensato é deixar o aprendiz adquirir o conceito de lei de movimento trabalhando com um exemplo muito simples e acessível de uma lei de movimento. Este será o nosso primeiro critério de projeto para o nosso micromundo. O segundo bloqueio é que as leis, como apresentadas, não oferecem pontos de apoio para o aprendiz desejoso de manipulá-las. Não existe nenhuma outra aplicação em que elas podem ser utilizadas a não ser para resolver os exercícios do fim do capítulo dos livros-textos. E, portanto, um segundo critério de projeto para os nossos micromundos é a possibilidade de desenvolver jogos, atividades, artes, etc., que tornem relevante o trabalho nos micromundos. O terceiro bloqueio é o fato de que as leis de Newton usam uma série de conceitos que não fazem parte da experiência da maioria das pessoas, o conceito de "estado", por exemplo. Nosso micromundo será projetado de tal forma que todos os conceitos necessários possam ser definidos dentro da experiência desse mundo.

Como no caso da Tartaruga geométrica, a Tartaruga física é um ser interativo que pode ser manipulado pelo aprendiz, fornecendo um ambiente para aprendizagem ativa. Mas a aprendizagem não é "ativa" apenas por ser interativa. Aprendizes num micromundo físico são capazes de inventar seus próprios conjuntos de suposições sobre esse micromundo e suas leis, e são capazes de torná-los reais. Eles podem moldar a realidade em que irão trabalhar hoje, podem modificar e construir alternativas. Esta é uma maneira eficiente de aprender, fazer um paralelo com a maneira como cada um de nós realizou algumas de nossas mais eficientes aprendizagens no passado. Piaget demonstrou que a criança aprende idéias matemáticas fundamentais construindo primeiro a sua própria — e muito diferente — matemática, como por exemplo, a pré-conservacionista. E a criança aprende a língua aprendendo primeiro seu próprio dialeto ("fala de bebê"). Assim, quando imaginamos os micromundos como incubadoras de idéias poderosas, estamos tentando imitar essa estratégia eficiente. Possibilitamos que os aprendizes aprendam a física

“oficial” dando-lhes a liberdade para inventar muitas leis que funcionarão nestes tantos mundos inventados.

Seguindo o princípio de Polya de entender o novo associando-o com o velho, vamos reinterpretar o micromundo da geometria da Tartaruga como sendo um micromundo de um tipo de física especial. Remodelaremos as leis que governam a Tartaruga a fim de fazer uma analogia com as de Newton. Isto nos dá as seguintes “leis de movimento da Tartaruga”. Evidentemente, num mundo com apenas uma Tartaruga, a terceira lei, que governa a interação de partículas, não terá uma lei análoga.

1. Toda Tartaruga permanece em seu estado de repouso até ser obrigada por um COMANDO a mudar aquele estado.
2. a) O valor de entrada no comando PARAFRENTE é igual à mudança da parte POSIÇÃO do estado da Tartaruga.
b) O valor de entrada no comando PARADIREITA é igual à mudança da parte ORIENTAÇÃO do seu estado.

O que ganhamos, com este exercício, em compreensão da física newtoniana?

Como os estudantes que conhecem geometria da Tartaruga (e portanto reconhecem seus pressupostos nas leis de movimento da Tartaruga) podem ver agora as leis de Newton? Eles estão em condição de formular de modo intuitivo e qualitativo a essência dessas duas primeiras leis comparando-as com algo que já conhecem. Eles conhecem estado e operadores de mudanças de estado. No mundo da Tartaruga, há um operador de mudança de estado para cada um dos dois componentes do estado. O operador PARAFRENTE muda a posição. O operador PARADIREITA muda a orientação. Em física, há apenas um operador de mudança de estado, chamado *força*. O efeito da força é mudar a velocidade (ou, mais precisamente, o momento). A posição muda por si própria.

Esses contrastes levam o aluno a uma compreensão qualitativa de Newton. Embora permaneça uma diferença entre as leis da Tartaruga e as do movimento newtoniano, as crianças podem apreciar estas pela compreensão das primeiras. E dão um grande passo à frente na aprendizagem de física. Mas podemos fazer mais para diminuir a diferença entre os mundos de Newton e da Tartaruga. Podemos projetar outros

micromundos nos quais as leis de movimento se aproximam ainda mais da situação newtoniana.

Para fazermos isso criamos uma classe de micromundos de Tartaruga que diferem em relação às propriedades que constituem o seu estado e em relação aos operadores que modificam esse estado. Descrevemos formalmente a Tartaruga geométrica dizendo que seu estado consiste de posição e orientação e que os operadores de mudança de estado agem independentemente desses dois componentes. Mas há outra maneira, talvez mais poderosa e intuitiva de se pensar isso. É ver a Tartaruga como um ser que “entende” certos tipos de comunicação e não entende outros. Assim, a Tartaruga geométrica entendia o comando para mudar sua posição conservando sua orientação e mudar sua orientação conservando sua posição. No mesmo espírito, poderíamos definir a Tartaruga newtoniana como sendo um ser que pode aceitar apenas um tipo de ordem, uma ordem que mudará seu momento. Esses tipos de descrições são usados na realidade para introduzir as crianças nos micromundos. Agora, vamos falar de outras duas Tartarugas, que ocupam posições intermediárias entre as Tartarugas geométrica e newtoniana.

TARTARUGAS DE VELOCIDADE

O estado desta Tartaruga é POSIÇÃO e VELOCIDADE. De fato, desde que a velocidade é definida como mudança de posição, por definição o primeiro componente deste estado está continuamente mudando (a menos que a VELOCIDADE seja zero). Assim, para controlar uma Tartaruga de velocidade, temos apenas que dizer que velocidade adotar. Fazemos isso através de um operador de mudança de estado, um comando chamado *FIXEVELOCIDADE*.

TARTARUGAS DE ACELERAÇÃO

Outra Tartaruga, intermediária entre a geométrica e a que poderia representar uma partícula newtoniana, é a de aceleração. Aqui, também, o estado é definido por sua posição e velocidade. Mas, desta vez a Tartaruga não pode entender um comando como “Assuma tal velocidade”. Pode apenas entender instruções da forma “Mude sua velocidade de

X, qualquer que seja ela". Essa Tartaruga se comporta como uma partícula newtoniana com uma massa fixa.

Portanto, a sequência de tartarugas — da geométrica para a de velocidade, para a de aceleração, e para a newtoniana — constitui um caminho para Newton que é consoante aos nossos dois princípios matéticos. Cada passo se apóia no anterior de modo claro e transparente, satisfazendo o princípio dos pré-requisitos. E, em relação ao nosso segundo princípio matético — "use-o e brinque com ele" —, o caso é ainda mais dramático. Piaget nos mostrou como a criança constrói, a partir de materiais (táteis, visuais e cinéticos) do seu ambiente, um mundo primeiro pré-conservacionista e, depois, conservacionista. Mas, até o aparecimento do computador, havia no ambiente apenas alguns materiais muito pobres para a construção do mundo newtoniano. Entretanto, cada um desses micromundos que nós descrevemos pode funcionar como um ambiente explorável e manipulável.

Na geometria da Tartaruga, a geometria era ensinada através de projetos gráficos de computador que produzem efeitos como os desenhos ilustrados neste livro. Cada nova idéia na geometria da Tartaruga abria novas possibilidades de ação e podia portanto ser vivenciada como uma fonte de poder pessoal. Com os novos comandos, como **FIXEVELOCIDADE** e **MUDEVELOCIDADE**, o aprendiz pode colocar coisas em movimento e produzir figuras que mudam continuamente de forma e de tamanho. Agora ele tem ainda mais poder pessoal e uma sensação de "possuir" dinâmica. Ele pode fazer animação por computador — há uma relação nova e pessoal com o que ele vê na televisão e nos jogos eletrônicos. Os efeitos visuais dinâmicos de um *show* de TV, de um desenho animado, ou de um *video game* agora o encorajam a perguntar como ele poderia fazer o que vê. Esta pergunta é um tipo diferente de questão a que os alunos tradicionalmente respondem num "laboratório de ciências". No laboratório pedagógico tradicional a tarefa proposta à criança é a de estabelecer uma dada verdade. Na melhor das hipóteses, as crianças aprendem que "esta é a maneira como o mundo funciona". Nesses micromundos dinâmicos da Tartaruga eles chegam a um tipo diferente de compreensão — uma sensibilidade do *por que* o mundo funciona como tal. Através do experimento com muitas diferentes leis de movimento, as

crianças concluirão que de fato as de Newton são as mais econômicas e elegantes para mover objetos.

Até aqui nossa discussão girou em torno das duas primeiras leis de Newton. Que analogia à terceira lei é possível no mundo da Tartaruga? Essa lei só tem significado num micromundo com entidades interativas — partículas para Newton, Tartarugas para nós. Vamos assumir, então, um micromundo com várias tartarugas chamadas Tartaruga 1, Tartaruga 2, etc. Podemos usar a **LINGUAGEM DA TARTARUGA** para nos comunicarmos com várias tartarugas se dermos a cada uma delas um nome. Assim, podemos usar comandos do tipo: **DIGA A TARTARUGA 4 FIXEVELOCIDADE 20** (com o sentido de "Diga à Tartaruga número 4 para assumir a velocidade 20").

A terceira lei de Newton expressa um modelo de universo, uma maneira de conceituar o funcionamento da realidade física, como uma máquina autoperpétua. Nessa visão do universo, todas as ações são governadas por partículas exercendo força uma sobre a outra, sem intervenção de um agente exterior. A fim de modelar isso num micromundo, necessitamos de várias Tartarugas interagindo entre si. Aqui desenvolveremos dois modelos para pensar sobre tartarugas interagindo: Tartarugas conectadas e DinaTart conectadas.

No primeiro modelo concebemos as Tartarugas dando comandos *umas às outras* ao invés de obedecer a comandos externos. São as *Tartarugas conectadas*. Claro, as Tartarugas podem ser conectadas de várias maneiras. Podemos fazer Tartarugas que simulam diretamente partículas newtonianas, conectadas por gravidade simulada. Isto é feito comumente no laboratório LOGO, onde tópicos de física colegial, geralmente considerados difíceis, são traduzidos numa forma acessível a alunos de segundo grau. Essas simulações podem servir como um trampolim para uma compreensão elementar da mecânica newtoniana, para uma compreensão do movimento dos planetas e do controle das naves espaciais. Elas fazem isso tornando o trabalho com os princípios newtonianos um processo ativo e pessoalmente envolvente. Mas para "adquirir" as idéias de partículas interagindo — ou "tartarugas conectadas" — o aprendiz necessita fazer mais. Nunca é suficiente trabalhar dentro de um dado conjunto de interações. O aprendiz precisa conhecer mais de um exemplo das

leis de interação e deveria ter a experiência de inventar algumas novas. Quais são os outros exemplos de Tartarugas conectadas?

O primeiro é um micromundo de Tartarugas conectadas chamado "Tartarugas especulares". Começamos com este micromundo contendo duas Tartarugas conectadas pelas regras: sempre que uma receber um comando PARAFRENTE (ou PARATRÁS), a outra faz o mesmo; sempre que uma receber um comando PARADIREITA (ou PARAESQUERDA) a outra faz o oposto. Isto significa que se as duas tartarugas estiverem inicialmente uma apontando para a outra, qualquer programa fará que o passeio de uma seja a imagem especular da outra. Uma vez que o aprendiz entende este princípio, ele pode fazer belos desenhos caleidoscópicos.

Um segundo micromundo de Tartarugas conectadas mais próximo da física newtoniana aplica essa conexão especular às Tartarugas dinâmicas (ou, mais especificamente, de velocidade). Nenhuma imagem estática impressa nesta página poderia exprimir a excitação visual desses caleidoscópios dinâmicos onde pontos de luzes, em cores vivas, dançam produzindo formas em constante mudança. O produto final tem o fascínio da arte, mas o processo de sua elaboração envolve aprender a pensar em termos das ações e reações de objetos conectados em movimento.

Esses micromundos de Tartarugas conectadas consolidam a experiência do aprendiz com as três leis de movimento. Mas afirmamos que micromundos múltiplos também fornecem uma base para a compreensão da *idéia* de lei de movimento. Um aluno que tenha dominado o conceito geral dessa lei tem uma nova e poderosa ferramenta para a solução de problemas. Ilustraremos com o Problema do Macaco:

Um macaco e uma pedra estão presos a pontas opostas de uma corda suspensa por uma roldana. O macaco e a pedra têm o mesmo peso e portanto se equilibram. O macaco começa a subir pela corda. O que acontece com a pedra?

Tenho apresentado esse problema a centenas de alunos do MIT, que já tinham passado com sucesso por rigorosas disciplinas introdutórias de física. Mais de três quartos dos que não tinham visto esse problema antes deram respostas

incorretas ou foram incapazes de decidir a forma de resolvê-lo. Alguns pensaram que o macaco, ao subir, não afetaria a posição da pedra porque a massa do macaco continuaria a mesma, estando ele subindo ou não; alguns acharam que a pedra desceria ou por causa da conservação de energia ou por uma analogia com alavancas; alguns adivinharam que a pedra também subiria, mas não sabiam por quê. É claro que é um problema "difícil". Mas isso não significa que seja "complexo". Sugiro que sua dificuldade é explicável pela ausência de algo mais simples. Quando abordam o problema, os alunos se perguntam: "Este é um problema de 'conservação de energia'?" "É um problema de 'braço de alavanca'?" E assim por diante. Eles não se indagam: "É um problema envolvendo 'lei do movimento'?" Eles não pensam em termos dessa categoria. No mundo mental da maioria dos alunos, os conceitos de conservação, energia, braço de alavanca, e assim por diante, tornaram-se poderosas ferramentas que usam para pensar. Elas são poderosas idéias que organizam o pensamento e a solução de problemas. Para um aluno que teve experiência com um micromundo e suas "leis de movimento", este é verdadeiramente um problema de "lei de movimento". Assim, este aluno não estará bloqueado para fazer a pergunta correta acerca do problema do macaco. É um problema de lei de movimento, mas o aluno que só vê essas leis em termos de fórmulas algébricas não chegará nem a formular a pergunta. Para aqueles que fazem a pergunta, a resposta vem facilmente. E uma vez que se pensa no macaco e na pedra como objetos conectados, semelhantes aos que trabalhamos no micromundo da Tartaruga, é óbvio que ambos devam sofrer as mesmas mudanças de estado. Desde que ambos começam com a mesma velocidade, no caso zero, eles devem ter portanto sempre a mesma velocidade. Então, se um sobe, o outro deve subir com a mesma velocidade.²

² A discussão do Problema do Macaco utiliza um modelo computacional. Entretanto, este modelo está bem longe de preencher a noção de computação como programação algorítmica, embutida na maioria das linguagens de programação. A elaboração deste modelo consiste na criação de uma coleção de objetos e no estabelecimento de interações entre eles. Esta imagem da computação, que veio a ser conhecida como programação "orientada para o objeto" ou "passagem de mensagem", foi primeiramente desenvolvida como um método técnico para programas de simulação e implementada como uma linguagem chamada SIMULA. Recentemente atraiu um interesse muito mais amplo e, em particular, tornou-se

Apresentamos os micromundos como uma resposta a um problema pedagógico que emerge da estrutura do conhecimento: o problema dos pré-requisitos. Mas os micromundos são também uma resposta a um outro tipo de problema, que não está embutido no conhecimento mas no indivíduo. O problema tem a ver com encontrar um contexto para a construção de teorias “erradas” (ou melhor, “transitórias”). Todos nós aprendemos ao construir, explorar e formular teorias, mas a maioria das formulações teóricas com que iniciamos resultou em teorias que mais tarde tivemos que abandonar. Como crianças pré-conservacionistas, aprendemos a formular e usar teorias apenas porque nos foi permitido sustentar opiniões “desviantes” sobre quantidades por muitos anos. As crianças não seguem uma trajetória de aprendizagem que vai de uma “posição verdadeira” a uma outra “posição verdadeira” mais avançada. Sua trajetória natural inclui “falsas teorias” que ensinam tanto sobre a formulação de teorias quanto as verdadeiras. Mas na escola as falsas teorias não são mais toleradas.

Nosso sistema educacional rejeita as “falsas teorias” das crianças, rejeitando desse modo a maneira como as crianças realmente aprendem. E também rejeita as descobertas que mostram a importância da trajetória de aprendizagem de teorias falsas. Piaget mostrou que as crianças sustentam falsas teorias como uma parte necessária do processo de aprender a pensar. As teorias não-ortodoxas das crianças pequenas não são deficiências ou falhas do ponto de vista cognitivo, elas servem como meios de flexionar os músculos cognitivos, de desenvolver e trabalhar as habilidades necessárias para teorizações mais ortodoxas. Os educadores distorcem a mensagem de Piaget encarando suas contribuições como revelações de que as crianças sustentam falsas teorias, que eles, como educadores, devem sobrepujar. Isto faz com que “Piaget na escola” sejam um Piaget às avessas — às avessas porque as crianças são alimentadas à força com teorias “corretas” antes de estarem prontas para inventá-las. E às avessas porque o trabalho de Piaget põe em questão a idéia de que a

um foco de atenção da pesquisa em Inteligência Artificial, onde tem sido mais extensamente desenvolvida por Carl Hewitt e seus alunos. Alan Kay tem sido há longo tempo o advogado mais ativo do uso de linguagens “orientadas para o objeto” em educação.

teoria “correta” seja superior como estratégia de aprendizagem.

Alguns leitores talvez tenham dificuldade em encarar a visão de mundo pré-conservacionista da criança como um tipo de formulação teórica. Tomemos outro exemplo. Piaget perguntou a crianças pré-escolares: “O que produz o vento?” Muito poucas disseram “Eu não sei”. A maioria deu suas teorias pessoais, como “As árvores produzem o vento sacudindo seus galhos”. Esta teoria, embora errada, evidencia a existência de uma habilidade altamente desenvolvida para formulação de teorias. Ela pode ser testada com fatos empíricos. Realmente, há uma forte correlação entre a presença de vento e o sacudir dos galhos. E as crianças podem executar um experimento que torne essa conexão casual bastante plausível. Quando elas sacodem as mãos perto do resto, produzem uma brisa facilmente percebida. E podem imaginar esse efeito multiplicado quando o objeto sacudido não é uma pequena mão mas uma árvore gigante a sacudir, e não apenas uma, mas uma porção de árvores gigantes sacudindo. Portanto, as árvores de uma floresta densa devem realmente constituir um potente gerador de eventos.

Que dizemos a uma criança que tenha feito tão bela teoria? A resposta: “É uma grande idéia, Joãozinho, mas a teoria está errada”, constitui uma decepção que convencerá a maioria das crianças que construir suas próprias teorias é fútil. Assim, ao invés de sufocar a criatividade da criança, a solução é criar um ambiente intelectual menos dominado pelo critério de falso e verdadeiro, como acontece na escola.

Vimos que os micromundos são esses ambientes. Assim como os alunos que preferem fazer seus programas usando as Tartarugas newtonianas que interagem segundo a terceira lei, as crianças que fazem uma espiral espetacular num micromundo *não-newtoniano* não estão fora da trajetória para a compreensão de Newton. Todas estão aprendendo o que significa lidar com variáveis, a pensar em termos de razões de qualidades diferentes, a fazer aproximações apropriadas, e assim por diante. Elas aprendem matemática e ciências num ambiente onde falso ou verdadeiro, certo ou errado não são os critérios decisivos.

Como numa boa aula de educação artística, a criança está aprendendo conhecimentos técnicos como um *meio* de

realizar um objetivo criativo e de sua própria escolha. Haverá um produto. E tanto o professor como a criança podem ficar entusiasmados com ele. Na aula de aritmética o prazer que o professor demonstra com a realização da criança é genuíno, mas é difícil imaginar professor e criança compartilhando a alegria de um produto. No ambiente LOGO isso ocorre frequentemente. A espiral feita no micromundo da Tartaruga é uma nova e excitante criação da criança — ela pode até mesmo ter “inventado” a maneira de conectar as Tartarugas, na qual a espiral é baseada.

O genuíno entusiasmo do professor pelo produto é comunicado às crianças, que sabem que estão fazendo algo importante. E, ao contrário da aula de aritmética, onde elas sabem que as somas que estão fazendo são apenas exercícios, aqui elas podem levar seu trabalho a sério. Se elas acabaram de produzir um círculo comandando a Tartaruga para executar uma longa série de pequenos passos à frente e giros à direita, elas estão preparadas para discutir com um professor que o círculo é realmente um polígono. Ninguém que tenha ouvido essa discussão numa aula de LOGO com alunos de 5ª série sai da sala sem ficar impressionado com a idéia de que a verdade ou a falsidade da teoria é secundária ao que ela contribui para a aprendizagem.

Idéias poderosas dosadas na medida da mente

“Eu amo seus micromundos, mas isso é física? Não digo que não seja. Mas como posso tomar uma decisão?”

(Um professor)

Uma distinção comum entre duas maneiras de saber é expressa frequentemente através de “saber que” *versus* “saber como”, ou “conhecimento de proposição” *versus* “conhecimento de procedimentos”, ou ainda “fatos” *versus* “habilidades”. Neste capítulo falaremos sobre várias formas do saber que não podem ser reduzidas nos termos dessa dicotomia. Importantes exemplos tirados da vida diária são conhecer uma pessoa, um lugar, e conhecer o nosso próprio estado mental. Prosseguindo em nosso tema de usar o computador para entender o conhecimento científico como enraizado no conhecimento pessoal, deveremos contemplar a seguir as maneiras pelas quais o conhecimento científico se assemelha mais a conhecer uma pessoa do que a conhecer um fato ou ter uma habilidade. Ao fazer isso, estaremos procedendo de forma semelhante à que usamos com a Tartaruga para construir pontes entre a geometria formal e a geometria corporal da criança. Aqui também, nossa finalidade é estabelecer condições para tipos de aprendizagem mais sintônicas do que as preferidas pela escola tradicional.

Nos capítulos anteriores exploramos um paradoxo: embora a maioria da sociedade classifique a matemática como um tipo de conhecimento menos acessível, ele é, para-

doxalmente, o mais acessível à criança. Neste capítulo encontraremos um paradoxo semelhante no domínio da ciência. Veremos os modos pelos quais o pensamento da criança tem mais pontos em comum com a “ciência real” do que a “ciência da escola” tem com o pensamento tanto das crianças como dos cientistas. E mais uma vez salientamos um duplo paradoxo na maneira como o computador entra e influencia essa situação. A introdução do computador pode fornecer uma maneira de resolver os paradoxos, mas geralmente é usado de forma a exacerbá-los, reforçando o modo paradoxal de se pensar o conhecimento, a “matemática escolar” e a “ciência escolar”.

Adultos mateticamente sofisticados usam certas metáforas ao falar sobre importantes experiências de aprendizagem. Eles falam em *vir a conhecer* (*getting to know*) uma idéia, *explorar* uma área de conhecimento, e *adquirir sensibilidade* para discriminar sutilezas que há pouco pareciam impossíveis de se notar.

Acredito que essas descrições se aplicam de forma muito precisa ao modo pelo qual a criança aprende. Mas, quando pedi aos alunos do 1º grau para falarem sobre aprendizagem, eles usaram uma linguagem muito diferente, referindo-se, principalmente, a fatos e habilidades que adquiriram. Parece muito claro que a escola dá ao aluno um modelo particular de aprendizagem; e creio que faz isso através não apenas da maneira que falam com os alunos, mas também de como as habilidades são praticadas.

Habilidades e fatos discretos são fáceis de serem ministrados em doses controladas. E também são mais fáceis de serem medidos. E, certamente, é mais fácil forçar a aprendizagem de uma habilidade do que verificar se alguém “veio a conhecer” uma idéia. Não é pois surpreendente que a escola enfatize a aprendizagem de fatos e habilidades e que os alunos assimilem uma imagem de aprendizagem como sendo “aprender que” ou “aprender como”.

Trabalhar nos micromundos da Tartaruga é um modelo de como a aprendizagem de uma idéia pode ser semelhante à maneira como conhecemos uma pessoa. Os alunos que trabalham nesses ambientes certamente descobrem fatos, fazem generalizações de proposições, e aprendem habilidades. Mas a experiência primordial de aprendizagem não é a memóri-

zação de fatos ou a prática de habilidades. Ao invés, é “vir a conhecer” a Tartaruga, explorar o que ela pode e o que ela não pode fazer. Essa atividade é semelhante às atividades diárias da criança, como fazer bolo de areia ou testar os limites da autoridade paterna — todas possuem um componente de “vir a conhecer”. Os professores freqüentemente montam situações, que, segundo eles, levam as crianças a “vir a conhecer” certos conceitos — sem mesmo perceber que o estão fazendo. Entretanto, a Tartaruga é diferente — ela permite à criança agir com deliberação e conscientemente para gerar um tipo de aprendizagem com a qual se sente familiarizada e confortável, e que conduz à matemática e à física. E, como temos destacado, este é um tipo de aprendizagem que traz a criança para mais perto da atividade matemática dos aprendizes adultos sofisticados. A Tartaruga, em suas várias formas (Tartaruga de solo, de vídeo e Dinartart), está apta a desempenhar tão bem esse papel porque é ao mesmo tempo um atraente objeto passível de ser antropomorfizado e uma idéia matemática poderosa. Como um modelo do que significa aprender matemática e física, ela se destaca em nítida oposição à metodologia descrita pelo aluno de 5ª série, Bill (citado no Capítulo 3), que me disse que, para aprender matemática, ele limpava sua mente e repetia os conceitos muitas e muitas vezes.

Para mim, vir a conhecer um domínio do conhecimento (como a física newtoniana ou a filosofia hegeliana) é muito mais parecido com o que acontece ao entrarmos numa nova comunidade de pessoas. Muitas vezes inicialmente nos sentimos submersos no conjunto desorientador de faces indiferenciadas. Só gradualmente as faces começam a ser diferenciadas. Noutras ocasiões, podemos ter a sorte de rapidamente vir a conhecer uma ou duas pessoas com as quais podemos desenvolver um relacionamento importante. Essa boa sorte pode ocorrer graças à um sentido intuitivo para selecionar as pessoas “interessantes”, ou pode vir do fato de termos boas apresentações. De modo semelhante, quando entramos num domínio novo do conhecimento, encontramos inicialmente uma multidão de idéias novas. Bons aprendizes são capazes de selecionar aquelas que são poderosas e adequadas. Os menos habilidosos necessitam da ajuda de professores e amigos. Mas não devemos esquecer que embora bons professores

desempenham o papel de amigos comuns que podem fazer apresentações, a tarefa de vir a conhecer uma idéia ou pessoa não pode ser executada por um terceiro. Cada um deve adquirir destreza em "vir a conhecer" e um estilo pessoal para fazê-lo.

Usaremos aqui um exemplo da física para focalizar a imagem de um domínio do conhecimento como uma comunidade de idéias poderosas, e, assim procedendo, estaremos dando um passo em direção a uma epistemologia de idéias poderosas. Os micromundos da Tartaruga ilustram algumas estratégias gerais para ajudar um novato a começar a fazer amigos nessa comunidade. A primeira estratégia é garantir que o aprendiz tenha um modelo desse tipo de aprendizagem; trabalhar com a Tartaruga é um bom modelo. Essa estratégia não requer que todo conhecimento seja "Tartarugatizado", ou "reduzido" aos termos computacionais. A idéia é que a primeira experiência com as Tartarugas é uma boa maneira de "vir a conhecer" o que significa aprender um assunto "vindo a conhecer" suas idéias poderosas. Eu enfatizei essa mesma idéia no Capítulo 2 quando sugeri que a geometria da Tartaruga poderia ser uma maneira excelente de introduzir os aprendizes nas idéias de Polya sobre heurística. Isso não torna o pensamento heurístico dependente das tartarugas ou dos computadores. Uma vez totalmente "conhecidas", as idéias de Polya podem ser aplicadas a outros domínios (até em aritmética). A nossa discussão no Capítulo 4 sugeriu que a física teórica pode ser um bom veículo para um tipo importante de metac conhecimento. Se assim for, isto teria consequências importantes para a nossa visão cultural do papel dessas idéias na vida das crianças. Poderíamos vê-lo como um assunto apropriado para ser aprendido precocemente não apenas porque explica o mundo das coisas mas porque o faz de modo a colocar a criança em melhor situação para comandar seus próprios processos de aprendizagem.

Para algumas pessoas, usar a física como modelo para analisar problemas é sinônimo de uma abordagem altamente formalizada e quantitativa. De fato, a história do que aconteceu à psicologia e sociologia quando se usou a física como modelo geralmente teve finais infelizes. Mas há uma grande diferença no tipo de física utilizada. A física que teve influência maléfica sobre as ciências sociais enfatizava uma filoso-

fia da ciência positivista. Eu estou me referindo a um tipo de física que nos coloca em oposição nítida e firme à visão positivista da ciência como um conjunto verdadeiro de fatos e "leis". O conteúdo proposicional da ciência é certamente muito importante, mas constitui apenas uma parte do corpo de conhecimento do físico. Não é a parte que historicamente se desenvolveu primeiro, nem a que pode ser entendida primeiro no processo de aprendizagem, e, não é, certamente, a que estou propondo como modelo de reflexão para nosso próprio pensamento. Estaremos interessados no conhecimento que é mais qualitativo, menos completamente especificado, e raramente enunciado em formato proposicional. Se são dadas aos alunos equações como $f = ma$, $E = IR$, ou $PV = RT$ como modelos primários do conhecimento que constitui a física, eles são colocados numa situação em que provavelmente não encontram nada em suas mentes que possa ser reconhecido como "física". Já vimos que esse é o tipo da coisa que os coloca numa situação de alto risco como aprendizes. Eles estão a caminho da aprendizagem dissociada. Eles estão a caminho de se autoclassificarem como incapazes de aprender física. Um sentido diferente do tipo de conhecimento que constitui a física é o que se obtém trabalhando com Tartarugas: aqui uma criança, mesmo a que possua apenas um elemento de conhecimento qualitativo, desconexo e com especificação incompleta (como por exemplo "essas Tartarugas só entendem mudar de velocidade") já pode fazer alguma coisa com ele. De fato, pode começar a elaborar muitos dos problemas conceituais que atormentam os alunos universitários. O fragmento de conhecimento pode ser usado até mesmo sem se saber como representar velocidades quantitativamente! Ela pertence à família de idéias intuitivas e informais mas frequentemente muito poderosas que habitam nossas cabeças, quer sejamos crianças ou físicos.

Esse uso do computador para criar oportunidades para exercitar o pensamento qualitativo é muito diferente do uso que se tornou corrente nos cursos de física de 2º grau. Neste caso ele é usado para reforçar o aspecto quantitativo da física, permitindo cálculos mais complexos. Deste modo, compartilha do paradoxo, já salientado por nós, da utilização de tecnologias novas para reforçar métodos educacionais cuja própria existência é um reflexo das limitações da era pré-

computacional. Como foi mencionado anteriormente, a necessidade de exercício e prática em aritmética é um sintoma da ausência de condições para a aprendizagem sintonizada da matemática.* O uso adequado do computador é para prover essas condições. Quando os computadores são usados para curar o sintoma imediato de notas baixas em matemática, eles reforçam hábitos de aprendizagem dissociada. E esses hábitos, que se estendem a muitas áreas da vida, constituem um problema muito mais grave do que ser fraco em aritmética. A cura pode ser pior do que a doença. Há um argumento análogo para a física. O ensino tradicional da física é forçado a superenfatizar o quantitativo, devido aos acidentes da tecnologia de papel e lápis, que favorece o trabalho que pode produzir uma "resposta" definitiva. Isto é reforçado por um sistema de ensino usando "laboratórios" onde são feitos experimentos para provar, invalidar, e "descobrir" proposições já conhecidas. Isto faz com que seja muito difícil que o aluno encontre um modo de reunir de forma construtiva intuição e métodos formais. Todos estão muito ocupados seguindo as receitas. Novamente, como no caso da aritmética, o computador deveria ser usado para remover o problema fundamental. Entretanto, como as coisas se apresentam atualmente, a imagem estabelecida da física escolar como sendo quantitativa e a imagem estabelecida do computador se reforçam mutuamente. O computador é usado para agravar a metodologia já demasiadamente quantitativa das aulas de física. Como no caso de exercício e prática em aritmética, este uso do computador produz, sem dúvida alguma, melhoras localizadas, e portanto obtém o carimbo de aprovação da comunidade de avaliação educacional e de professores que não tiveram a oportunidade de ver algo melhor. Mas ao longo deste livro desenvolvemos os elementos de uma abordagem menos quantitativa do uso do computador em educação. Agora abordaremos diretamente as preocupações que esta mudança deve despertar em um professor de física sério.

A citação no começo deste capítulo foi expressa com alguma angústia por uma professora que manifestamente gostou de trabalhar com as Tartarugas mas que não conse-

* O autor usa a expressão *syntonic learning*, um neologismo que se relaciona ao significado de sintonia, como em rádio. (N.T.)

guiu reconciliar esse trabalho com o que ela veio a definir como "fazer física". Essa situação reflete um dilema permanente enfrentado por qualquer um que deseje produzir inovações radicais em educação. A inovação necessita de idéias novas. Tenho argumentado que deveríamos estar preparados para empreender profundas reconceituações de domínios clássicos do conhecimento. Mas até onde poderemos chegar? A educação tem uma responsabilidade frente à tradição. Por exemplo, a tarefa da comunidade dos professores de português* deve ser orientar seus alunos para a língua e literatura tal como existe e como evoluiu historicamente. Eles estariam faltando ao dever se em vez disso inventassem uma nova língua, escrevessem sua versão de poesia, e passassem para a nova geração essas entidades fabricadas em lugar das tradicionais. A preocupação da professora sobre se o trabalho com as Tartarugas é "realmente aprender física" é muito séria.

O trabalho com as Tartarugas é semelhante a substituir Camões por uma literatura fabricada, "mais fácil"? Este trabalho com as Tartarugas põe os alunos em contato com a produção intelectual de Galileu, Newton e Einstein, ou apenas com uma invenção idiossincrática que não é nem marcada pela grandeza nem testada pelo tempo? A pergunta levanta problemas fundamentais, entre eles: o que é física? E qual é o potencial de influência do computador sobre a sua compreensão?

A maioria dos especialistas em currículo tem respostas fáceis para estas questões. Eles definem física elementar como sendo o que é ensinado na escola. Ocasionalmente, introduzem no 2.º grau um assunto geralmente ensinado no 3.º, ou novos tópicos do mesmo tipo que os antigos. Por exemplo, partículas modernas são mencionadas, e os livros-textos mostram esquematicamente como funciona um reator nuclear. Mesmo os reformadores de currículo mais visionários se limitaram ao esquema conceitual definido por equações, leis quantitativas e experiências de laboratório. Desse modo, eles podiam estar seguros de que estavam realmente "ensinando física". A possibilidade aberta pelo computador de um novo tipo de atividade e de um novo relacionamento de idéias

* Inglês no original, com o significado da língua materna. (N.T.)

coloca problemas de responsabilidade para com a herança cultural. Eu levo essa responsabilidade a sério, mas não posso sentir que a sirvo me refugiando atrás do currículo existente. Não se pode aceitar este refúgio sem considerar seriamente a questão de se a ciência escolar já não está na posição do professor de português hipotético que ensinava uma forma substituta do idioma porque ela parecia mais fácil de ensinar. Creio ser este o caso.

No Capítulo 5, sugeri que é a “física escolar” e não a “física da Tartaruga” que trai o espírito da “física real”. Prossegurei aqui minha argumentação falando sobre componentes da física que estão ainda mais distantes do currículo tradicional do que as Dinatarts. Trata-se de idéias ou “padrões” intuitivos e muito gerais, usados pelos físicos para pensar problemas antes mesmo que possam decidir que princípios quantitativos aplicar.

Peço aos leitores que podem não estar familiarizados com esse pensamento qualitativo em física que sigam uma conversa hipotética entre dois grandes físicos.

Muitos milhões de alunos crescem acreditando que Galileu refutou a suposição de Aristóteles de que o tempo que leva um objeto para chegar ao solo é proporcional ao seu peso, ao jogar bolas de canhão do alto da Torre de Pisa. Supõe-se que o experimento de Galileu provou que, exceto para perturbações mínimas devido à resistência do ar, bolas de canhão pesadas e leves, se fossem jogadas ao mesmo tempo, atingiriam o solo juntas. Na realidade, é extremamente improvável que Galileu tenha realizado tal experimento. Mas se ele realizou ou não tal experimento é menos interessante do que o fato de que ele não teria tido a menor dúvida sobre o resultado do experimento. A fim de transmitir uma idéia do tipo de reflexão que poderia lhe ter dado esta certeza, ouviremos um diálogo hipotético entre dois personagens imaginários, GAL e ARI.

GAL — Veja, sua teoria tem que estar errada. Aqui está uma bola de 1 kg e outra de 1/2 kg. A de 1 kg leva 2 segundos para atingir o chão. Diga-me, quanto tempo você crê que a de 1/2 kg levará?

ARI — Suponho que levará 4 segundos. De qualquer modo, muito mais que 2 segundos.

GAL — Imaginei que esta seria sua resposta. Mas responda, por favor, a uma outra questão. Vou jogar 2 bolas de 1/2 kg simultanea-

mente. Quanto levará o par para atingir o chão?

ARI — Esta não é uma outra questão. Dei minha opinião de que 1 bola de 1/2 kg levaria 4 segundos. Duas delas devem levar o mesmo tempo. Cada uma cai independentemente.

GAL — Você é coerente, se 2 corpos são 2 corpos, não são um.

ARI — Como eles são... naturalmente.

GAL — Mas, agora, se eu amarrar uma bola à outra com um fio de gaze... agora são dois corpos ou um? Levará (ou levarão) 2 ou 4 segundos para atingir o chão?

ARI — Estou realmente confuso. Deixe-me pensar... É um corpo, mas então deveria levar 2 segundos até o chão. Mas isto significaria que um fio mais fino que a seda poderia retardar a queda violenta de duas bolas de ferro. Parece impossível. Mas se eu digo que são 2 corpos... crio um grande problema. O que é um corpo? Como sei quando um torna-se dois? E se não posso saber, então como posso estar seguro de minhas leis sobre a queda dos corpos?

De um ponto de vista estritamente lógico, a argumentação de GAL não é absolutamente convincente. Pode-se imaginar “emendas” para a teoria de ARI. Ele poderia propor, por exemplo, que o tempo que leva um corpo para cair depende não apenas do peso mas também de sua forma. Isto lhe daria a possibilidade de um corpo de 1 kg feito de 2 bolas e fios de gaze cair mais devagar que uma bola de 1 kg. Mas, na realidade, o tipo de argumentação usado por GAL subverte o tipo de teoria exposta por ARI e, historicamente, é possível que a rejeição do pensamento aristotélico tenha sido alimentada por tais argumentos. Nenhum argumento isolado poderia ter convertido Aristóteles, para quem a teoria da queda dos corpos era um elemento de uma teia que se sustentava mutuamente. Mas, à medida que se difundiu a maneira de pensar de GAL, o sistema aristotélico foi sendo erodido. Na realidade, sustento que argumentos deste tipo, em oposição a argumentos aparentemente mais irresistíveis, baseados em fatos e equações precisas, tiveram um papel essencial na evolução do pensamento, tanto na escala histórica da evolução da ciência como na escala pessoal do desenvolvimento do aprendiz como indivíduo.

ARI poderia ter-se defendido muito melhor se a argumentação de GAL fosse baseada em fatos ou cálculos específicos, que permitiriam sutilezas sobre suas condições de aplicabilidade e se prestariam a ser compartimentalizadas. A grande força do argumento de GAL deriva do fato de que

mobiliza as próprias intuições de ARI sobre a natureza de objetos físicos e sobre a continuidade de efeitos naturais (fio mais fino que a seda *versus* queda violenta de bolas de ferro). A um lógico este argumento pode parecer menos convincente. Mas, como seres humanos empáticos, nós mesmos nos achamos enredados na confusão de ARI.

Há muito que aprender da reflexão sobre as questões colocadas por este diálogo, simplista como é. Primeiro, notamos que GAL não está sendo simplesmente mais esperto que ARI: ele *sabe* algo que ARI parece não saber. De fato, se olharmos cuidadosamente, veremos que GAL emprega habilmente várias idéias poderosas. Mais notadamente, está a sua idéia principal de considerar um objeto de 2 kg como formado de 2 objetos de 1 kg, vendo o todo como constituído da soma de quantas partes o queremos dividir. Colocada abstratamente, esta idéia soa trivial em alguns contextos e simplesmente falsa em outros; estamos acostumados a sermos lembrados que “o todo é mais que a soma de suas partes”. Mas, não devemos tratar isso como uma proposição a ser julgada pelo critério de verdade e falsidade. É uma *idéia*, uma ferramenta intelectual que se demonstrou ser enormemente poderosa quando usada com habilidade.

A idéia de GAL é poderosa e faz parte do conjunto de ferramentas intelectuais de todo matemático, físico ou engenheiro moderno. É tão importante na história e na aprendizagem da física como é o tipo de conhecimento que pode ser expresso em termos de proposições e equações. Mas não se conheceria isto pela leitura de livros-textos. A idéia de GAL não foi dado um nome, ela não é atribuída a um cientista histórico, e é silenciosamente ignorada pelos professores. De fato, como a maioria da física intuitiva, este conhecimento parece ser adquirido por físicos *adultos* através do processo de aprendizagem piagetiano, sem, e freqüentemente apesar do ensino acadêmico deliberado. Naturalmente, meu interesse em reconhecer a existência dessas idéias intuitivas poderosas, aprendidas informalmente, não é para removê-las do âmbito da aprendizagem piagetiana é colocá-las num currículo: há outras maneiras de facilitar sua aquisição. Ao reconhecer sua existência devemos ser capazes de criar condições que estimularão o seu desenvolvimento, e certamente podemos fazer muito para remover os obstáculos que as

bloqueiam em muitos ambientes tradicionais de aprendizagem.

O diálogo de GAL e ARI tem algo a nos ensinar sobre um dos bloqueios mais destrutivos da aprendizagem: o uso do raciocínio formal para refutar intuições.

Todo mundo conhece a sensação desagradável evocada ao nos depararmos com um fenômeno contra-intuitivo, quando somos obrigados, pela observação ou pela razão, a reconhecer que a realidade não se ajusta a nossas expectativas. Muitas pessoas experimentam essa sensação quando se deparam com o movimento perpétuo de uma partícula newtoniana, com a forma como o leme manobra o barco, ou com o comportamento estranho de um giroscópio de brinquedo. Em todos esses exemplos, a intuição parece nos trair. Às vezes o caso necessita de uma simples correção; vemos que cometemos um erro superficial. Mas os casos interessantes são aqueles em que o conflito permanece de forma obstinada, por mais que reflitamos sobre o problema. Estes são os casos em que somos tentados a concluir que “a intuição não é confiável”. Nestas situações, precisamos melhorar nossa intuição, depurá-la, mas a pressão sobre nós é para abandoná-la e em seu lugar confiar em equações. Geralmente um aluno, quando se encontra nesse aperto, procura o professor de física para dizer-lhe: “Penso que o giroscópio deveria cair em vez de ficar em pé”. A resposta do professor é escrever uma equação para *provar* que a coisa fica em pé. Mas isto não é o que o aluno precisa. Ele já *sabia* que o giroscópio ficaria em pé, e este conhecimento fere porque entra em conflito com a intuição. Ao *provar* que ele ficará em pé, o professor põe sal na ferida, mas não faz nada para curá-la. O que o aluno precisa é algo muito diferente: melhor compreensão de si mesmo, não do giroscópio. Ele deseja saber por que sua intuição gerou uma expectativa errada. Ele precisa saber como trabalhar suas intuições para mudá-las. Vimos pelo diálogo que GAL é um especialista em manipular intuições. Ele não força ARI a rejeitar a intuição em favor do cálculo. Em vez disso, ele o obriga a confrontar-se com um aspecto muito específico do seu pensamento intuitivo: *como ele pensa a respeito dos objetos*. Pode-se suspeitar, a partir do diálogo, que GAL está acostumado a compreender os objetos imaginando-os compostos de partes, ou sub-objetos, enquanto ARI está acostu-

mado a compreender objetos de forma mais global, como sólidos indivisíveis, com propriedades globais como forma e peso.

Pode parecer que nos afastamos muito de nossa discussão sobre computadores. Mas a interação entre GAL e ARI é muito semelhante a um tipo importante de interação entre crianças e computadores e entre crianças e instrutores via computadores. GAL tentou fazer ARI confrontar e elaborar suas maneiras intuitivas de pensar objetos, e ARI talvez tenha sido suficientemente hábil para fazê-lo. Mas o que as crianças podem fazer para confrontar *suas* intuições?

Naturalmente, esta questão é retórica, pois sei que as crianças pensam muito sobre suas idéias. Elas realmente se preocupam com suas intuições, as confrontam e as depuram. Se tal não ocorresse, a idéia de conseguir que o fizessem seria realmente utópica. Mas dado que elas já o fazem, podemos prover materiais para ajudá-las a fazer melhor.

Vejo o computador ajudando de dois modos. Em primeiro lugar, o computador permite, ou obriga a criança a externalizar expectativas intuitivas. Quando a intuição é traduzida num programa, ela se torna mais evidente e acessível à reflexão. Em segundo lugar, idéias computacionais podem ser tomadas como materiais para o trabalho de remodelação do conhecimento intuitivo. Utilizaremos, a seguir, a análise de um quebra-cabeça bem conhecido para ilustrar como o modelo da Tartaruga pode ajudar a fechar a brecha existente entre o conhecimento formal e a compreensão intuitiva. Observamos muitos exemplos com crianças trabalhando com computadores. Transmitirei aqui o significado disso, convidando o leitor a trabalhar numa situação na qual *suas* intuições entrarão em conflito.

A finalidade de trabalhar no problema não é “chegar a uma resposta correta”, mas captar, com sensibilidade, o conflito entre diferentes modos de pensar, ou entre a análise intuitiva e a formal. Quando se reconhecer o conflito, o próximo passo é elaborá-lo até se sentir mais confortável. Quando fiz isso, descobri que o modelo da Tartaruga era extremamente útil para resolver alguns dos conflitos. Mas minha reação certamente está calcada nos meus sentimentos positivos em relação à Tartaruga.

Imagine um barbante em volta da circunferência da Terra, a qual, para este propósito, será considerada uma esfe-

ra perfeitamente lisa, com 6 mil quilômetros de raio. Alguém propõe colocar o barbante sobre estacas de 2 metros de altura. Obviamente, isto implica que o barbante deverá ser mais comprido. A discussão refere-se a quanto mais longo o barbante deveria ser. A maioria das pessoas que passaram pelo segundo grau sabe *calcular* a resposta. Mas, sem o fazer ou ler adiante, tente adivinhar o comprimento adicional: será de cerca de 1 000 quilômetros, 100 ou 10?

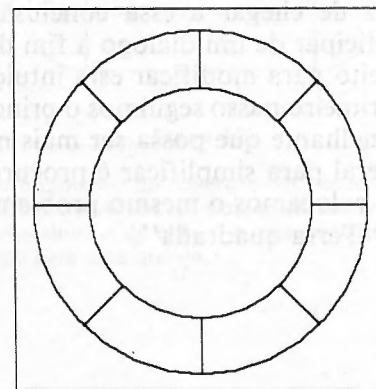


Figura 15

A figura mostra um barbante em volta da Terra suspenso por estacas de altura exagerada. Denomine o raio da Terra R e a altura das estacas h . O problema é estimar a diferença em comprimento entre a circunferência externa e a verdadeira circunferência. Isto é facilmente calculado pela fórmula:

$$\text{CIRCUNFERÊNCIA} = 2 \pi \times \text{RAIO}$$

Assim a diferença deve ser:

$$2 \pi (R + h) - 2 \pi R$$

que é simplesmente $2 \pi h$.

Mas o desafio aqui é intuir uma resposta aproximada ao invés de “calcular” a resposta.

A maioria das pessoas que tem a disciplina de pensar antes de calcular — disciplina essa que faz parte de saber como depurar a própria intuição — experimenta uma persuasiva sensação intuitiva que é necessário “muito” mais. Para alguns, a origem desta convicção parece estar ligada à

idéia de que alguma coisa está sendo acrescentada à volta toda de 40 mil quilômetros (ou algo assim). Outros o atribuem a considerações mais abstratas de proporcionalidade. Mas, qualquer que seja a origem, a intuição pode estar “incorreta” ao antecipar o resultado do cálculo formal, que resulta em pouco mais de 12 metros. O conflito entre intuição e cálculo é tão poderoso que esse problema se torna conhecido como quebra-cabeças. E a conclusão a que geralmente se chega a partir deste conflito é que não se pode confiar na intuição. Em vez de chegar a essa conclusão, tentaremos fazer o leitor participar de um diálogo a fim de identificar o que precisa ser feito para modificar esta intuição.

Como um primeiro passo seguimos o princípio de buscar um problema semelhante que possa ser mais manipulável. E uma boa regra geral para simplificar é procurar uma versão linear. Portanto, colocamos o mesmo problema com o pressuposto de uma “Terra quadrada”.

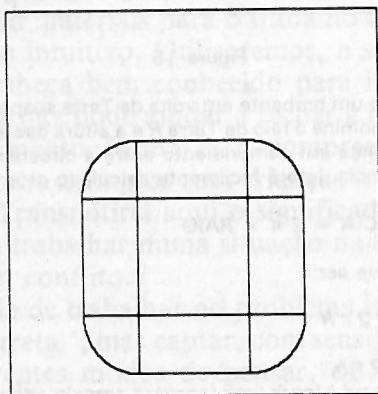


Figura 16a

O barbante sobre as estacas é suposto estar a uma distância h do quadrado. Ao longo dos lados do quadrado o barbante está reto. Ao dobrar os cantos, forma um círculo de raio h . Os segmentos retos têm o mesmo comprimento dos lados do quadrado. O comprimento adicional está todo nos cantos, nas 4 partes em forma de $1/4$ de círculo. Os 4 quartos formam um círculo completo de raio h . Portanto, o “barbante a mais” é a circunferência deste círculo, ou seja, $2\pi h$.

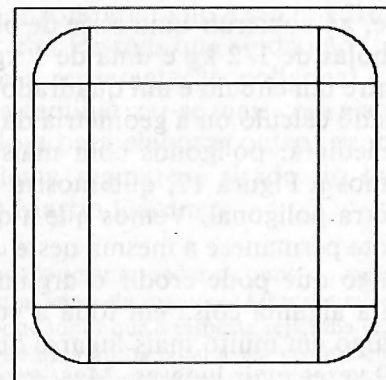


Figura 16b

Aumentando o tamanho do quadrado não muda o tamanho das partes em forma de $1/4$ de círculo. Assim, o barbante adicional necessário para levantar o barbante a uma altura h do chão é o mesmo tanto para uma Terra quadrada pequena como para uma grande.

O diagrama nos oferece uma maneira geométrica de ver que se necessita a mesma quantidade de barbante aqui como no caso do círculo. Isto é por si mesmo muito surpreendente. Mas, mais surpreendente é o fato de que podemos ver claramente que o tamanho do quadrado não faz diferença alguma na quantidade de barbante adicional que é necessário. Poderíamos ter calculado este fato mediante uma fórmula. Mas isto continuaria deixando-nos com a mesma dificuldade. “Vendo-o” geometricamente podemos colocar este caso em concordância com o nosso princípio intuitivo: necessita-se mais barbante somente onde a Terra curva. Obviamente, não há necessidade de mais barbante para levantar uma linha reta a uma altura de dois metros do chão.

Infelizmente, esse modo de entender o caso do quadrado parece minar a nossa compreensão do círculo. Nós entendemos totalmente o quadrado, mas através de um caso muito diferente do círculo.

Mas há uma outra idéia poderosa que pode nos socorrer. É a idéia de casos intermediários. Quando há um conflito entre dois casos, procure casos intermediários, como GAL

fez, na realidade, ao construir uma série de objetos intermediários entre 2 bolas de $1/2$ kg e uma de 1 kg. Mas o que é intermediário entre um círculo e um quadrado? Qualquer um que tenha estudado cálculo ou a geometria da Tartaruga terá uma resposta imediata: polígonos com mais e mais lados. Assim, observemos a Figura 17, que mostra o barbante em volta de uma Terra poligonal. Vemos que a quantidade adicional de barbante permanece a mesma neste caso e, notavelmente, vemos algo que pode erodir o argumento de que o círculo acrescenta alguma coisa em toda a volta. The 1000-gon acrescenta algo em muito mais lugares que o quadrado, na realidade 250 vezes mais lugares. Mas, acrescenta menos, de fato uns duzentos e cinquenta avos em cada um deles.

Agora sua mente está disposta a dar um salto? Como GAL, até agora eu não disse nada para compelir o leitor a dar este passo crucial por lógica rigorosa. Nem o farei. Mas, neste ponto algumas pessoas começam a vacilar, e suponho que se o fazem ou não depende de quão firmemente elas aderem à idéia de aproximações poligonais do círculo. Para aquelas que já se apropriaram da representação poligonal, a equiva-

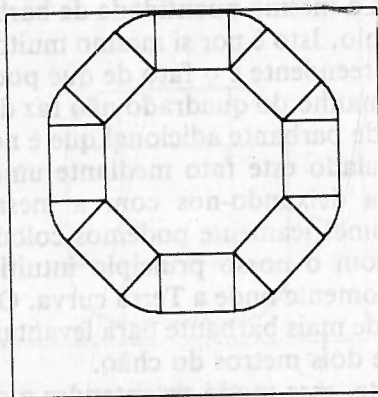


Figura 17

No octágono, também, o "barbante adicional" está nas fatias ao redor dos cantos. Se você colocá-los juntos, eles formarão um círculo de raio h . Como no caso do quadrado, este círculo é o mesmo, seja o octágono grande ou pequeno. O que funciona para o quadrado (4-gon) e para o octágono (8-gon) também funciona para o 100-gon e o 1000-gon.

lência entre polígono e círculo é tão imediata que a intuição é arrastada por ela. Pessoas que ainda não "possuem" a equivalência entre a representação poligonal e o círculo podem trabalhar para familiarizar-se mais com ela, como, por exemplo, utilizando-a para elaborar outros problemas.

O problema seguinte é tirado do livro *Mathematical Carnival*¹ de Martin Gardner.

Se uma moeda rolar ao redor de outra do mesmo tamanho sem deslizar, quantas vezes ela rodará ao fazer um movimento de revolução? Alguém pode supor que a resposta seja uma vez, já que a moeda rola em torno de uma borda igual à sua própria circunferência, mas um experimento rápido mostra que a resposta é dois; aparentemente a revolução completa da moeda que se move acrescenta uma rotação extra.¹

Outra vez há um conflito entre a suposição intuitiva (uma rotação) e o resultado de uma investigação mais cuidadosa. Como se pode fazer para obter uma concordância da própria intuição?

A mesma estratégia utilizada para o problema do barbante ao redor da Terra funciona aqui. Role uma moeda em torno de um quadrado sem escorregar. Você notará que ela se comporta de modo bem diferente ao rolar pelos lados do que quando gira ao redor dos cantos. É fácil de verificar que a forma das rotações nos 4 cantos dá 360° . Isto é verdadeiro para qualquer polígono, independente do número de lados ou tamanho. E, uma vez mais, o passo crucial é a passagem do polígono para um círculo da Tartaruga e para um círculo verdadeiro.

Não estou sugerindo que mais um exercício mudará sua intuição de circularidade. Aqui também, como no caso da física de Aristóteles, o elemento particular do conhecimento faz parte de uma grande rede de maneiras de pensar que se sustentam mutuamente. Estou sugerindo que mantenha em mente por um certo tempo esta nova maneira de pensar, procurando oportunidades de usá-la do mesmo modo que se procura oportunidades de se apresentar um novo amigo aos velhos amigos. E mesmo assim, não tenho meios de saber se você quer mudar sua intuição sobre a circularidade. Mas, se

¹ Martin Gardner, *Mathematical Carnival* (Nova Iorque, Random House, 1977).

deseja mudar, penso que o processo que estou sugerindo aqui é o melhor, talvez o único meio, quer ele seja adotado deliberadamente ou aconteça inconscientemente.

Desejo que você deixe este livro com um novo sentido do valor da criança como um pensador, inclusive como um "epistemólogo" com uma noção do poder das idéias poderosas. Mas também percebo que essas imagens podem parecer abstratas e até irritantes para alguns de vocês, talvez especialmente aqueles que ensinam crianças.

Por exemplo, uma professora de 3.^a série, que passa muitas frustrantes horas por dia tentando ensinar 36 crianças a escrever sentenças gramaticais e a fazer aritmética, pode considerar minhas sugestões sobre geometria da Tartaruga, micromundos de física e cibernética tão afastadas da realidade, quanto a Maria Antonieta estava ao sugerir aos que morriam de fome por falta de pão que comessem bolo. Como se relacionam as idéias poderosas aqui discutidas com o que a maioria das escolas considera seu trabalho básico e diário, ou seja, as habilidades básicas?

Uma primeira conexão se relaciona com a atitude do aluno. Não podemos aprender habilidades básicas se chegamos até elas com medo e com a antecipação de detestá-las. Quando as crianças que não deixam entrar nem um número em suas cabeças não conseguem aprender aritmética, o remédio deve ser o desenvolvimento de uma nova relação com números. Conseguir isto pode colocar as crianças numa relação positiva com qualquer outra coisa que elas reconheçam como sendo do mesmo tipo. Isto pode ser a matemática escolar.

Kim era uma menina na 5.^a série que invariavelmente estava em último lugar nos testes de aritmética da escola. Ela odiava matemática. Num ambiente LOGO ela ficou absorvida pela programação. Ela planejou um projeto que mantinha um arquivo de dados especial para guardar informação sobre sua árvore genealógica. Um dia um educador visitante comentou com ela que "computadores tornam a matemática divertida". Kim levantou os olhos de seu trabalho e disse muito zangada: "Não há nada divertido em matemática". O instrutor de sua classe tinha achado que não seria aconselhável discutir com ela se o que estava fazendo com o computador era "matemática". Claramente, qualquer coisa que fosse boa não era definitivamente matemática. Mas ao fim do ano a própria Kim fez a conexão e decidiu que matemática não era nem desagradável nem difícil.

Vir a conhecer (e gostar) de matemática do mesmo modo que você vem a conhecer (e gostar de) uma pessoa é uma imagem muito pertinente do que aconteceu neste caso. Os computadores também podem contribuir para a aprendizagem de aritmética básica mudando nossa percepção do que ela é, de quais são suas idéias poderosas mais importantes.

A aritmética escolar, considerada geralmente um ramo da teoria de números, poderia ser melhor considerada um ramo da ciência de computação. As dificuldades experimentadas pelas crianças não são geralmente causadas pela deficiência em seus conceitos de números, mas pela falha na apropriação de algoritmos relevantes.

A aprendizagem de algoritmos pode ser vista como um processo de fazer, usar e corrigir programas. Quando se soma números de vários dígitos, na realidade se está agindo como um computador executando um procedimento parecido com o programa da Figura 18.

1. Coloque os números de maneira convencional.
2. Focalize a atenção na coluna da extrema direita.
3. Some como se fossem números de 1 só dígito.
4. Se o resultado < 10 , escreva o resultado.
5. Se o resultado da coluna à direita for igual ou maior que 10, então escreva o dígito da direita deste resultado e coloque o outro na coluna seguinte.
6. Focalize a atenção na coluna seguinte.
7. Vá para a linha 3.

Figura 18

Para se tornar melhor neste tipo de atividade é necessário saber mais e se sentir mais confortável com a idéia de procedimentos. E isto, naturalmente, é o que permite uma boa experiência com computadores.

Estes comentários devem ser colocados no contexto de nossa análise anterior sobre a diferença entre o currículo de matemática moderna produzido nos anos 60 e o tipo de enriquecimento que a cultura do computador pode trazer para a matemática. No Capítulo 2 discutimos uma razão importante para o fracasso da matemática moderna: não melhorou em nada a relação alienada da sociedade com o número. Pelo contrário, agravou-a. Agora examinaremos uma segunda

razão para o fracasso da matemática moderna. Ela tratou de basear o ensino da matemática na teoria de número, teoria de conjunto, ou lógica, em vez de enfrentar os obstáculos conceituais que as crianças realmente experimentam: seu desconhecimento sobre programação. Portanto, os autores da matemática moderna entenderam mal a origem dos problemas das crianças. Esse mal-entendido é prejudicial de várias maneiras. É prejudicial na medida em que procura melhorar a compreensão da aritmética pela criança através de exercícios repetitivos em áreas irrelevantes do conhecimento. Também é prejudicial na medida em que força um sistema de valor inadequado na educação matemática. O matemático puro vê a idéia de número como valiosa, poderosa e importante. Os detalhes do procedimento são consideradas como superficiais e desinteressantes. Assim, as dificuldades das crianças são atribuídas à dificuldades abstratas com a noção de número. O cientista de computação adota um enfoque mais direto. As dificuldades com a adição não são consideradas como sintoma de alguma outra coisa; são dificuldades com o *procedimento* de adicionar. Para o cientista da computação o procedimento e os modos pelos quais ele pode falhar são tão interessantes e conceituais como qualquer outra coisa. Além disto, o que saiu errado, ou seja, os *bugs*, não são encarados como erros a serem evitados como praga, mas como uma parte intrínseca do processo de aprendizagem.

Ken era um aluno de 5ª série que somava 35 e 35 e obtinha 610. Seu *bug* aparecia claramente. Desde que 32 mais 32 são 64, então 35 mais 35 deveria ser 610. Ken entrou num melhor relacionamento com a matemática quando ele aprendeu a ver seu erro como um engodo que o formalismo matemático nos prega. Os franceses *podem* dizer setenta como "soixante dix", "sessenta-dez", mas embora eles possam escrever sessenta e cinco como 65 não podem escrever "sessenta-dez" como 610. Este símbolo foi reservado para significar outra coisa.

Superficialmente, parece que Ken teve má intuição sobre números. Mas este diagnóstico é absolutamente errado. Quando se lhe perguntava: "Se você tivesse 35 cruzeiros e conseguisse outros 35 cruzeiros, você teria então Cr\$ 610?" Sua resposta era um enfático "de maneira nenhuma". Quando perguntado sobre quanto ele teria, ele voltava-se ao cálculo

usando papel e lápis, riscava o zero de 610, e vinha com uma nova resposta de 61 que intuitivamente não está tão fora. Seu problema não é má intuição ou conceito de número. Do ponto de vista de um cientista da computação, pode-se reconhecer várias dificuldades, todas elas compreensíveis e corrigíveis.

Em primeiro lugar, ele dissocia a operação do procedimento do seu arsenal geral de conhecimentos. Um procedimento melhor teria um "controle de erro" embutido nele. Como Ken podia reconhecer o erro quando este lhe era mostrado, certamente teria sido capaz de estabelecer um procedimento que incluísse alertas a ele mesmo. Em segundo lugar, ao encontrar o erro, Ken não mudou nem sequer consultou o procedimento, mas apenas mudou a resposta. Terceiro, meu conhecimento de Ken me diz por que ele não tentou mudar o procedimento. Na época deste incidente, ele não reconhecia procedimentos como entidades, como coisas que se podia nomear, manipular, ou modificar. Assim, a correção de seus procedimentos está na verdade muito distante de sua consciência. A idéia de procedimentos como coisas que podem ser corrigidas é um conceito poderoso e difícil para muitas crianças, até que elas tenham acumulado experiência trabalhando com eles.

Tenho visto crianças como Ken superar esse tipo de dificuldade depois de alguma experiência escrevendo programas num ambiente LOGO. Mas por que as crianças não aprendem a manipular procedimentos com a experiência da vida cotidiana? Todo mundo trabalha com procedimentos na vida diária. Brincar com um jogo ou dar instruções a um motorista perdido são exercícios de pensamento usando procedimentos. Mas na vida cotidiana os procedimentos são vividos e usados, não são necessariamente objeto de reflexão. No ambiente LOGO, um procedimento torna-se uma coisa que recebe nome, pode ser manipulada e reconhecida à medida que as crianças adquirem a idéia de procedimento. O efeito disso em alguém como Ken é que a experiência do cotidiano com procedimentos e programação torna-se agora um recurso para fazer a matemática formal na escola. As leis de movimento de Newton tornaram-se vivas quando usamos a metáfora computacional para vinculá-las a coisas mais poderosas tanto do ponto de vista pessoal como conceitual. A geometria criou vida quando a conectamos aos seus precursores perten-

centes às experiências humanas mais fundamentais: a experiência do próprio corpo no espaço. Similarmente, a matemática formal adquirirá vida quando pudermos desenvolver, para cada aprendiz, vínculos com seus precursores de procedimentos. E estes precursores realmente existem. A criança realmente tem conhecimento de procedimento e o utiliza em muitos aspectos de sua vida, seja planejando estratégias para um jogo da velha ou dando instruções a um motorista extraviado. Mas frequentemente a mesma criança não o utiliza para fazer aritmética na escola.

A situação é exatamente como a encontrada no diálogo entre GAL e ARI, e no uso do modelo do círculo da Tartaruga para mudar a intuição sobre circularidade, usados nos problemas do barbante e da moeda. Em todos estes casos, estamos interessados em como uma idéia poderosa faz parte do pensamento intuitivo. Não tenho receita para desenvolver a intuição duma criança para saber quando e como usar idéias de procedimento, mas creio que o melhor que poderemos fazer é o que sugere a metáfora de vir a conhecer uma nova pessoa. Podemos ajudar como educadores criando condições para as crianças usarem um pensamento de procedimento de forma efetiva e divertida. E podemos ajudar dando-lhes acesso a muitos conceitos relacionados com procedimento. Isto é atingido através do conteúdo conceitual do ambiente LOGO.

Neste livro tenho argumentado claramente que o pensamento de procedimento é uma ferramenta intelectual poderosa e até sugeri fazer analogia de si mesmo com o computador como uma estratégia para ajudar a conseguir isto. As pessoas temem frequentemente que usar modelos computacionais para pessoas levará a um pensamento mecânico ou linear. Elas se preocupam com que as pessoas percam o respeito pelas suas intuições, valores, poder de julgamento. Elas se preocupam com que a lógica instrumental se torne um modelo para boa reflexão. Eu considero esses temores muito seriamente mas não os vejo como temores sobre o próprio computador mas sim como temores a respeito de como a nossa cultura assimilará a presença do computador. O conselho "pense como um computador" pode ser entendido como significando que *sempre* se deva pensar sobre tudo como um computador. Isto seria restritivo e limitativo. Mas o

conselho poderia ser entendido num sentido muito diferente, não excluindo nada, mas fazendo um poderoso acréscimo à coleção de ferramentas mentais de uma pessoa. Em compensação, nada tem que ser eliminado. Sugerir que se deva deixar um método antigo para poder adotar um outro novo implica uma teoria de psicologia humana que me parece ingênua e sem base. No meu ponto de vista, um aspecto proeminente da inteligência humana é sua habilidade em operar com muitas maneiras de conhecimento, frequentemente em paralelo, de forma que algo possa ser entendido em vários níveis. Na minha experiência, o fato de pedir a mim mesmo para "pensar como um computador" não exclui outras epistemologias. Simplesmente abre novos caminhos para abordar a reflexão. A assimilação cultural da presença do computador dará origem a um ensino sobre computador. Esta frase muitas vezes é interpretada como saber programar ou conhecer os vários usos do computador. Mas a verdadeira alfabetização computacional não é apenas saber como usar o computador e as idéias computacionais. É saber quando é apropriado fazê-lo.

As raízes do LOGO: Piaget e a inteligência artificial

O leitor já encontrou uma variedade de situações de aprendizagem reunidas por um conjunto comum de idéias sobre o que contribui para uma aprendizagem efetiva. Neste capítulo abordaremos diretamente essas idéias e as fontes teóricas em que elas se apóiam. Dentre estas, focalizaremos duas: primeiro a influência piagetiana, e, segundo, a influência da teoria computacional e da inteligência artificial.

Já falei anteriormente da "aprendizagem piagetiana", a aprendizagem espontânea, natural, da pessoa interagindo com o seu ambiente, em contraste com a aprendizagem dirigida por currículos característicos da escola tradicional. Mas a contribuição de Piaget ao meu trabalho foi muito mais profunda, mais teórica e filosófica. Neste capítulo apresentarei um Piaget muito diferente do que o esperado pela maioria das pessoas. Não falaremos de estágios, nenhuma ênfase será dada ao que as crianças de uma certa idade podem ou não fazer. Ao invés disto, estarei preocupado com o Piaget epistemólogo, em como suas idéias têm contribuído para a teoria do conhecimento da aprendizagem que tenho descrito, uma teoria que não divorcia o estudo de como a matemática é aprendida do estudo da própria matemática.

Penso que esses aspectos epistemológicos do pensamento

piagetiano têm sido negligenciados porque até agora eles não ofereceram nenhuma oportunidade de ação dentro do mundo educacional tradicional. Mas, num ambiente escolar enriquecido pelo computador, ambiente este da próxima década, isto não será o caso. No Capítulo 5 e no desenvolvimento da própria idéia de Tartaruga, vimos exemplos de como uma investigação epistemológica do que é fundamental num setor da matemática, o de sistemas diferenciais, já tem resultado em planos educacionais concretos e efetivos. O Piaget da teoria dos estágios é essencialmente conservador, quase reacionário, enfatizando o que as crianças não podem fazer. Eu me empenho em revelar um Piaget mais revolucionário, cujas idéias epistemológicas podem expandir as fronteiras conhecidas da mente humana. Durante todos esses anos isto não pôde ser realizado pela ausência de meios de implementação, agora disponíveis através da tecnologia do computador matético.

O Piaget apresentado neste capítulo é novo também em outro sentido. Ele é colocado num esquema teórico baseado num aspecto do universo computacional ao qual ainda não nos referimos diretamente, mas cujas perspectivas têm estado implícitas ao longo de todo o livro, ou seja, a inteligência artificial, ou IA. A definição de inteligência artificial pode ser restrita ou ampla. Em sentido restrito, a IA preocupa-se em estender a capacidade das máquinas para desempenhar funções que seriam consideradas inteligentes se desempenhadas por pessoas. Seu objetivo é construir máquinas e, como tal, pode ser pensada como um ramo da engenharia avançada. Mas, para construir tais máquinas, geralmente é necessário refletir não apenas sobre a natureza das máquinas mas também sobre a natureza das funções inteligentes a serem desempenhadas.

Por exemplo, para fazer uma máquina que possa ser instruída em linguagem natural, é necessário pesquisar em profundidade a natureza da língua. Para se fazer uma máquina capaz de aprender, é necessário pesquisar profundamente a natureza da aprendizagem. E desse tipo de pesquisa deriva a definição mais ampla de inteligência artificial: a de uma ciência cognitiva. Neste sentido, IA partilha seu domínio com outras disciplinas mais antigas, tais como lingüística e a psicologia. Mas o que distingue a IA é sua metodologia e estilo de teorização, fortemente embasados nas teorias de computa-

ção. Neste capítulo usaremos esse estilo de teorização de várias maneiras: primeiro, para reinterpretar Piaget; segundo, para desenvolver teorias de aprendizagem e compreensão que informem nosso planejamento de situações educacionais; e, terceiro, de um modo um tanto fora do comum. O objetivo da IA é dar forma concreta a idéias sobre o pensamento que antes pareciam abstratas, até mesmo metafísicas. É esta qualidade de concretização que fez as idéias de IA tão atrativas para muitos psicólogos contemporâneos. Propomos ensinar IA às crianças para que elas também possam pensar mais concretamente a respeito dos processos mentais. Enquanto os psicólogos usam idéias da IA para construir teorias científicas formais sobre processos mentais, as crianças usam essas mesmas idéias de um modo mais pessoal e informal para pensar a respeito de si mesmas. E, obviamente, acredito que isto seja uma coisa boa, pois a habilidade de articular os processos do pensamento nos dá a chance de melhorá-los.

Piaget se descreveu a si mesmo como um epistemólogo. Qual o significado que ele dá a isso? Quando ele fala sobre o desenvolvimento infantil, ele está realmente falando sobre o desenvolvimento do conhecimento. Esta afirmação nos leva a um contraste entre as maneiras epistemológicas e psicológicas de entender a aprendizagem. Na perspectiva psicológica, a ênfase está propriamente nas leis que governam o aprendiz ao invés de estar no que está sendo aprendido. Os comportamentalistas estudam esquemas de reforço, os teóricos da motivação estudam o impulso, os gestaltistas estudam a boa forma. Para Piaget, a separação entre o processo de aprendizagem e o que está sendo aprendido é um erro. Para entender como uma criança aprende número, nós temos que estudar número. E temos que estudar número de um modo particular: devemos estudar a estrutura do número, uma tarefa séria do ponto de vista matemático. Por isso não é incomum encontrar Piaget se referindo num mesmo parágrafo ao comportamento de crianças pequenas e às preocupações dos matemáticos teóricos. Para tornar mais concreta a idéia de estudar a aprendizagem através da ênfase na estrutura do que será aprendido, observaremos um caso de aprendizagem bem concreto, da vida diária, e veremos como ele é diferente, quando visto de uma perspectiva psicológica e de uma perspectiva epistemológica.

Consideraremos o aprender a andar de bicicleta. Se não conhecêssemos o assunto, andar de bicicleta nos pareceria uma coisa realmente notável. O que o faz possível? Alguém poderia tentar responder a esta questão estudando o ciclista a fim de descobrir que atributos especiais (velocidade de reação, complexidade do funcionamento cerebral, intensidade de motivação) contribuem para seu desempenho. Este inquérito, por mais interessante que possa parecer, é irrelevante para a solução real do problema. Podemos andar de bicicleta porque a bicicleta, uma vez em movimento, é inerentemente estável. Uma bicicleta sem um ciclista, empurrada ladeira abaixo, não cairá, mas descera indefinidamente a ladeira. A construção geométrica do garfo garante que se a bicicleta se inclinar à esquerda a roda girará para a esquerda, fazendo assim que a bicicleta gire e produza uma força centrífuga que a jogue para a direita, contrapondo-se à tendência de cair. A bicicleta sem ciclista se equilibra perfeitamente bem. Com um ciclista novato cairá. Isto porque o novato possui intuições errôneas sobre equilíbrio e congela a posição da bicicleta de forma a não permitir que o mecanismo de autocorreção atue livremente. Assim, aprender a andar de bicicleta não significa aprender a se equilibrar, mas sim aprender a não se desequilibrar, a não interferir.

O que fizemos aqui foi entender um processo de aprendizagem através da aquisição de uma visão mais profunda sobre o que deve ser aprendido. Os princípios psicológicos nada têm a ver com isso. E do mesmo modo que entendemos como se anda de bicicleta estudando a bicicleta, Piaget nos ensinou que devemos entender como a criança aprende número através de um conhecimento mais profundo do que é número.

Os matemáticos interessados na natureza do número têm encarado o problema de diferentes pontos de vista. Uma abordagem, associada aos formalistas, procura entender o número estabelecendo axiomas para captá-lo. Uma segunda abordagem, associada a Bertrand Russel, procura definir o número reduzindo-o a algo mais fundamental, por exemplo, lógica e teoria de conjunto. Embora ambas as abordagens sejam válidas, capítulos importantes da história da matemática, nenhuma ilumina a questão sobre por que se pode aprender número. Mas há uma escola de matemática que consegue

fazer isso, embora essa não fosse sua intenção. É o estruturalismo da escola Bourbaki.¹ Bourbaki é o pseudônimo adotado por um grupo de matemáticos franceses que se dedicaram a articular uma teoria uniforme para as matemáticas. As matemáticas deveriam ser uma só, e não uma coleção de subdisciplinas, cada uma com linguagem e linhas de desenvolvimento próprias. Essa escola caminhou nessa direção ao reconhecer um número de pedras fundamentais, as chamadas "estruturas-mães". Estas estruturas têm algo em comum com a idéia de micromundos. Imagine um micromundo onde as coisas podem ser ordenadas mas não possuem nenhuma outra propriedade. O conhecimento de como funciona este mundo é, em termos da escola Bourbaki, a estrutura-mãe de ordem. Um segundo micromundo permite relações de proximidade, e esta é a estrutura-mãe da topologia. Um terceiro diz respeito à combinação de entidades para produzir novas entidades: esta é a microestrutura algébrica. A unificação da matemática é realizada pela escola Bourbaki através da visão de estruturas mais complexas, como a aritmética, como combinações de estruturas mais simples, das quais as mais importantes são as três estruturas-mães. Esta escola não tinha a intenção de elaborar uma teoria de aprendizagem. A intenção era fazer desta análise estrutural um instrumento técnico para uso dos matemáticos em suas tarefas cotidianas. Mas a teoria de estruturas-mães é uma teoria de aprendizagem. É uma teoria de como se pode aprender número. Mostrando como a estrutura da aritmética pode ser decomposta em estruturas mais simples, mas ainda significativas e coerentes, os matemáticos estão mostrando um caminho matético para o conhecimento numérico. Não é, pois, surpreendente que Piaget, que estava procurando explicitamente uma teoria de número que explicasse o seu desenvolvimento em crianças, desenvolvesse um conjunto similar e paralelo de construtos, e então, ao "descobrir" a escola Bourbaki, fosse capaz de usar estes construtos para elaborar os seus próprios.

Piaget observou que as crianças desenvolvem estruturas intelectuais coerentes que parecem corresponder muito de perto às estruturas-mães de Bourbaki. Por exemplo, em rela-

¹ Para comentários de Piaget sobre Bourbaki, veja J. Piaget (org.), "Logique et connaissance scientifique", in *Encyclopaedie de la Pleiade*, vol. 22 (Paris, Gallimard, 1967).

ção à estrutura de ordem de Bourbaki; de fato, desde a mais tenra idade, as crianças começam a desenvolver grande aptidão para ordenar coisas. As estruturas-mães da topologia e da álgebra parecem ter precursores de desenvolvimento similares. O que os tornam passíveis de aprendizagem? Em primeiro lugar, cada uma representa uma atividade coerente na vida da criança, que poderia em princípio ser aprendida e dotada de sentido independentemente das outras.

Em segundo lugar, a estrutura de conhecimento de cada uma tem uma espécie de simplicidade interna que Piaget elaborou na sua teoria de *agrupamentos*, que será analisada mais adiante em termos ligeiramente diferentes. Terceiro, embora essas estruturas-mãe sejam independentes, o fato de elas serem aprendidas em paralelo e de compartilharem um formalismo comum são sinais de que se apóiam mutuamente; a aprendizagem de cada uma facilita a das outras.

Piaget usou essas idéias para explicar o desenvolvimento de uma variedade de domínios do conhecimento em termos de um conjunto de estruturas com leis próprias e coerente, como processos dentro da mente da criança. Ele descreveu essas estruturas internas como estando sempre em interação com o mundo exterior, mas sua ênfase teórica foi nos eventos internos. Minha perspectiva é mais intervencionista. Meus objetivos são educacionais, não a simples compreensão. Assim, na minha própria reflexão, coloquei uma ênfase maior em duas dimensões implícitas, mas não elaboradas no trabalho de Piaget: um interesse em estruturas intelectuais que poderiam se desenvolver, em oposição às que realmente se desenvolvem presentemente na criança, e o planejamento de ambientes educacionais que estivessem em consonância com aquelas estruturas. A Tartaruga pode ser usada para ilustrar ambos os interesses: primeiro, a identificação de um conjunto poderoso de idéias matemáticas que não supomos estar representadas nas crianças, pelo menos não em forma desenvolvida; segundo, a criação de um *objeto transacional*, a Tartaruga, que pode existir no ambiente da criança e entrar em contato com as idéias. Como matemático sei que uma das idéias mais poderosas na história da ciência foi a da análise diferencial. A partir de Newton, a relação entre o global e o local determinou consideravelmente a atividade da matemática. Entretanto, esta idéia não tem tido lugar no mundo da

criança, em grande parte porque o acesso tradicional a ela depende de uma infraestrutura formal, de treino matemático. Para a maioria das pessoas, nada é mais natural do que as idéias matemáticas mais avançadas serem inacessíveis às crianças. Da perspectiva que tomei de Piaget, nós esperávamos achar conexões. De modo que saímos à procura de algumas. Mas, encontrar as conexões não significou apenas inventar um novo tipo de pedagogia, mais inteligente e "motivadora". Significou uma atividade de pesquisa que incluísse separar o que era mais poderoso na idéia de *diferencial* dos acidentes de um formalismo inacessível. Portanto, o objetivo era conectar essas estruturas cientificamente fundamentais com outras psicologicamente poderosas. E estas foram, naturalmente, as idéias subjacentes ao círculo da Tartaruga, o micromundo da física e a Tartaruga com sensor tátil.

Em que sentido o ambiente natural é uma fonte de micromundos, na realidade uma fonte para uma rede de micromundos? Vamos restringir todo ambiente natural àquelas coisas que possam servir como um recurso para um micromundo específico, o micromundo de formação de pares, de correspondência um-a-um. Muito do que a criança observa se apresenta em pares: pais e mães, garfos e facas, xícaras e pires. E ela também é solicitada a ativamente formar pares. Ela é solicitada a separar meias, colocar a mesa com um talher para cada pessoa, a distribuir balas. Quando a criança focaliza sua atenção em pares, ela está num micromundo de construção própria, um micromundo de pares, no mesmo sentido que colocamos nosso aluno nos micromundos das Tartarugas geométrica e física. Em ambos os casos, o micromundo relevante se encontra despido de complexidade, é simples, atingível. Em ambos os casos a criança é livre para brincar com os seus elementos. Embora haja limitações nos materiais, não há limites para a exploração de combinações. E, em ambos os casos, o poder do ambiente reside em ser "rico em descobertas".

No trabalho com computadores pode se tornar mais evidente que a criança constrói seus próprios micromundos pessoais. A história de Deborah no fim do Capítulo 4 é um bom exemplo. LOGO lhe deu a oportunidade de construir um micromundo particularmente arrumado, o seu "mundo de virar PARADIREITA 30". Mas ela poderia ter feito algo

semelhante em sua cabeça, sem nenhum computador. Por exemplo, ela poderia ter decidido interpretar instruções no mundo real em termos de um simples conjunto de operações. Tais eventos intelectuais geralmente não são visíveis para o observador, do mesmo modo que o meu professor de álgebra não sabia que eu usava engrenagens para pensar em equações. Mas, eles podem ser observados se olhados em detalhe. Robert Lawler, um membro do grupo LOGO do MIT, demonstrou isso claramente em sua tese de doutoramento. Lawler se propôs a observar tudo que uma criança de seis anos, a sua filha Miriam, fez durante seis meses. A riqueza de informação que obteve lhe permitiu armar um quadro da microestrutura das crescentes habilidades de Miriam. Por exemplo, durante este período Miriam aprendeu adição, e Lawler foi capaz de mostrar que isto não consistiu na aquisição de um procedimento logicamente uniforme. Um modelo mais apropriado de sua aprendizagem de adição é que ela usou em sua relação operacional uma quantidade de micromundos idiossincráticos, cada um dos quais poderia ser rastreado a experiências previamente identificáveis.

Eu disse que Piaget é um epistemólogo, mas não elaborei de que tipo. Epistemologia é a teoria do conhecimento. Esse termo poderia, de acordo com sua etimologia, ser usado para abranger todo conhecimento sobre conhecimento, mas tem sido tradicionalmente usado de um modo um tanto especial, ou seja, para descrever o estudo das condições de validade do conhecimento. A epistemologia de Piaget não se preocupa com a validade do conhecimento, mas com sua origem e desenvolvimento. Ele se preocupa com a gênese e evolução do conhecimento, e salienta esse fato ao descrever seu campo de estudo como "epistemologia genética". A epistemologia tradicional é vista muitas vezes como um ramo da filosofia. A epistemologia genética trabalha para se afirmar como ciência. Seus estudiosos colhem dados e desenvolvem teorias sobre como o conhecimento se desenvolveu, algumas vezes focalizando a evolução do conhecimento na história, outras a evolução do conhecimento no indivíduo. Mas não supõem que esses dois campos sejam autônomos: tentam compreender as relações entre eles. Estas relações podem assumir diferentes formas.

No caso mais simples, o desenvolvimento individual é

paralelo ao desenvolvimento histórico, recordando o ditado dos biólogos, a ontogenia recapitula a filogenia. Por exemplo, as crianças representam uniformemente o mundo físico de uma maneira aristotélica, crendo, por exemplo, que as forças atuam sobre a posição e não sobre a velocidade. Em outros casos, a relação é mais complexa, na verdade, chega ao ponto de reversão. As estruturas intelectuais que primeiramente aparecem no desenvolvimento infantil são algumas vezes características não da ciência primitiva mas da ciência mais moderna. Assim, por exemplo, a estrutura-mãe da topologia aparece muito cedo no desenvolvimento infantil, mas a própria topologia apareceu como uma subdisciplina da matemática somente nos tempos modernos. Somente quando a matemática se tornou suficientemente avançada é que foi capaz de descobrir suas próprias origens.

Na primeira parte do século XX, a lógica formal era vista como sinônimo de fundamentação da matemática. Só quando apareceu a teoria estruturalista da escola Bourbaki é que se pôde ver um desenvolvimento interno na matemática que abriu o campo para a "lembrança" de suas raízes genéticas. E através do trabalho da epistemologia genética, essa "lembrança" coloca a matemática num relacionamento mais próximo possível com o desenvolvimento da pesquisa sobre como a criança constrói sua realidade.

A epistemologia genética chegou a enunciar um conjunto de homologias entre as estruturas do conhecimento e as estruturas da mente que se formam para aprender esse conhecimento. As estruturas-mãe de Bourbaki não são apenas os elementos subjacentes ao conceito de número; ao contrário, as homologias são encontradas na mente à medida que o número se constrói por si mesmo. Assim, a importância de se estudar a estrutura do conhecimento não é apenas para uma melhor compreensão do conhecimento em si, mas para compreender o ser humano.

A investigação da estrutura deste processo dialético se traduz na crença de que nem a pessoa nem o conhecimento — incluindo a matemática — pode ser atingido isoladamente de maneira completa, uma crença que foi eloquentemente expressa por Warren McCulloch, que, junto com Norbert Wiener, deveria ser reconhecido como fundador da cibernética. Quando indagado, na juventude, sobre que questiona-

mento guiaria sua vida científica, McCulloch respondeu: "O que é um homem, feito de tal modo que pode compreender número e o que é número, feito de tal modo que um homem pode entendê-lo."

Para McCulloch, assim como para Piaget, o estudo do ser humano e o estudo do que ele aprende e pensa são inseparáveis. Talvez paradoxalmente para alguns, a pesquisa da natureza desse relacionamento inseparável tem progredido através do estudo das máquinas e do conhecimento que elas podem encarnar. E é para essa metodologia de pesquisa, a da inteligência artificial, que agora nos dirigimos.

Na inteligência artificial, os pesquisadores usam modelos computacionais para atingir uma percepção profunda da psicologia humana, assim como para refletir sobre a psicologia humana como uma fonte de idéias a respeito de como fazer mecanismos provocarem a inteligência humana. Este empreendimento se apresenta para muitos como sendo ilógico: mesmo quando o desempenho parece idêntico, há alguma razão para pensar que os processos subjacentes são os mesmos? Outros o acham ilícito: a linha divisória entre homem e máquina é vista como imutável tanto pela teologia como pela mitologia. Há um medo de que tornaremos desumano o que é essencialmente humano, através de analogias impróprias entre nossos "julgamentos" e os "cálculos" do computador. Aceito essas objeções com muita seriedade, mas sinto que elas são baseadas numa visão da inteligência artificial que é mais reducionista que qualquer coisa que me interessa pessoalmente. Uma pequena parábola e uma justificativa por analogia, meio humorística, expressa minha própria visão sobre o assunto.

Os homens sempre estiveram interessados em voar. Era uma vez um grupo de cientistas que estavam determinados a entender como os pássaros voam. Primeiro eles observaram os pássaros, na esperança de correlacionar o movimento das asas com o seu movimento ascendente. Depois eles fizeram experimentos e descobriram que se depenassem as aves elas não poderiam mais voar. Tendo desse modo determinado que as penas eram os órgãos do voo, os cientistas então focalizaram seus esforços na investigação microscópica e ultramicroscópica das penas a fim de descobrir a natureza de seu poder de voar.

Na realidade, a compreensão atual de como as aves voam não foi obtida através de um estudo focalizado restritamente nas aves, e de forma alguma foi obtida pelo estudo das penas. Ao contrário, ela veio de estudos de fenômenos de diferentes tipos e utilizando metodologias diferentes. Algumas pesquisas envolveram altos estudos matemáticos das leis de movimento de um fluido ideal. Outras pesquisas, mais próximas do nosso argumento central, consistiram em construir máquinas para “vôo artificial”. E, naturalmente, devemos acrescentar à lista a observação real do vôo dos pássaros. Todas essas atividades de pesquisa sinergicamente deram origem à ciência aeronáutica através da qual compreendemos o “vôo natural” das aves e o “vôo artificial” dos aviões. E é no mesmo espírito que imagino diversas pesquisas em matemática e em inteligência de máquinas agindo sinergicamente com a psicologia para originar uma disciplina de ciência cognitiva cujos princípios se aplicariam à inteligência natural e artificial.

É instrutivo transpor para o contexto de vôo as objeções comumente levantadas contra a IA. Isto nos leva a imaginar céticos que diriam: “Vocês matemáticos tratam de fluidos ideais — a atmosfera real é enormemente mais complicada” ou “Você não tem razão em supor que aves e aviões operam do mesmo modo — aves não têm propulsores, aviões não têm penas”. Mas as premissas desses criticismos são verdadeiras apenas superficialmente: o mesmo *princípio* (isto é, a lei de Bernoulli) aplica-se tanto a fluidos reais como ideais, e ele se aplica tanto se o fluido flui sobre uma pena ou sobre uma asa de alumínio.

Os que trabalham na área de “estudos cognitivos” de IA não partilham uma única maneira de pensar sobre o pensamento, como tampouco o fazem os psicólogos tradicionais. Alguns utilizam o modelo do computador para reduzir todo pensamento às operações formais de sistemas dedutivos poderosos. Aristóteles conseguiu formular regras dedutivas para uma pequena área do pensamento humano, em silogismos simples como “Se todos os homens são mortais e Sócrates é homem, logo Sócrates é mortal”. No século XIX, os matemáticos foram capazes de estender esse tipo de raciocínio a uma área maior, mas de certo modo ainda restrita. Somente no contexto dos métodos computacionais houve uma séria

tentativa de estender a lógica dedutiva para abranger todas as formas de raciocínio, inclusive o de senso comum e o raciocínio por analogia. Trabalhar com este tipo de modelo dedutivo era muito popular nos primeiros anos da IA. Em anos recentes, entretanto, muitos dos que trabalham na área têm adotado uma estratégia quase diametralmente oposta. Em vez de procurar poderosos métodos dedutivos que permitiriam tirar conclusões surpreendentes de princípios gerais, a nova abordagem presume que as pessoas são capazes de pensar somente porque elas podem recorrer a reservas mais amplas de conhecimentos particulares e específicos. Mais frequentemente do que imaginamos, resolvemos problemas porque “quase já sabemos a resposta”. Alguns pesquisadores tentam fazer programas serem inteligentes, por meio do processo de dar a esses programas uma tal quantidade de conhecimento que a maior parte da solução de um problema consiste na recuperação desse conhecimento de algum lugar da memória.

Dado meus antecedentes como matemático e psicológico piagetiano, eu me tornei naturalmente mais interessado nos tipos de modelos computacionais que talvez pudessem me conduzir a uma melhor reflexão sobre processos de desenvolvimento poderosos: a aquisição do pensamento espacial e a habilidade de lidar com tamanho e quantidade. As abordagens rivais — baseadas em conhecimento e dedução — tendiam a governar o desempenho de um dado sistema intelectual, cuja estrutura, senão cujo conteúdo, permanecia estática. O tipo de questões de desenvolvimento que me interessavam precisavam de um modelo dinâmico para explicar como as próprias estruturas intelectuais podiam nascer e se modificar. Creio que esses são os tipos de modelos que são os mais relevantes para a educação.

A melhor maneira que conheço para caracterizar essa abordagem é dar uma amostra de uma teoria notoriamente influenciada por idéias da computação, que pode nos ajudar a compreender um fenômeno psicológico específico: a conservação piagetiana. Recordamos que até a idade de seis ou sete anos, as crianças crêem que a quantidade de líquido pode aumentar ou diminuir quando despejada de um recipiente para outro. Especificamente, quando o segundo recipiente é mais alto e mais estreito que o primeiro, as crianças afirmam,

unanimemente, que a quantidade de líquido aumentou. E então, como se fosse mágica, por volta da mesma idade, todas as crianças mudam de opinião: agora elas insistem de modo igualmente inequívoco em que a quantidade de líquido permanece a mesma.

Muitas teorias foram propostas para explicar como isto ocorre. Uma delas, que parece mais familiar por recorrer a categorias psicológicas tradicionais, atribui a posição pré-conservacionista ao fato da criança estar dominada pelas "aparências". O "raciocínio" da criança não pode prevalecer sobre as coisas "como parecem ser". São as leis de percepção.

Vamos agora nos dirigir a outra teoria, desta vez inspirada em métodos computacionais. Outra vez perguntamos: por que a altura num vaso estreito parece maior para a criança, e como isto se modifica?

Suponhamos a existência de três agentes na mente da criança, cada um julgando quantidades de uma maneira "simplista" diferente.* O primeiro A_{altura} julga a quantidade de líquido ou de qualquer outra coisa por sua extensão vertical. A_{altura} é um agente prático na vida da criança. Está acostumado a comparar crianças colocando-as de costas uma à outra, e a igualar as quantidades de guaraná e chocolate nos copos. Enfatizamos que A_{altura} não faz nada complicado, como "perceber" a quantidade de líquido. Ao contrário, é dedicado de modo fanático a um princípio abstrato: qualquer coisa mais alta é maior.

Há um segundo agente, chamado A_{largura} , que julga pela extensão horizontal. Não é tão utilizado como A_{altura} . Tem a sua oportunidade de julgar que há muita água no oceano, mas na mente da criança é um princípio menos influente que A_{altura} .

Finalmente, há um agente chamado $A_{\text{história}}$, que diz que a quantidade é a mesma porque no início era a mesma. $A_{\text{história}}$ parece falar como uma criança conservadora, mas isto é uma ilusão. $A_{\text{história}}$ não tem entendimento e diria que a quantidade

* As perspectivas computacionais sobre conservação descritas adiante são um panorama altamente esquematizado e simplificado de como este fenômeno seria explicado por uma teoria, "A Sociedade da Mente", que está sendo desenvolvida por Marvin Minsky e o autor, a ser discutida num próximo livro.

é a mesma mesmo que na realidade algo tenha sido adicionado.

No experimento com a criança pré-conservacionista, cada um dos três agentes toma sua própria "decisão" e luta para ela ser adotada. Como sabemos, A_{altura} fala mais alto. Mas isto se modifica à medida que a criança passa para o próximo estágio.

Dada a suposição da existência desses agentes, há três maneiras pelas quais essa mudança pode acontecer. A_{altura} e A_{largura} poderiam se tornar mais "sofisticados", por exemplo, A_{altura} poderia se desqualificar a si mesmo exceto se todas as outras coisas fossem iguais. Isto significaria que A_{altura} somente entraria para julgar pela altura aquelas coisas que fossem iguais na seção horizontal. Segundo, poderia haver uma mudança em "senhoridade", em prerrogativa: $A_{\text{história}}$ poderia se tornar a voz dominante. Nenhum desses dois modos de mudança é impossível. Mas há um terceiro modo que produz o mesmo efeito de forma mais simples. Sua idéia chave é que A_{altura} e A_{largura} se neutralizam mutuamente quando dão opiniões contraditórias. A idéia é atraente (e próxima ao próprio conceito de Piaget da composição de operações semelhantes a grupos) mas levanta alguns problemas. Por que os três agentes não se neutralizam mutuamente de modo a que a criança não tenha nenhuma opinião? A questão é respondida por outro postulado (que tem muito em comum com a idéia de Piaget de que os operadores intelectuais são organizados em *agrupamentos*). O princípio de neutralização torna-se operativo se se impõe aos agentes A_{altura} e A_{largura} uma estrutura suficiente para que se achem numa relação mútua especial, mas não com $A_{\text{história}}$. Vimos que a técnica de criar uma nova entidade funciona de forma poderosa nos sistemas de programação. E este é o processo que postulamos aqui. Surge uma nova entidade, um novo agente. Este é A_{geom} , que age como supervisor de A_{altura} e A_{largura} . Nos casos em que A_{altura} e A_{largura} concordam, A_{geom} transmite sua mensagem com grande "autoridade". Mas se eles discordam, A_{geom} é solapado e as vozes de seus subordinados são neutralizadas. Deve ser enfatizado que não é função de A_{geom} "compreender" as razões das decisões tomadas por A_{altura} e A_{largura} . A_{geom} apenas sabe distinguir se eles concordam, e em que direção o fazem.

Este modelo é absurdamente simplificado ao sugerir que

um elemento tão simples do pensamento infantil (como esta conservação) pode ser entendido em termos de quatro agentes. Dezenas e centenas de agentes são necessários para dar conta da complexidade do processo real. Mas, apesar de sua simplicidade, o modelo explica com precisão alguns dos princípios da teoria: em particular, que os componentes do sistema são mais como pessoas do que como proposições, e que suas interações são mais como interações sociais do que como operações de lógica matemática. Essa mudança de perspectiva nos permite resolver muitos problemas técnicos da psicologia do desenvolvimento. Em especial, podemos compreender a aprendizagem lógica como um contínuo com a aprendizagem social e corporal.

Eu disse que esta teoria é inspirada por uma metáfora computacional. Alguém poderia perguntar como. A "teoria" pode parecer nada mais do que uma conversa antropomórfica. Mas já vimos que descrições antropomórficas são frequentemente um passo em direção às teorias computacionais. E o vigor da teoria da "sociedade da mente" é que os agentes podem ser traduzidos em modelos computacionais precisos. Enquanto pensarmos sobre os agentes como "pessoas", a teoria é circular. Ela explica o comportamento de pessoas em termos do comportamento de pessoas. Mas, se pudermos refletir sobre esses agentes como sendo entidades computacionais mais bem definidas, similares aos subprocedimentos VE, LINHA e CABEÇA no procedimento HOMEM, tudo se torna mais claro. Mesmo em programas pequenos nós vimos como módulos muito simples podem ser reunidos para produzir resultados complexos.

O argumento computacional livra a teoria da "sociedade da mente" da acusação de apoiar-se num círculo vicioso. Mas não a livra de ser circular: pelo contrário, como programas recursivos, no estilo do procedimento SPI do Capítulo 3, a teoria deriva muito do seu poder do uso construtivo da "lógica circular". Um lógico tradicional, vendo como SPI foi definido por referência a SPI, poderia ter objetado, mas os programadores de computador e os epistemólogos genéticos partilham uma visão na qual este tipo de auto-referência não é só legítima como necessária. E ambos a vêem como possuindo um elemento do paradoxo que é apenas parcialmente capturado ao se observar como as crianças usam sua

lógica "inferior" para construir a lógica "superior" da próxima fase do desenvolvimento. Ao longo de sua longa carreira Piaget enfatizou crescentemente a importância, para o crescimento intelectual, da habilidade da criança refletir sobre seu próprio pensamento. O "paradoxo matético" reside no fato de que esta reflexão deve ocorrer dentro do sistema intelectual da criança.

Apesar de seu *status* super-simplificado, quase metafórico, a explicação da conservação em termos dos quatro agentes captura um elemento do paradoxo. Um lógico matético talvez gostaria de impor aos agentes A_{altura} e A_{largura} um agente superior, capaz de calcular ou ao menos estimar o volume, usando a altura e a seção horizontal. Muitos educadores talvez gostassem de impor tal fórmula à criança. Mas isso seria introduzir um elemento estranho no sistema intelectual pré-conservacionista da criança. Nosso A_{geom} pertence firmemente ao sistema da criança. Ele pode ter sido até mesmo derivado do modelo de um pai que não consiga impor ordem na família. É possível especular, embora eu não tenha evidência, que a emergência da conservação se relacione à crise edipiana da criança. Sinto-me em terreno firme ao conjecturar que algo como A_{geom} pode se tornar importante porque mantém tão fortemente a relação bilateral que foi usada para conceber a Tartaruga: ele se relaciona ao mesmo tempo com estruturas que estão firmemente estabelecidas, como a representação infantil da figura da autoridade, e os germes de importantes idéias matemáticas, como a idéia de "cancelamento".

Os leitores familiarizados com os escritos técnicos de Piaget reconhecerão este conceito de germe como um dos princípios de seus "agrupamentos". Eles portanto poderão achar nosso modelo não muito diferente do de Piaget. Num sentido fundamental, eles estariam corretos. Mas um novo elemento é introduzido ao se dar um papel especial às estruturas computacionais: o tema deste livro tem sido a idéia de explorar esse papel especial dando às crianças acesso às culturas computacionais. Se, e somente se, estas culturas tiverem as estruturas corretas elas poderão aumentar grandemente a habilidade da criança de representar estruturas estabelecidas de maneira que mobilizarão seu potencial conceitual.

Recapitulando, nossa reinterpretção da teoria piagetiana estabelece três pontos. Primeiro, fornece uma teoria

psicológica específica, altamente competitiva, por sua parcimônia e poder de explicação, com outras na área. Segundo, ela nos mostra o poder de um princípio computacional específico, neste caso a teoria de procedimentos puros, ou seja, procedimentos que podem ser isolados e usados de um modo modular. Terceiro, ela concretiza meu argumento sobre como linguagens diferentes podem influenciar as culturas que crescem ao redor dessas linguagens. Nem todas as linguagens de programação encarnam esta teoria de procedimentos puros. Quando isto ocorre, seu papel como metáforas para questões psicológicas é severamente afetada. A analogia entre inteligência artificial e vão artificial demonstrou que o mesmo princípio pode estar subjacente aos fenômenos naturais e artificiais, não importando quão diferentes estes fenômenos possam parecer. A dinâmica da ascensão é fundamental ao vão como tal, sejam os voadores de carne e osso ou de metal. Acabamos de ver um princípio que pode ser fundamental para as inteligências humana e artificial: o princípio de modularidade epistemológica. Têm havido muitas discussões sobre se a máquina ideal para alcançar inteligência seria analógica ou digital, e sobre se o cérebro é analógico ou digital. Do ponto de vista da teoria que estou propondo aqui, esses argumentos são ultrapassados. A questão importante não é se o cérebro ou o computador são discretos mas se o conhecimento pode ser modularizado.

Para mim, nossa habilidade em usar metáforas computacionais como portadoras de novas teorias psicológicas tem implicações com relação à questão de para onde estão indo as teorias do conhecimento e para onde estamos indo como produtores e portadores de conhecimento. Estas áreas não são independentes. Em capítulos anteriores foi sugerido que o modo como pensamos o conhecimento afeta o modo como pensamos sobre nós mesmos. Em particular, nossa imagem do conhecimento como sendo dividido em diferentes tipos nos leva a uma visão das pessoas como divididas segundo suas aptidões. Isto por seu turno nos leva a uma balcanização* da nossa cultura.

* Divisão de uma região ou território em unidades pequenas, e freqüentemente, hostis. Relativo à divisão dos Bálcãs pelas grandes potências no começo do século XX (N.T.).

Talvez o fato de eu ter falado tão negativamente da balcanização de nossa cultura e tão positivamente sobre a modularização do conhecimento requeira alguns esclarecimentos. Quando o conhecimento pode ser separado em "pedaços do tamanho da mente", ele é mais comunicável, mais assimilável, mais fácil de ser construído. O fato de dividirmos o conhecimento em mundos científico e humanístico define algum conhecimento como sendo *a priori* incomunicável a certos tipos de pessoas. Nosso compromisso com a comunicação não se expressa apenas através de nosso compromisso com a modularização, que a facilita, mas através de nossa tentativa de achar uma linguagem para domínios tais como a física e a matemática, que possuem como sua essência a comunicação entre entidades que podem ser construídas. Reescrevendo as leis de Newton como afirmações sobre como partículas (ou "Tartarugas newtonianas") se comunicam entre si, nós fornecemos uma alça que pode ser facilmente agarrada por uma criança ou por um poeta.

Considere outro exemplo de como nossa concepção de conhecimento pode subverter nossa imagem de nós mesmos como agentes intelectuais. Os educadores sustentam algumas vezes um ideal de conhecimento dotado de um tipo de coerência definida pela lógica formal. Mas esses ideais têm pouca semelhança com a experiência que as pessoas têm de si mesmas. A experiência subjetiva do conhecimento se assemelha mais ao caos e à controvérsia de agentes competindo entre si do que à certeza e à ordem de p implica q . A discrepância entre a nossa própria experiência e a nossa idealização do conhecimento tem um efeito: nos intimida, reduz a imagem da nossa competência, e nos conduz a usar estratégias contraproduativas para aprender e pensar.

Muitos estudantes mais velhos foram intimidados a ponto de abandonar a escola, e o que é verdade para adultos é duplamente verdadeiro em relação a crianças. Já vimos que apesar da sua própria experiência como construtora de teoria, a criança não é respeitada como tal. E essas contradições são complicadas pela sustentação de um ideal de conhecimento que não se conforma ao pensamento de ninguém. Muitas crianças e universitários que decidem "eu jamais poderei ser um matemático ou cientista" estão refletindo a discrepância entre a maneira que eles são levados a acreditar como o mate-

mático deve pensar e a maneira de pensar deles próprios. De fato a verdade é outra: seu próprio pensamento é muito mais semelhante ao do matemático do que ambos são semelhantes ao ideal lógico.

Eu falei da importância de idéias poderosas para apreender o mundo. Mas mal poderíamos aprender uma nova idéia se cada vez que o fizéssemos tivéssemos que reorganizar totalmente nossas estruturas cognitivas a fim de usá-las, ou se tivéssemos que nos assegurar de que não foi introduzida nenhuma incoerência. Embora as idéias poderosas tenham a capacidade de nos ajudar a organizar nossa maneira de pensar sobre uma classe particular de problemas (como problemas de física), *nós não temos* que nos reorganizar para poder usá-las. Colocamos nossas habilidades e estratégias heurísticas em uma espécie de caixa de ferramentas — e enquanto a interação deles pode, com o passar do tempo, dar origem a mudanças globais, o ato de aprender, em si mesmo, é um evento local.

A natureza local da aprendizagem é vista na minha descrição da aquisição da conservação. Os agentes necessários entraram no sistema localmente; os seus objetivos gerais estavam em contradição recíproca; o agente que finalmente os reconcilia os deixa em seus lugares. Não há motivo algum para que essa “teoria de remendo” de construção de teoria seja considerada adequada apenas para a descrição da aprendizagem infantil. A pesquisa em inteligência artificial está aos poucos nos dando um sentido mais seguro da gama de problemas que podem ser significativamente resolvidos usando o modelo que esboçamos para o problema da conservação: com agentes modulares, cada um com sua simplicidade própria, muitos em conflitos entre si. Os conflitos são regulados e mantidos sobre controle ao invés de “resolvidos” através da intervenção de agentes especiais não menos simplistas que os originais. Seu modo de reconciliar diferenças não envolve forçar o sistema dentro de um molde logicamente coerente.

O processo lembra as explorações com algo novo a fim de se familiarizar com ele; a aprendizagem consiste em construir um conjunto de materiais e ferramentas que podem ser manejadas e manipuladas. Talvez, em essência, se trate de um processo de trabalhar com o que se tem. Todos estamos familiarizados com este processo no nível consciente, por

exemplo, quando abordamos um problema empiricamente, experimentando todas as coisas que sabemos que funcionaram anteriormente em problemas semelhantes. Mas aqui eu sugiro que trabalhar com o que se tem é uma forma abreviada de um processo de aprendizagem mais profundo, até mesmo um processo de aprendizagem inconsciente. O antropólogo Claude Lévi-Strauss² usou termos semelhantes para descrever o tipo de construção de teoria que é característico da ciência primitiva. Esta é uma ciência do concreto, onde as relações entre os objetos naturais em todas as suas combinações e recombinações fornecem um vocabulário conceitual para a construção de teorias científicas. Aqui eu estou sugerindo que, no sentido mais fundamental, nós, como aprendizes, somos todos *bricoleurs*³. Isto nos conduz ao segundo tipo de implicação de nossa teoria computacional de agentes. Se a primeira implicação teve a ver com o impacto em nossa maneira de pensar o conhecimento e a aprendizagem, a segunda tem a ver com possíveis impactos em nossa imagem de nós mesmos como aprendizes. Se *bricolage* é um modelo de como legítimas teorias científicas são construídas, então nós podemos começar a desenvolver um maior respeito por nós próprios como *bricoleurs*. E isto, naturalmente, une nosso tema central da importância e poder da aprendizagem piagetiana. A fim de criar condições para orientar o que agora é aprendizagem não-piagetiana para o lado de Piaget, nós deveremos ser capazes de agir de boa fé. Nós devemos sentir que este processo não desnaturaliza o conhecimento.

Termino este capítulo sobre teoria cognitiva e pessoas com uma conjectura. Anteriormente eu disse que não apresentaria Piaget como um teórico dos estágios. Mas a reflexão sobre os estágios piagetianos fornece um contexto para demonstrar um ponto importante sobre o possível impacto da

² C. Lévi-Strauss, *Structural Anthropology*, 2 vols., (Nova Iorque, Basic Books, 1963-76).

³ Lévi-Strauss usa a palavra *bricolage* como um termo técnico para descrever o trabalho que é realizado usando intuição e pouco planejamento, como o que discutimos. *Bricoleur* é a palavra para denominar alguém que se engaja em *bricolage*. Estes conceitos foram desenvolvidos num contexto computacional por Robert Lawler em “One Child’s Learning: An Intimate Study” (tese de doutoramento, MIT, 1979).

cultura computacional sobre as pessoas. Piaget vê seus estágios de desenvolvimento cognitivo como invariáveis, e numerosas pesquisas interculturais parecem ter confirmado a validade de sua opinião. De sociedade em sociedade, as crianças parecem desenvolver as capacidades cognitivas na mesma ordem. Em particular seu estágio de operações concretas, em que as conservações tipicamente se encaixam, começa mais ou menos quatro anos antes do próximo e último estágio, que é o das operações formais. O construto de um estágio de operações concretas é referendado pela observação de que, tipicamente, as crianças em nossa sociedade, aos seis ou sete anos, fazem um avanço em muitos domínios, e aparentemente de uma só vez. Elas são capazes de usar unidades de número, espaço e tempo; raciocinar por transitividade; construir um sistema de classificação. Mas há coisas que elas não podem fazer. Em particular, elas fracassam em situações que requerem não o pensamento sobre como as coisas são, mas sobre todas as maneiras como elas poderiam ser. Consideremos o seguinte exemplo, que antecipei na introdução.

A uma criança é dada uma coleção de contas de diferentes cores, por exemplo, verde, azul, vermelho e preto, e se lhe é pedido que construa todos os pares possíveis de cores: azul-verde, azul-preto, azul-vermelho, e depois os trios e assim por diante. Assim como as crianças não adquirem conservação até o sétimo ano de vida, as crianças do mundo todo são incapazes de realizar estas tarefas combinatórias antes de 11 ou 12 anos de idade. De fato, muitos adultos que são "inteligentes" o suficiente para levar uma vida normal nunca adquirem essa habilidade.

Qual é a natureza da diferença entre as chamadas operações "concretas" envolvidas na conservação e as chamadas operações "formais" envolvidas na tarefa combinatória? Os nomes que Piaget lhes deu e os dados empíricos sugerem uma diferença profunda e essencial. Mas olhando os problemas sob o prisma das idéias aqui desenvolvidas, temos uma impressão muito diferente.

De um ponto de vista computacional os ingredientes mais importantes da tarefa combinatória se relacionam com a idéia de procedimento — sistematicidade e depuração. Uma solução bem-sucedida consiste em seguir um procedimento como o seguinte:

1. Separe as contas em cores.
2. Escolha a cor A como cor 1.
3. Forme todos os pares que podem ser formados com a cor 1.
4. Escolha a cor 2.
5. Forme todos os pares que podem ser formados com a cor 2.
6. Faça isso para cada cor.
7. Volte e remova as duplicatas.

De maneira que se trata na realidade de escrever e executar um programa incluindo todos os passos importantes de depuração. Esta observação sugere a razão do fato de as crianças adquirirem esta habilidade tão tarde: a cultura contemporânea oferece relativamente poucas oportunidades para bricolage com os elementos de procedimentos sistemáticos deste tipo. Não quero dizer que não hajam tais oportunidades. Algumas são encontradas; por exemplo, em jogos onde a criança pode criar seu próprio "micromundo combinatório". Mas as oportunidades, os incentivos e a ajuda oferecida à criança nesta área são significativamente menores do que em áreas como número. Em nossa cultura, o número está abundantemente representado, o procedimento sistemático está mediocrementemente representado.⁴

Não vejo motivo para duvidar de que esta diferença poderia explicar o intervalo de mais de cinco anos entre as idades em que são adquiridas a conservação do número e as habilidades combinatórias.

A metodologia comumente utilizada para investir tais hipóteses é a comparação de crianças de diferentes culturas. Isto foi feito, naturalmente, para os estágios piagetianos. Crianças de todos os níveis de desenvolvimento que antro-

⁴ Naturalmente, nossa cultura fornece a qualquer um muitas ocasiões para praticar procedimentos sistemáticos particulares. Sua pobreza está nos materiais para pensar sobre e falar sobre procedimentos. As crianças, quando vêm trabalhar com LOGO, geralmente têm dificuldades para reconhecer um procedimento como uma entidade. Chegar a esse reconhecimento é, na minha perspectiva, análogo ao processo de formação do conceito de objetos permanentes na infância e de todas as entidades de conservação piagetianas, como número, peso e extensão. Em LOGO, os procedimentos são entidades manipuláveis. Eles podem ser nomeados, guardados, recuperados, mudados, usados como blocos para construir superprocedimentos e analisados em subprocedimentos. Nesse processo eles são assimilados a esquemas ou padrões de entidades mais conhecidas. Então, eles adquirem a qualidade de "ser entidades". Eles herdam "concretude". E também herdam conhecimento específico.

pólogos foram capazes de distinguir, em mais de uma centena de diferentes culturas, de todos os continentes, foram convidadas a despejar líquidos e classificar contas. Em todos os casos em que as habilidades de conservação e combinatória apareceram, a conservação do número era evidenciada por crianças de 5 ou mais anos mais jovens que as crianças evidenciando habilidades combinatórias. No entanto esta observação não põe em dúvida minha hipótese. Talvez seja universalmente verdadeiro que nas sociedades pré-computacionais o conhecimento *numérico* esteja mais fortemente representado que o conhecimento de *programação*. Não é difícil inventar explicações plausíveis para tal universalidade sócio-cognitiva. Mas as coisas podem ser diferentes nas culturas ricas em computadores do futuro. Se o computador e a programação se tornarem parte do cotidiano das crianças, o intervalo conservação — combinação certamente se fechará e poderia chegar a se inverter: as crianças podem aprender a ser sistemáticas antes de aprenderem a ser quantitativas.

Imagens da sociedade da aprendizagem

A visão que eu apresentei é a de uma cultura computacional particular, de caráter matético, ou seja, uma cultura que nos ajuda não apenas a aprender, mas a aprender acerca da aprendizagem. Mostrei como esta cultura pode humanizar a aprendizagem permitindo relações com o conhecimento em bases mais pessoais e menos alienantes, e dei alguns exemplos de como isto pode melhorar o relacionamento com outras pessoas que se encontram nesse processo de aprendizagem: companheiros de estudo e professores. Mas fiz apenas ligeiros comentários sobre o contexto social no qual esta aprendizagem deveria ocorrer. É tempo de enfrentar (embora não possa responder) uma questão que deverá estar na mente de muitos leitores: a escola será este contexto?

A sugestão de que talvez virá um dia em que a escola não mais existirá provoca uma forte reação em muitas pessoas. Há muitos obstáculos que se opõem ao pensamento claro sobre um mundo sem escolas. Alguns são altamente pessoais. A maioria das pessoas não faz idéia de quanto tempo de suas vidas elas passaram indo à escola. Por exemplo, eu tenho mais de cinquenta anos e, entretanto, os anos que passaram desde que deixei a escola mal se igualam aos anos passados no pré e na escola. A idéia de um mundo sem escolas é extrema-

mente dissonante a partir das experiências de nossas próprias vidas. Outros obstáculos são mais de natureza conceitual. Não se pode definir esse mundo negativamente, ou seja, simplesmente pela eliminação da escola sem colocar algo em seu lugar. Ao se fazer isso, deixa-se um vácuo no pensamento, que a mente tem que preencher de uma ou outra forma, geralmente com imagens vagas mas amedrontadoras de crianças “sem controle”, “viciadas em drogas”, ou “infernizando a vida de seus pais”. Pensar seriamente sobre um mundo sem escolas requer modelos bem elaborados de atividades não-escolares em que as crianças pudessem participar.

Para mim, colecionar tais modelos tornou-se uma parte importante das minhas reflexões sobre o futuro das crianças. Recentemente encontrei um excelente modelo durante um verão passado no Brasil. Por exemplo, o acontecimento central do famoso carnaval carioca é um desfile de música, dança e encenação, de 12 horas de duração: o desfile das escolas de samba. Um grupo após o outro apresenta seu tema. Geralmente o tema é uma dramatização através da música e da dança de um evento histórico ou canto folclórico. As letras das músicas, a coreografia e as fantasias são novas e originais. O nível de desempenho técnico é profissional, o efeito sensacional. Embora o tema possa ser mitológico, os desfiles são carregados de alusões políticas atuais.*

Os desfiles não são espontâneos. A preparação bem como a participação no desfile são partes importantes da vida brasileira. Cada grupo prepara-se separadamente — e competitivamente — no seu próprio ambiente de aprendizagem, que é chamado escola de samba. Essas não são escolas como as que conhecemos, são clubes sociais, cujo número de sócios varia de algumas centenas a muitos milhares. Cada clube possui uma sede, um lugar para dançar e reunir o pessoal. Os sócios a freqüentam nos fins de semana à noite para dançar, beber, encontrar os amigos.

Durante o ano, cada escola de samba escolhe seu tema

* Os professores Seymour Papert e Marvin Minsky estiveram no Brasil em 1975 e 1976. Embora Papert não tenha visto o desfile de escolas de samba, ele teve a oportunidade de observar o ensaio de uma escola no Rio, e ficou impressionado como esse ambiente ensinava uma aprendizagem ao mesmo tempo informal e intencional. (N.T.).

para o próximo carnaval, os destaques são selecionados, a dança é coreografada e ensaiada. Os sócios variam em idade, de crianças a avós, e em habilidade, de novatos a profissionais. Mas eles dançam juntos e à medida que dançam todo mundo está aprendendo e ensinando. Mesmo os astros estão lá para aprender seus passos difíceis.

Toda discoteca americana é um lugar para aprender, assim como para dançar. Mas as escolas de samba são muito diferentes. Há uma maior coesão social, a sensação de pertencer a um grupo; e um sentido de objetivo comum. Muito do ensinamento, embora aconteça num ambiente natural, é deliberado. Por exemplo, um dançarino exímio reúne um grupo de crianças. Durante cinco ou vinte minutos se forma um grupo específico de aprendizagem. Sua aprendizagem é deliberada e focalizada. Depois, o grupo dissolve-se na multidão.

Neste livro tenho considerado como a matemática pode ser aprendida em ambientes que se assemelham à escola de samba brasileira, em ambientes reais, socialmente coesos, e onde os entendidos e os novatos estão todos aprendendo. A escola de samba, embora não seja “exportável” para uma cultura estrangeira, representa um conjunto de atributos que um ambiente de aprendizagem poderia e deveria ter. Aprender não é separado da realidade. A escola de samba tem um propósito, e a aprendizagem está integrada na escola para atingir este propósito. Os novatos não são separados dos entendidos, e estes também estão aprendendo.

Os ambientes LOGO, em muitos sentidos, são semelhantes às escolas de samba, e diferentes em outros sentidos. A semelhança mais profunda vem do fato de que neles a matemática é uma atividade real que pode ser partilhada por novatos e entendidos. A atividade é tão variada, tão rica em descoberta, que mesmo no primeiro dia de programação o estudante pode fazer algo que é novo e excitante para o próprio professor. John Dewey expressou uma nostalgia das sociedades primitivas onde a criança se torna um caçador através da participação em caçadas reais e em imitações. A aprendizagem na escola de hoje não é participativa de modo significativo — e fazer contas não é a imitação de uma atividade excitante e reconhecível da vida adulta. Mas escrever programas para fazer gráficos no computador ou música, ou pilotar uma

nave espacial simulada são atividades que têm muitos pontos em comum com as atividades dos adultos, mesmo com o tipo de adulto que poderia ser um herói ou um modelo para uma criança ambiciosa.

Os ambientes LOGO também se assemelham com a escola de samba na qualidade de seus relacionamentos humanos. Embora os professores estejam geralmente presentes, suas intervenções são mais parecidas com a dos dançarinos exímios da escola de samba do que com a do professor tradicional munido de lições e um currículo estabelecido. O professor de LOGO responderá questões, dará ajuda se pedida, e algumas vezes sentará ao lado de um aluno e dirá: "Deixe-me mostrar-lhe uma coisa". O que é mostrado não é ditado por um programa curricular estabelecido. Algumas vezes é algo que o aluno pode utilizar num projeto imediato. Às vezes é algo que o professor aprendeu e pensa que o aluno apreciará. Às vezes o professor está apenas agindo espontaneamente como as pessoas fazem em situações sociais não estruturadas, quando estão excitadas com o que estão fazendo. Há também semelhança entre o ambiente LOGO e as escolas de samba no fato de que o fluxo de idéias e até mesmo de instruções não é uma via de mão única. O ambiente é planejado para provocar interações mais ricas e mais profundas do que as encontradas hoje nas escolas, em conexão com qualquer assunto matemático. As crianças criam programas que produzem gráficos atraentes, desenhos engraçados, efeitos sonoros, música e piadas. Elas começam a interagir matematicamente porque o produto de seu trabalho matemático pertence a elas e à vida real. Parte do divertimento é compartilhar, pregar gráficos na parede, modificar e experimentar trabalhos de outros, e trazer os "novos" produtos de volta aos inventores originais. Embora o trabalho no computador seja geralmente individual, ele aumenta o desejo da criança interagir. Estas crianças desejam se reunir com outras envolvidas em atividades semelhantes porque elas têm muito sobre o que conversar. E o que elas têm a dizer não se limita a ser falar sobre seus produtos: LOGO é planejado para tornar mais fácil a descrição do processo de elaboração destes produtos.

Ao construir LOGO de maneira tal que o pensamento estruturado se torne poderoso, transmitimos um estilo cognitivo do qual um dos aspectos é facilitar a conversa sobre o

processo de pensamento. A ênfase do LOGO em depuração de procedimento aponta na mesma direção. Os *bugs* dos alunos tornam-se tópicos de conversas; disto resulta o desenvolvimento de uma linguagem articulada e focalizada, usada para pedir ajuda quando for necessário. E quando a necessidade de ajuda pode ser claramente articulada, a ajuda não precisa vir necessariamente de um profissional especialmente treinado. Desta forma a cultura LOGO enriquece e facilita a interação entre todos os participantes e oferece oportunidades para relações de ensino mais articuladas, efetivas e honestas. É um passo em direção à situação onde a linha entre aprendizes e professores pode esmaecer.

Apesar dessas semelhanças, os ambientes LOGO não são escolas de samba. As diferenças são bem fundamentais. Elas se refletem superficialmente no fato de que os professores são profissionais e estão em comando mesmo quando se absterem de exercer autoridade. Os alunos são uma população transitória e raramente ficam tempo suficiente para fazer dos objetivos a longo prazo do LOGO os seus próprios. Em última análise, a diferença tem a ver com como as duas entidades são relacionadas com a cultura circundante. A escola de samba possui fortes conexões com uma cultura popular. O conhecimento que ela veicula é continuação dessa cultura. Os ambientes LOGO são oásis mantidos artificialmente, onde as pessoas encontram conhecimento (matemático e matético) que foi separado da corrente principal da cultura circundante, e que, de certa maneira, se encontra até mesmo em oposição a valores expressados pela cultura circundante. Quando pergunto a mim mesmo se isto pode mudar, tenho em mente a natureza social da questão ao lembrar que a escola de samba não foi planejada por pesquisadores, sustentada por financiamentos, nem implementada por ação governamental. Não foi feita. Aconteceu. Isto deve ser verdade para muitas novas formas bem sucedidas de associações para a aprendizagem que possam surgir da cultura computacional. Novas formas sociais poderosas têm que ter suas raízes na cultura, e não ser filhas da burocracia.

Isto nos leva de novo a encarar a necessidade de que o educador seja um antropólogo. Os inovadores educacionais devem estar cientes de que para serem bem sucedidos eles devem ser sensíveis ao que acontece na cultura circundante e

usar tendências culturais dinâmicas como meio de atingir suas intervenções educacionais.

Tornou-se lugar comum afirmar que a cultura atual é marcada por uma tecnologia educacional onipotente. Isto foi verdade desde algum tempo. Mas, nos últimos anos, *há* algo novo. Nos dois últimos anos, mais de 200.000* computadores pessoais entraram na vida dos americanos, alguns comprados originalmente para escritórios e não para fins recreacionais ou educacionais. Entretanto, o que é importante para o educador-antropólogo é que os computadores existem como objetos que as pessoas vêem, e começam a aceitar como parte da realidade cotidiana. E ao mesmo tempo que esta entrada maciça da tecnologia está ocorrendo, está em progresso um movimento social que dá grande relevância à política educacional. Há uma crescente desilusão com a educação tradicional. Algumas pessoas expressam isto através de atos extremos, como retirar realmente os filhos da escola e optar por educá-los em casa. Para muitos há simplesmente o senso corrosivo de que a escola não está mais cumprindo sua missão. Creio que estas duas tendências podem ser reunidas de uma maneira que poderia ser boa para as crianças, para os pais e para a aprendizagem. Isto seria através da construção de ambientes computacionais poderosos do ponto de vista educacional, que forneceriam alternativas às classes e ao ensino tradicionais. Não apresento os ambientes LOGO como minha proposta para isso. Eles são muito primitivos e limitados pela tecnologia dos anos setenta. O papel que eu espero que eles assumam é o de modelo. A esta altura o leitor deve antever que estou propondo o ambiente LOGO como um "objeto para-se-pensar-com", que contribuirá para o processo essencialmente social de construir a educação do futuro.

Os ambientes LOGO não são escolas de samba, mas eles são úteis para imaginar o que seria equivalente a ter "uma escola de samba para matemática". Tal coisa não era concebível até recentemente. O computador a torna possível ao proporcionar atividades ricas do ponto de vista matemático que poderiam, em princípio, ser verdadeiramente envolventes

* Estes dados referem-se ao ano de 1980, quando o livro foi publicado. Hoje é difícil prever com precisão quantos computadores pessoais há nos EUA porque as vendas ocorrem tão rapidamente que é impossível manter as estatísticas. (N.T.).

para novatos e entendidos, jovens e velhos. Não tenho dúvidas de que nos próximos anos veremos a formação de certos ambientes computacionais que merecerão ser chamados "escolas de sambas para computação". Já há várias tentativas nesse sentido, pessoas engajadas em clubes de computação para aficionados ou dirigindo centros de computação abertos ao público em geral.

Em muitos casos, embora os experimentos tenham sido interessantes e excitantes, não vingaram porque eram muito primitivos. Seus computadores simplesmente não tinham a potência necessária para os tipos de atividades mais envolventes e compartilháveis. Sua visão de como integrar o **pensamento computacional** na vida diária estava insuficientemente desenvolvido. Mas haverá mais tentativas, e mais e mais. E, eventualmente, em algum lugar, todas as peças se juntarão e ele "pegará". Pode-se ter confiança nisso porque tais tentativas não serão experimentos isolados conduzidos por pesquisadores que podem perder os financiamentos ou simplesmente se tornarem desiludidos e desistir. Haverá manifestações de um movimento social de pessoas interessadas em computação pessoal, em seus próprios filhos e em educação.

Há problemas com a imagem da escola de samba como o local da educação. Estou certo de que uma "escola de samba computacional" pegará em algum lugar. Mas a primeira acontecerá quase certamente numa comunidade de um tipo particular, provavelmente com uma alta densidade de engenheiros de classe média. Isto permitirá à escola de samba computacional criar raízes culturais, mas deverá, naturalmente, também deixar suas marcas na cultura da escola de samba. Para as pessoas interessadas em educação em geral, será importante traçar as histórias particulares desses esforços: como eles afetarão o desenvolvimento intelectual dos seus participantes em idade escolar? Será que observaremos a reversão dos estágios piagetianos? Desenvolverão estas pessoas o interesse em deixar a escola tradicional? Como as escolas locais tentarão adaptar-se à nova pressão sobre elas? Mas como um educador utópico, eu quero algo diferente. Eu quero saber que tipo de cultura computacional pode crescer em comunidades onde ainda não existe um rico solo em prol da tecnologia. Eu desejo saber e desejo contribuir para que isto se realize.

Permitam que eu diga mais uma vez: o obstáculo potencial não é econômico e não é o fato de os computadores não serem objetos do cotidiano das pessoas. Eles eventualmente serão. Eles já estão entrando na maioria dos lugares de trabalho e, eventualmente, serão tão comuns nos lares como são agora os aparelhos de TV. O obstáculo para o crescimento de culturas de computador populares é cultural, por exemplo, o desencontro entre a cultura computacional inserida nas máquinas de hoje e as culturas dos lares onde eles penetrarão. E, se o problema é cultural, o remédio deve ser cultural.

O desafio à pesquisa é claro. Necessitamos progredir na arte de misturar computadores com culturas de forma que eles sirvam para unir, oxalá sem homogeneizar, as subculturas fragmentadas que coexistem de forma contraprodutiva na sociedade contemporânea. Por exemplo, o fosso entre as culturas técnico-científica e humanística tem que ser atravessado. E creio que a chave para construir esta ponte será aprender a reformular idéias poderosas em forma computacional, idéias que são tão importantes para o poeta quanto para o engenheiro.

Na minha visão o computador age como um objeto transicional para mediar relacionamentos que são, em última análise, entre pessoas. Há matofóbicos com um acurado sentido de movimento corporal, e há matofóbicos que esqueceram as raízes sensorio-motoras de seu conhecimento matemático. A Tartaruga estabelece uma ponte. Ela serve como meio comum, onde podem se fundir os elementos compartilhados da geometria do corpo e da geometria formal. Reformular o malabarismo manual como programa estruturado pode construir uma ponte entre aqueles que possuem um delicado senso matético das habilidades físicas e os que sabem como organizar a tarefa de escrever um ensaio sobre história.

Malabarismo e escrever um ensaio parecem ter pouco em comum se olharmos o *produto*. Mas o processo de aprender essas duas habilidades tem muito em comum. Ao criar um ambiente intelectual cuja ênfase está no processo, nós damos às pessoas com habilidades e interesses diferentes algo com que elas possam conversar entre si. Ao desenvolver linguagens expressivas para falar sobre o processo e ao reformular velhos conhecimentos em termos dessas novas linguagens, podemos ter esperança de tornar transparentes as barreiras

que separam as disciplinas. Na escola, matemática é matemática, história é história e malabarismo está fora do âmbito intelectual. O tempo dirá se as escolas conseguirão se adaptar. O que é mais importante é entender a reformulação do conhecimento em novas formas.

Neste livro vimos interações complexas entre novas tecnologias e a reformulação dos conteúdos. Quando discutimos o uso do computador para facilitar a aprendizagem das leis de movimento de Newton, não tentamos "computadorizar" as equações tais como são encontradas num livro-texto clássico. Desenvolvemos um novo esquema conceitual para pensar os movimentos. Por exemplo, o conceito de Tartaruga nos permitiu formular um componente qualitativo da física newtoniana. A reconceitualização resultante seria válida sem um computador; suas relações com o computador não são de modo algum reducionistas. Mas ela está apta a se aproveitar do computador de maneiras que outras conceitualizações da física não poderiam, e desta forma lucra em poder matético. Desse modo, o processo inteiro envolve uma interação dialética entre novas tecnologias e novas maneiras de se fazer física. A lógica destas interações pode ser vista claramente ao se observar outro item da minha coleção de bons modelos para se pensar a educação.

Há vinte anos, pensava-se que esqui era uma habilidade somente atingida depois de muitos anos de treinamento e de prática. Hoje é atingida rotineiramente durante o transcorrer de apenas uma temporada de esqui. Alguns dos fatores que contribuíram para essa mudança são do tipo que encaixa nos paradigmas tradicionais sobre inovação educacional. Por exemplo, muitas escolas de esqui usam uma nova técnica pedagógica (o método do comprimento graduado-GLM) na qual se aprende a esqui primeiro usando esquis curtos e daí progredindo gradualmente para mais longos. Mas algo mais fundamental aconteceu. Num certo sentido, o que os esquiadores aprendem hoje tão facilmente não é a mesma coisa que seus pais acharam tão difícil. Todos os objetivos dos pais são atingidos pelos filhos: os esquiadores se movem velozmente montanha abaixo com seus esquis paralelos, evitando obstáculos e contornando os marcos do *slalom*. Mas os movimentos que eles fazem para produzir esses resultados são muito diferentes.

Quando seus pais aprenderam a esquiar, tanto os esquiadores de temporadas quanto os campeões olímpicos usavam técnicas para fazer curvas baseadas numa contra-reação preparatória, que se considerava necessária para as curvas em paralelo. A compreensão de que movimentos mais diretos poderiam produzir uma curva mais eficiente foi uma descoberta fundamental, e que rapidamente transformou o esquiar, tanto para os esquiadores de temporada quanto para os campeões. Para o novato as novas técnicas implicaram uma aprendizagem mais rápida, para o campeão implicou movimentos mais eficientes, para o esquiador de estilo implica mais oportunidades para movimentos elegantes. Assim, no âmago da mudança está a reconceitualização do próprio esquiar, não uma mera mudança pedagógica ou tecnológica. Mas, a fim de se obter um quadro completo, temos também que reconhecer uma interação dialética entre o conteúdo, a pedagogia, e a tecnologia. Pois à medida que foram mudados os movimentos de esquiar, os esquis e as botas também foram mudando. Novos materiais plásticos permitiram que as botas se tornassem mais leves e mais rígidas, e os esquis poderiam ser mais ou menos flexíveis. A direção dessas mudanças foi tão sinérgica com as novas técnicas que muitos instrutores e escritores sobre esqui atribuíram a mudança na prática de esquiar à tecnologia. Similarmente, a utilização de esquis curtos para instrução mostrou-se tão adaptável à nova técnica que muitas pessoas resumem a revolução no esquiar como a "passagem para o GLM".

Gosto de pensar na "revolução do esqui" porque me ajuda a pensar a encruzilhada em que nos encontramos na história da "revolução dos computadores". Hoje ouvimos muitos comentários a respeito de como "os computadores estão chegando" e de como eles irão modificar a educação. A maior parte desses comentários pode ser dividida em duas categorias, uma aparentemente "revolucionária" e outra "reformista". Para os revolucionários, a própria presença do computador produzirá mudanças significativas: máquinas de ensinar nos lares e redes de computadores tornarão a escola (como a conhecemos agora) obsoleta; uma reconceitualização da física é das coisas mais distantes de suas mentes. Para os reformistas, o computador não abolirá a escola, mas a servirá. O computador é visto como uma máquina que pode ser

posta a serviço das estruturas existentes a fim de resolver, de modo local e progressivo, os problemas que as escolas de hoje enfrentam. O reformista não está mais inclinado do que o revolucionário a pensar em termos de reconceitualização de domínios de conhecimento.

Nossa filosofia, tanto implícita quanto explícita, tenta evitar as duas armadilhas comuns: adesão à inevitabilidade da tecnologia e a estratégias de mudanças progressivas. A tecnologia em si mesma não nos levará adiante em qualquer direção que eu possa acreditar, tanto social quanto educacional. O preço da reação da comunidade educacional será a mediocridade educacional e a rigidez social. E experimentação com mudanças progressivas não nos colocará sequer numa situação de entender onde a tecnologia está nos levando.

Minha própria filosofia é revolucionária ao invés de reformista em seu conceito de mudança. Mas a revolução que eu visualizo é de idéias, não de tecnologia. Ela consiste em novas compreensões de domínios de conhecimento específicos e do próprio processo de aprendizagem. Consiste num novo e muito mais ambicioso direcionamento de perspectiva das aspirações educacionais.

Estou falando de uma revolução de idéias que não é mais redutível a tecnologias do que a física e biologia molecular são redutíveis às ferramentas tecnológicas usadas em laboratório ou a poesia à impressão. Na minha visão, a tecnologia tem dois papéis. Um é heurístico: a presença do computador catalizou a emergência de idéias. Outra é instrumental: o computador levará idéias a um mundo mais amplo do que os centros de pesquisas onde eles têm sido até agora incubados.

Eu sugeri que a ausência de uma tecnologia adequada foi a principal causa da estagnação, no passado, da reflexão sobre a educação. A emergência primeiro dos computadores de grande porte e, agora, dos microcomputadores, removeu esta causa de estagnação. Mas há uma outra causa, secundária, que cresceu como alga numa lagoa estagnada. Temos que considerar se desaparecerá junto com as condições que permitiram seu crescimento, ou se, como QWERTY, permanecerá para estrangular o progresso. A fim de definir esse obstáculo e colocá-lo em perspectiva, tomaremos uma das principais idéias apresentadas em capítulos anteriores e consideraremos o que é necessário além da tecnologia para implementá-la.

Do cadinho de conceitos e metáforas computacionais, da predição do poder generalizado do computador e de experimentos reais com crianças, a idéia da aprendizagem piagetiana emergiu como um importante princípio organizador. Traduzidas em termos práticos, estas idéias direcionam um plano de pesquisa cujo objetivo é criar condições para as crianças explorarem “naturalmente” domínios do conhecimento que antes requeriam um ensino pedagógico, ou seja, proporcionando às crianças contato com o “material” — físico ou abstrato — que elas possam usar para uma aprendizagem piagetiana. A prevalência de pares de coisas em nossa sociedade é um exemplo da ocorrência “natural” de material piagetiano. Os ambientes da Tartaruga nos dão um exemplo de material piagetiano “artificial” (ou seja, inventado deliberadamente). Pares e Tartarugas, ambos devem seu poder matemático a dois atributos: as crianças se relacionam com eles, e eles por sua vez se relacionam com importantes estruturas intelectuais. Desse modo pares e Tartarugas agem como objetos transicionais. A criança é levada a brincar com pares e com o processo de parear, e nessa brincadeira o parear age como o portador de idéias poderosas — ou de germes dos quais crescerão idéias poderosas na estrutura da mente ativa da criança.

Os atributos que a Tartaruga partilha com o parear parecem simples mas sua compreensão deriva de um conjunto complexo de idéias, de tipos de habilidades, e de sensibilidades que podem ser separadas, embora de um modo um tanto artificial, em três categorias: conhecimento sobre computadores, conhecimento sobre assuntos de diversos domínios e conhecimento sobre pessoas. O conhecimento de pessoas que eu vejo como necessário ao planejamento de bom material piagetiano é em si mesmo complexo. Inclui os tipos de conhecimento que são associados à psicologia acadêmica em todos os seus ramos: cognitiva, de personalidade, clínica, e assim por diante — e também o tipo mais empático possuído por artistas criativos e por pessoas que “se dão bem com crianças”. Ao articular esses pré-requisitos para a criação de material piagetiano, estamos face a face com o que eu vejo como o problema essencial remanescente, no que diz respeito ao futuro dos computadores e educação: o problema do suprimento de pessoas que desenvolverão esses pré-requisitos.

Esse problema vai mais fundo do que a mera falta de tais pessoas. O fato de não existir no passado uma função para essas pessoas ficou sedimentado tanto do ponto de vista social quanto institucional; agora há a função, mas não há lugar para elas. Nas atuais definições profissionais, os físicos pensam em como fazer física, os educadores pensam em como ensiná-la. Não há um lugar reconhecido para pessoas cuja pesquisa é realmente física, mas voltada para direções que são significativas do ponto de vista educacional. Tais pessoas não são particularmente bem recebidas num departamento de física; seus objetivos educacionais servem para banalizar seu trabalho aos olhos de outros físicos. Nem eles são bem-vindos na faculdade de educação — lá sua linguagem altamente técnica não é compreendida e seus critérios de pesquisa estão em descompasso com os dos demais membros. No mundo da educação um novo teorema para o micromundo da Tartaruga, por exemplo, seria julgado pela sua capacidade de produzir uma melhora “mensurável” num dado curso de física. Nosso físico hipotético verá seu trabalho de modo muito diferente, como uma contribuição teórica à física que a longo prazo tornará mais acessível o conhecimento do universo físico, mas que a curto prazo não deveria ser o de melhorar o desempenho dos alunos num curso de física. Talvez, pelo contrário, poderia até prejudicar os alunos se inserido como uma mudança local num processo educacional baseado numa abordagem teórica diferente.

Esta colocação sobre qual tipo de discurso é aceitável tanto nas faculdades de educação quanto nos institutos de física é verdadeira de maneira ainda mais geral. As agências financiadoras assim como as universidades não abrem espaço para qualquer pesquisa cujo envolvimento com idéias de ciência seja tão profundo que não possa ser rotulado como educação e engajado tão profundamente numa perspectiva educacional que não possa ser rotulado como ciência. Parece ser um assunto que não compete a ninguém, pensar de forma fundamental sobre ciência em relação à maneira como as pessoas pensam e a aprendem. Embora se proclame a importância da ciência e da sociedade, a metodologia subjacente é semelhante à da educação tradicional: a de transmitir elementos de uma ciência já pronta a uma audiência especial. E é muito remota a concepção de um empreendimento sério de *fazer* ciência para o povo.

O computador por si mesmo não pode mudar os pressupostos existentes na instituição que separam o cientista do educador, o técnico do humanista. Nem pode mudar as suposições sobre se a ciência para o povo é uma questão de empacotamento e apresentação ou uma área particular de pesquisa séria. Fazer qualquer uma dessas coisas requererá uma ação deliberada, de um tipo que poderia, em princípio, ter ocorrido no passado, antes da existência de computadores. Mas isto não ocorreu. O computador aumentou os riscos, tanto para nossa inação quanto para nossa ação. Para aqueles que gostariam de ver mudanças, o preço da inação será observar os aspectos menos desejáveis do *status quo*, exacerbados e até mesmo mais profundamente arraigados. Por outro lado, o fato de que haverá um período de evolução rápida, produzirá um ponto de apoio para mudanças institucionais que poderiam ter sido impossíveis num período mais estável.

A emergência do cinema como uma nova forma artística andou de mãos dadas com a emergência de uma nova subcultura, um novo conjunto de profissões formado por pessoas cujas habilidades, sensibilidades e filosofias de vida eram completamente diferentes do que existia antes. A história da evolução do mundo do cinema é inseparável da história da evolução dessas comunidades. Similarmente, um novo mundo de computação pessoal está se fazendo, e sua história será inseparável da história das pessoas que a farão.

Epílogo

O inconsciente matemático

Aqui é reproduzida como um epílogo minha primeira discussão, escrita há alguns anos, de uma idéia que se desenvolveu como um tema central deste livro: minha rejeição da dicotomia que opõe uma estereotipada matemática "descorporificada" a atividades envolvendo a amplitude global das sensibilidades humanas. No livro discuto este tema no contexto da geometria da Tartaruga. Nas páginas seguintes o leitor encontrará este tema como parte das reflexões sobre as origens do prazer matemático.*

Uma idéia profundamente arraigada em nossa cultura é que a apreciação da beleza matemática e a experiência de prazer pela matemática são acessíveis somente a uma minoria, talvez muito pequena, da raça humana. Henri Poincaré deu a esta crença o *status* de um princípio teórico, que merece ser respeitado não só como um dos pioneiros do pensamento matemático deste século, mas também como um dos escritores que mais refletiu sobre a epistemologia das ciências matemáticas. Poincaré difere significativamente das tendências dominantes na psicologia educacional e cognitiva por sua visão do que constitui um matemático. Para ele a característica princi-

* Gostaria de agradecer aos editores da MIT Press pela permissão de reproduzir este ensaio que apareceu originalmente como "Poincaré and the mathematical unconscious" em Judith Wechlev (org.) *Aesthetics in Science* (Cambridge, Mass, MIT Press, 1978). Também quero agradecer a Judith Wechlev por me ter encorajado a escrever este ensaio (que começou como uma conferência em uma de suas classes no MIT) e por muito mais coisas.

pal da mente matemática não é lógica mas estética. Ele também acredita, mas este é um outro assunto, que este senso estético é inato: algumas pessoas nascem com a faculdade de desenvolver uma apreciação da beleza matemática, e estes são os que podem se tornar matemáticos criativos. As outras pessoas não podem.

Este ensaio utiliza a teoria da criatividade matemática de Poincaré como uma idéia central, organizadora, para reflexões sobre o relacionamento entre o lógico e o extralógico em matemática e entre o matemático e o não-matemático na gama de atividades humanas. As alas populares e sofisticadas de nossa cultura delineiam, quase unanimemente, essas dicotomias em linhas rígidas. A posição de Poincaré é duplamente interessante porque em alguns aspectos ele suaviza, e em outros enrijece, essas linhas. Elas são suavizadas quando ele atribui à estética um papel funcional importante na matemática. Mas o ato de postular uma estética matemática específica, e particularmente de maneira inata, enrijece a separação entre o matemático e o não-matemático. A estética matemática é realmente diferente? Possui raízes comuns a outros componentes de nosso sistema estético? O prazer matemático deriva de princípios de prazer próprios ou dos que animam outras manifestações da vida humana? A intuição matemática difere do senso comum em natureza e forma ou apenas em conteúdo?

Estas questões são profundas, complexas e antigas. De minha parte, a ousadia em discuti-las no espaço de um ensaio curto se justifica apenas por causa de certas simplificações. A primeira delas é uma transformação das questões, no mesmo espírito em que Jean Piaget transforma questões filosóficas em psicogenéticas, para as quais a investigação de como as crianças pensam tornou-se animadoramente relevante. Ao fazer isso, ele freqüentemente enraiveceu ou desnorteou os filósofos, mas enriqueceu incomensuravelmente o estudo científico da mente. A minha transformação torna a teoria da mais elevada criatividade matemática de Poincaré numa teoria mais mundana mas muito mais manuseável do ponto de vista do pensamento matemático (e possivelmente não-matemático) ordinário.

Ao trivializar a teoria desse modo possivelmente se corre o risco de abandonar o que o próprio Poincaré talvez considerasse o mais importante. Mas torna a teoria de imediato

mais relevante, talvez até muito urgente, para psicólogos, educadores e outros. Por exemplo, se o modelo de Poincaré contivesse os elementos de uma descrição verdadeira do pensamento matemático ordinário, implicaria que a educação matemática, tal como é praticada hoje, é totalmente desvirtuada e até contraproducente. Se a estética matemática consegue alguma atenção na escola, é como um epifenômeno, o glacê no bolo matemático, ao invés da força motora que faz funcionar o pensamento matemático. Certamente, as teorias da psicologia do desenvolvimento matemático (como a de Piaget) amplamente utilizadas ignoram totalmente o estético, até mesmo o intuitivo, e se concentram na análise estrutural do caráter lógico do pensamento matemático.

As conseqüências destrutivas do ensino contemporâneo da matemática podem também ser vistas como um paradoxo menor para Poincaré. O fato da escola, e da nossa cultura em geral, estarem longe de ser um meio estimulante para o nascente senso de estética matemática nas crianças, faz com que a tese maior de Poincaré sobre a importância da estética solape os alicerces da crença em sua tese menor, que afirma a origem inata de tais sensibilidades. Se Poincaré está correto com relação à estética, torna-se extremamente fácil ver como a raridade aparente do talento matemático poderia ser explicado sem recorrer à origem inata.

Essas considerações são suficientes para sugerir que a transformação mundana da teoria de Poincaré pode ser um grande prêmio para educadores, mesmo que perca todo o contato com os processos atuantes na alta matemática. Mas talvez possamos ter o melhor dos dois mundos. Ao adotar, como o faremos, um modo de discussão mais experiencial, através do qual as teorias sobre pensamento matemático podem ser confrontadas imediatamente com os próprios processos mentais do leitor, não renunciaremos, naturalmente, à possibilidade da elite matemática compartilhar experiências semelhantes. Pelo contrário, aquela parte do pensamento de Poincaré que emergirá como a mais válida no contexto ordinário está em acentuada consonância com as tendências modernas que, a meu ver, constituem uma mudança paradigmática do pensamento sobre os fundamentos matemáticos. Os parágrafos finais deste ensaio ilustrarão essa ressonância no caso da teoria de Bourbaki sobre estrutura matemática.

Aqui meu objetivo não é propor uma tese com formulações precisas e argumentação rigorosa, e certamente não é tampouco julgar a correção da teoria de Poincaré. Eu me contentarei (esta é minha segunda grande simplificação) em sugerir aos leitores não-matemáticos percepções e um discurso sobre matemática que a colocará mais próxima ao que usualmente se faz em outras experiências que eles conhecem e apreciam. O maior obstáculo a que se faça isso é uma apresentação da matemática que exagera grandemente sua face lógica, do mesmo modo que a projeção Mercator do globo exagera o tamanho das regiões polares de modo que no mapa a Groenlândia ártica se torna mais imponente que o Brasil equatorial. Portanto, nossa discussão será dirigida para distinguir e relacionar o que chamarei de face extralógica da matemática, de sua face lógica. Deverei ignorar as distinções que devem ser feitas dentro dessas categorias. A beleza matemática, o prazer matemático, e até mesmo a intuição matemática serão tratados de forma quase intercambiável, na medida em que representam o extralógico. E, por outro lado, não separaremos facetas tão diferentes do lógico, como a ênfase dos formalistas no processo dedutivo, a posição reducionista de Bertrand Russel (contra a qual Poincaré lutou ferozmente) e a semântica teórica de conjunto de Alfred Tarski. Estas teorias lógicas podem ser reunidas porque elas têm em comum uma visão intrínseca e autônoma da matemática. Elas tratam a matemática como algo autocontido, que se justifica em si mesmo por critérios de validade definidos formalmente (ou seja, matemáticos) e ignoram toda referência à qualquer coisa que lhe seja externa. Certamente elas ignoram os fenômenos de beleza e prazer.

Não há tensão teórica no fato dos teóricos lógicos ignorarem o extralógico, desde que não o neguem. Ninguém questionará nem a realidade da face lógica da matemática, nem a realidade da beleza ou prazer matemático. O que Poincaré desafia é a possibilidade de se entender a atividade matemática, o trabalho do matemático, apenas ou até mesmo primordialmente, em termos lógicos, sem referência ao estético. Portanto seu desafio está no campo da psicologia, ou no da teoria da mente, e, como tal, possui maior repercussão que o problema aparentemente especializado de se entender o pensamento matemático. Seu desafio coloca em questão a separação den-

tro da psicologia das funções cognitivas, definidas por oposição aos aspectos afetivo, de sentimento, de senso de beleza.

No geral, eu deverei ser, como Poincaré, contra a possibilidade de uma teoria "puramente cognitiva" do pensamento matemático, mas expresso reservas quanto ao alto grau de especificidade que ele atribui à matemática. Mas antes devo introduzir outro tema da teoria de Poincaré, que é o papel e a natureza do inconsciente.

Assim como o estético *versus* o lógico nos leva a confrontar Poincaré com a psicologia cognitiva, o inconsciente *versus* o consciente nos leva a um confronto com Freud. Poincaré está próximo a Freud ao postular claramente duas mentes (a consciente e a inconsciente), cada uma governada por leis dinâmicas próprias, capazes de desempenhar funções diferentes, e com um acesso severamente limitado à atividade da outra. Como veremos, Poincaré impressionou-se muito com a forma pela qual a solução de um problema na qual se trabalhou por um determinado tempo freqüentemente surge no consciente sem aviso, e quase já pronto, como se produzido por uma parte escondida da mente. Mas o inconsciente de Poincaré é muito diferente do de Freud. Longe de ser o lugar de processos pré-lógicos, carregados de sexualidade, e primitivos, é mais como uma máquina combinatória, extremamente lógica e emocionalmente neutra.

A confrontação dessas imagens do inconsciente nos conduz novamente às questões sobre a natureza da própria matemática. A visão lógica da matemática é por definição desincorporada, separada do corpo, e moldada apenas por uma lógica interna de pureza e verdade. Tal visão concorda mais com o inconsciente neutro de Poincaré do que com o freudiano, com uma dinâmica altamente carregada e guiada pelo instinto. Mas o próprio Poincaré, como eu já salientei, rejeita essa visão da matemática; mesmo que ela pudesse ser mantida (o que já é dúvida) como a imagem do produto matemático acabado, é totalmente inadequada como um relato do processo produtivo através do qual emergem as verdades e estruturas matemáticas. Na sua forma mais ingênua, a imagem lógica da matemática é a de um sistema dedutivo no qual novas verdades são derivadas de verdades derivadas anteriormente por meio de regras de inferência rigorosamente confiáveis. Embora teses lógicas menos ingênuas não possam ser

demolidas tão facilmente, é relevante notar as diferentes maneiras através das quais esse relato da matemática pode ser criticado. Ele é certamente incompleto pois deixa de explicar o processo de escolha que determina como são feitas as deduções e quais dentre as escolhas feitas são seguidas. É enganoso no sentido de que as regras de inferência realmente usadas pelos matemáticos, se aplicadas sem precauções, levariam rapidamente a contradições e paradoxos. Finalmente, é fatalmente falso como uma descrição pois não provê lugar para os resultados parciais ainda sem depuração, com os quais o matemático realmente se ocupa o maior tempo. O trabalho matemático não segue pelo caminho estreito da lógica de verdade a verdade, mas de maneira ousada ou vacilante, segue desvios através do pantanal de proposições que o cercam, que não são nem simples e totalmente verdadeiras, nem simples e totalmente falsas.

Pesquisadores em inteligência artificial remendaram a primeira destas áreas de fraqueza, por exemplo, formalizando o processo de localizar e administrar problemas novos como parte do trabalho de solucionar um dado problema. Mas se os problemas novos e as regras para gerá-los são moldados em termos lógicos, nós vemos isso, no melhor dos casos, como a substituição de uma lógica estática por uma dinâmica. Não se substitui a lógica por alguma coisa diferente. A questão em discussão aqui é se o matemático, no decurso de trabalhar no mais puramente lógico problema, evoca processos e propõe problemas que não são em si mesmos puramente lógicos.

A metáfora de se desviar do caminho da verdade para o pantanal circundante tem o mérito, apesar de sua fluidez, de expor nitidamente um problema fundamental e uma preocupação de Poincaré: o problema da direção, ou poder-se-ia dizer, da "navegação no espaço intelectual". Se nos satisfizéssemos com a produção de conseqüências lógicas, teríamos pelo menos a segurança de um processo seguro. Na realidade, segundo Poincaré, o matemático é guiado por um senso estético: ao realizar um trabalho, o matemático freqüentemente tem de trabalhar com proposições que são falsas em vários níveis, mas não tem que considerar nenhuma que ofenda um senso pessoal de beleza matemática.

A teoria de Poincaré de como a estética guia o trabalho

matemático divide este em três estágios. O primeiro estágio é o de análise consciente e deliberada. Se o problema é difícil, o primeiro estágio nunca produzirá, segundo Poincaré, a solução. O seu papel é criar os elementos a partir dos quais se construirá a solução. É necessária a intervenção de um estágio de trabalho inconsciente que pode parecer ao matemático como tendo abandonado temporariamente o problema, ou deixando-o incubar. Poincaré postula um mecanismo de incubação. A visão fenomenológica de abandono é totalmente falsa. Pelo contrário, o problema é entregue a um inconsciente muito ativo que inexoravelmente começa a combinar os elementos fornecidos pelo primeiro estágio consciente do trabalho. A mente inconsciente não pressupõe a existência de poderes extraordinários, exceto concentração, operação sistemática, e resistência ao tédio, distrações ou mudanças de objetivos. O produto do trabalho inconsciente é devolvido à mente consciente num momento em que não apresenta relação com o que esta última está fazendo. Nessa hora a visão fenomenológica é ainda mais enganosa, pois o trabalho acabado pode aparecer no consciente nos momentos mais surpreendentes, em relação aparente com eventos bastante ocasionais.

Como a mente inconsciente sabe o que retransmitir à mente consciente? É aqui que Poincaré vê o papel da estética. Ele acredita, em conseqüência de observação empírica, que as idéias devolvidas não são necessariamente as soluções corretas do problema original. Portanto, ele conclui que o inconsciente não é capaz de determinar rigorosamente se uma idéia é correta. Mas as idéias devolvidas apresentam sempre a marca da beleza matemática. A função do terceiro estágio de trabalho é examinar consciente e rigorosamente os resultados obtidos do inconsciente. Eles podem ser aceitos, modificados ou rejeitados. Neste último caso, o inconsciente pode ser chamado novamente à ação. Observamos que o modelo postula um terceiro agente adicionado às mentes consciente e inconsciente. Este agente se assemelha de certo modo a um censor freudiano; sua tarefa é inspecionar o caleidoscópio variável dos padrões inconscientes, permitindo apenas àqueles que satisfaçam seus critérios estéticos passar através do limiar entre as mentes.

Poincaré está descrevendo o mais alto nível da criativi-

dade matemática, e não se pode assumir que o trabalho matemático mais elementar siga os mesmos processos dinâmicos. Mas em nosso próprio esforço em direção à uma teoria do pensamento matemático não deveremos também assumir a posição contrária, e assim, é encorajador vislumbrar até mesmo limitadas semelhanças estruturais entre os processos descritos por Poincaré e os padrões exibidos por não-matemáticos aos quais pedimos para trabalhar em problemas matemáticos, no que veio a ser conhecido, no MIT, como "Pensar em Voz Alta", uma coleção de técnicas planejadas para aliciar pensamento produtivo (geralmente em domínios, como da matemática, que eles normalmente evitariam) e fazer o máximo possível para torná-lo explícito. O exemplo seguinte ilustra aspectos do que poderia ser o tipo mais simples de orientação estética da mente. Os sujeitos do experimento procederam claramente por uma análise combinatória, tal qual a que Poincaré postula no seu segundo estágio, até que foi obtido um resultado, que foi considerado satisfatório no sentido de que podem ser chamados tanto estéticos quanto lógicos. O processo difere da descrição de Poincaré pois permanece no nível do consciente. Isto poderia ser reconciliado com a sua teoria de várias maneiras: pode-se argumentar que o número de ações combinatórias necessárias para gerar o resultado aceitável é muito pequeno para requerer a passagem do problema para o nível inconsciente, ou que esses não-matemáticos não têm a habilidade de fazer tal trabalho inconscientemente. Em qualquer caso, a intenção do exemplo (de fato, deste ensaio como um todo) não é defender Poincaré em detalhe, mas ilustrar o conceito de orientação estética.

O problema dado aos indivíduos era provar que a raiz quadrada de 2 é irracional. A escolha aqui é particularmente apropriada porque este teorema foi selecionado pelo matemático inglês G. H. Hardy como um exemplo excelente de beleza matemática, e, conseqüentemente, é interessante, no contexto de uma discussão não elitista da estética matemática, descobrir que muitas pessoas com muito pouco conhecimento matemático são capazes de descobrir a prova, se condições de trabalho emocionalmente positivas as encoraja a continuar apesar da resistência à matemática. Os parágrafos seguintes descrevem um episódio pelo qual passaram quase todos os indivíduos de nossa investigação. Com o propósito

de nos projetar dentro deste episódio, vamos supor que estebelecemos a equação:

$$\sqrt{2} = p/q \text{ onde } p \text{ e } q \text{ são números inteiros.}$$

Vamos também supor que não acreditamos que a $\sqrt{2}$ possa ser expressa assim. Para provar isto, não procuramos revelar algo bizarro, de fato contraditório, por trás da impressão superficial impenetravelmente inocente da equação. Nós claramente temos de fazer uma interação de conteúdos latentes e manifestos. Que passos ajudam em tais casos?

Quase como se tivessem lido Freud, muitos indivíduos engajam-se num processo de "associação livre" de matemática, tentando várias transformações associadas com equações desse tipo. Aqueles que são mais sofisticados matematicamente necessitam um menor número de tentativas, mas nenhum deles parece ser guiado por uma previsão de onde o trabalho chegará. Aqui estão alguns exemplos de transformações na ordem em que foram produzidas por um deles:

$$\begin{aligned} \sqrt{2} &= p/q \\ \sqrt{2} \times q &= p \\ p &= \sqrt{2} \times q \\ (\sqrt{2})^2 &= (p/q)^2 \\ 2 &= p^2/q^2 \\ p^2 &= 2q^2 \end{aligned}$$

Todos os indivíduos que se envolveram de forma menos superficial no projeto mostraram sinais inconfundíveis de excitação e prazer quando chegaram à última equação. Esse prazer não depende de saber (pelo menos conscientemente) aonde o processo está levando. Ele acontece antes dos indivíduos serem capazes de dizer o que farão a seguir, e, de fato, acontece até mesmo nos casos em que não se faz nenhum progresso. E a reação a $p^2 = 2q^2$ não é apenas afetiva; uma vez vista, os sujeitos raramente olham para trás, para qualquer das transformações anteriores, ou até mesmo para as equações originais. Portanto, há algo de muito especial a respeito de $p^2 = 2q^2$. O que é? Nos concentremos primeiro no fato de

que ela tem, indiscutivelmente, uma carga de prazer e especulemos sobre as origens dessa carga. Qual o papel do prazer em matemática?

O prazer é, naturalmente, experienciado muitas vezes no trabalho matemático, como se a pessoa estivesse se autore-compensando quando alcança um objetivo desejado depois de uma luta árdua. Mas é altamente implausível que esta equação real tivesse sido antecipada aqui como um objetivo preestabelecido. Se o prazer fosse o de atingir um objetivo, o objetivo era de natureza muito diferente, menos formal, eu diria "mais estético" que conseguir chegar à uma equação particular. Para saber exatamente o que é seria necessário um conhecimento muito maior do que se pode incluir aqui acerca de cada um dos indivíduos. Certamente é diferente para cada um deles e até mesmo com determinações múltiplas de objetivos em cada um. Alguns explicitamente estabeleceram eles mesmos o objetivo: "Livre-se da raiz quadrada". Outros não pareceram fazer isso explicitamente, mas ficaram, não obstante, contentes ao ver o sinal da raiz quadrada desaparecer. Outros ainda não tiveram uma reação especial ao aparecimento de $2 = p^2/q^2$ até que isto se transformou em $p^2 = 2q^2$. A minha sugestão é que a eliminação da raiz quadrada para o objetivo instrumental, óbvio e simples, é apenas parte de uma história mais complexa: o evento é consonante com vários processos que podem ou não ser acessíveis à mente consciente e podem ou não ser explicitamente formulados como objetivos. Sugiro, também, que alguns desses processos derivam de outras fontes de prazer, mais específicas e talvez até mesmo mais primitivas do que uma realização de objetivo generalizado. A fim de tornar estas sugestões mais concretas, darei dois exemplos de tais processos que nos encham de satisfação.

O primeiro exemplo é melhor descrito em termos de um esquema* padrão de situações de cálculo que caracterizam o pensamento recente em inteligência artificial. A equação ori-

* O autor refere-se ao termos *frame* elaborados pelo pesquisador de inteligência artificial Marvin Minsky. *Frame* é um tipo de estrutura computacional para representação de informação, onde o que é representado é um "esquema" ou um "modelo" do conhecimento. A representação de uma situação particular concreta é feita preenchendo-se este "esquema" com informações específicas e pertinentes a esta situação. Por exemplo, o esquema usado para representarmos o que acontece num restaurante. Existe um "modelo" a ser seguido. A representação para o que

ginal é formalizada como um esquema onde existem "três atores", dos quais o princípio, ou ator "sujeito" é $\sqrt{2}$. Os outros dois atores; p e q , são figurantes cujo papel é meramente fazer asserções acerca do ator sujeito. Quando tornamos a situação em $p^2 = 2q^2$ é nitidamente diferente, como na reversão figura/fundo ou na substituição de um biombo por uma face na percepção de uma criancinha brincando de esconde-esconde. Agora p virou o sujeito, e o sujeito anterior, $\sqrt{2}$, desapareceu. Será que isto se nutre das fontes de prazer que levam as crianças universalmente gostar de esconde-esconde?

O outro exemplo do que deve ser agradável neste processo deriva da observação de que o 2 não desapareceu completamente, sem deixar traço. O 2 ainda é visível em $p^2 = 2q^2$! Entretanto, essas duas ocorrências de 2 são tão diferentes em seus papéis que identificá-los dá à situação a qualidade de jogo de palavras, ou "condensação", algo parecido com o que Freud vê como fundamental à eficiência do humor. O atrativo e plausibilidade desta sugestão decorre da possibilidade de ver a condensação em muitas situações matemáticas. Na verdade, a idéia mais central de matemática abstrata poderia ser vista como uma condensação: a descrição "abstrata" significa simultaneamente coisas "concretas" muito diferentes. Isto nos permite conjecturar que a matemática tem mais em comum com piadas, sonhos e histeria do que é comumente reconhecido?

Certamente é perigoso ir muito longe no sentido de apresentar os méritos de $p^2 = 2q^2$ isoladamente de seu papel na realização do objetivo original, que não era estimular os sentidos do prazer matemático, mas provar que $\sqrt{2}$ é irracional. A afirmação dos dois parágrafos anteriores necessita ser fundida com um entendimento de como o trabalho se focalizou em $p^2 = 2q^2$ através de um processo não totalmente independente de reconhecê-lo como um sub-objetivo do superobjetivo de provar um teorema. Como nós integramos o funcional com o estético? Para aqueles que consideram o sistema de sub-objetivo eminentemente funcional como o motivo principal, o

acontece em um determinado restaurante é feita completando-se este modelo com as particularidades do restaurante em consideração. Para maior elaboração do assunto ver: "A framework for representing knowledge", de Marvin Minsky, em *The Psychology of Computer Vision*, editado por Patrick H. Winston (Nova Iorque, McGraw-Hill, 1975). (N.T.).

gesto mais simples nessa direção é alargar o universo do discurso no qual os sub-objetivos podem ser formulados. Promover um personagem subordinado (ou seja, p) na cena do problema para um papel principal é, dentro de um sistema apropriado de esquemas padrões, um sub-objetivo tão bem definido, como, por exemplo, achar a solução numérica de uma equação. Mas agora nós estamos falando sobre objetivos que perderam sua especificidade matemática e podem ser compartilhados com situações não-matemáticas da vida ou literatura. Tomada em seu extremo, esta linha de pensamento nos conduz a contemplar a matemática, até mesmo em seus detalhes, como uma representação de outra coisa: os atores podem ser objetos matemáticos, mas a trama é descrita em outros termos. Até mesmo em suas formas menos extremas isto mostra como o estético e o funcional podem entrar numa relação simbiótica, por assim dizer, de exploração mútua. O objetivo funcional matemático é alcançado através de um jogo de sub-objetivos formulados em outro discurso, não-matemático, valendo-se do conhecimento extrematístico correspondente. Então, o funcional tira partido do estético. Mas, até onde podemos ver (aqui, num espírito muito freudiano) o próprio processo matemático como dramatizando processos pré-matemáticos, o reverso também é verdadeiro.

Estas especulações vão um pouco (muito pouco) na direção de mostrar como a estética sentinela matemática de Poincaré poderia ser reconciliada com modelos de pensamento existentes para enriquecimento de ambos. Mas a tentativa de fazer isso coloca de modo muito definido uma questão fundamental acerca do relacionamento entre o funcional e o estético, e facetas hedonísticas não apenas da matemática mas de todo trabalho intelectual. O que há sobre cada um destes que os torna capazes de servir um ao outro? Não é muito estranho que o conhecimento, ou os princípios de apreciação úteis fora da matemática teriam uma aplicação dentro dela? A resposta deve repousar numa teoria genética da matemática. Se adotamos uma visão platônica (ou lógica) da matemática, como existindo independentemente de quaisquer propriedades da mente ou da atividade humana, somos forçados a ver essas interpelações como altamente improváveis. Nas páginas restantes eu deverei tocar em mais alguns exemplos de como a matemática pode ser vista a partir de uma perspectiva que

torna seu relacionamento com outras estruturas humanas mais natural. Começamos por examinar um outro episódio da história acerca de raiz quadrada de dois.

Nossa discussão sobre $p^2 = 2q^2$ foi quase brutalmente não-teleológica pois nós a discutimos apenas de um lado, o lado de onde ela veio, fingindo ignorância a respeito de para onde ela estava indo. Agora remediamos isso ao ver como ela serve à intenção original do trabalho, que era achar uma contradição na hipótese $\sqrt{2} = p/q$. Acontece que há vários caminhos a seguir para esse objetivo. Destes deverei contrastar dois que diferem numa dimensão que se pode chamar “*gestalt versus* atomístico” ou “oh! idéia luminosa instantânea *versus* raciocínio passo a passo”. A forma passo a passo é a mais clássica (é atribuída ao próprio Euclides) e procede da seguinte maneira. Podemos interpretar de $p^2 = 2q^2$ que p^2 é par. Segue-se que p é par. Por definição isto significa que p é duas vezes algum outro número inteiro que poderemos chamar r . Portanto:

$$\begin{aligned} p &= 2r \\ p^2 &= 4r^2 \\ 2q^2 &= 4r^2 \text{ lembre-se: } p^2 = 2q^2(!) \\ q^2 &= 2r^2 \end{aligned}$$

e nós deduzimos que q também é par. Mas isto na realidade é manifestamente bizarro pois nós escolhemos p e q em primeiro lugar, e poderíamos, se quiséssemos, ter assegurado que eles não tivessem fator comum. Assim, há uma contradição.

Antes de comentar o aspecto estético deste processo, olhemos a versão tipo “idéia luminosa” da prova. Ela depende de se ter uma certa percepção de números inteiros, isto é, como uma coleção única de fatores primos: $6 = 3 \times 2$ e $36 = 3 \times 3 \times 2 \times 2$. Se você possui este esquema padrão para perceber números, você provavelmente tem um senso de percepção imediata de um quadrado perfeito (36 ou p^2 ou q^2) como um conjunto par. Se você não o possui, nós teremos de usar argumentos passo a passo (tais como seja $p = p_1, p_2 \dots p_k$ tal que $p^2 = p_1 p_1 p_2 p_2 \dots p_k p_k$), e esta prova então se torna ainda mais atomística e certamente menos agradável que a forma clássica. Mas se você vê (ou treina-se para ver) p^2 e q^2 como conjuntos pares, você também verá $p^2 = 2q^2$ como

sendo uma asserção absurda de que um conjunto par é igual a um conjunto ímpar (q^2 e um fator adicional: 2). Então, dados os esquemas padrões corretos para perceber números, $p^2 = 2q^2$ é (ou assim parece ser, do ponto de vista fenomenológico) diretamente percebido como absurdo.

Embora muito se possa dizer sobre a estética comparativa dessas duas pequenas provas, eu deverei me concentrar em apenas uma faceta da beleza e do prazer encontrado por alguns indivíduos em nosso experimento. Muitas pessoas ficam impressionadas com o brilho da segunda prova. Mas se esta última atrai por sua inteligência e rapidez, não segue de modo algum que a primeira perca por ser (como eu a vejo) essencialmente serial. Pelo contrário, há algo muito poderoso na maneira em que se é capturado e carregado inexoravelmente através do processo serial. Eu não quero só dizer que a prova é retoricamente convincente quando bem apresentada por outra pessoa, embora este seja um fator importante no aspecto de esporte público da matemática. Eu quero dizer que se precisa de muito pouco conhecimento matemático para que os passos sejam mudanças forçadas, de modo que uma vez que se começa na pista se perceberá que é gerada toda a prova.

Pode-se experienciar o processo da inevitabilidade de modos muito diferentes, com diferentes tipos de afeto. Pode-se experienciá-lo como sendo tomado numa relação de submissão temporária. Ou como uma rendição à matemática, ou à outra pessoa, ou uma parte de si mesmo a uma outra. Pode-se experienciá-lo não como uma submissão mas como o exercício de um poder estimulante. Qualquer um destes pode ser experienciado como belo, feio, prazeroso, repulsivo ou assustador.

Estas considerações, embora permaneçam na superfície do fenômeno, são suficientes para colocar em séria dúvida as razões de Poincaré para acreditar que a faculdade de estética matemática é inata e independente de outros componentes da mente. Elas também sugerem muitas maneiras nas quais fatores de um tipo que Poincaré não considera podem, em princípio, influenciar poderosamente um indivíduo a achar a matemática bela ou feia e quais os tipos de matemática ele particularmente apreciará ou abominará. A fim de ver esses fatores um pouco mais claramente, vamos deixar por alguns momen-

tos a matemática e olhar um exemplo de uma obra de ficção muito sensível: *Zen and the Art of Motorcycle Maintenance*, de Robert Pirsig. O livro é uma novela filosófica acerca de diferentes estilos de pensamento. O personagem principal, que narra os eventos, e seu amigo John Sutherland estão viajando de moto, em férias, que começa na costa leste do estado de Montana, nos Estados Unidos. Algum tempo antes da viagem contada no livro, John Sutherland tinha mencionado que o seu guidom estava escapando. O narrador logo decidiu que era necessário algum calço e propôs prendê-lo com suportes feitos de uma lata de cerveja de alumínio. "Eu mesmo pensei que isto fosse bastante engenhoso" ele diz, descrevendo sua surpresa com a reação de Sutherland, que quase rompeu com a amizade. Para Sutherland, a idéia estava longe de ser engenhosa, ela era indescritivelmente ofensiva. O narrador explica: "Eu tive a ousadia de propor consertar sua nova BMW de mil e oitocentos dólares, o orgulho de meio século de *finesse* mecânica alemã, com um pedaço de uma lata de cerveja velha!" Mas, para o narrador não há conflito; pelo contrário: "A lata de cerveja de alumínio é macia e pegajosa como metal. Perfeita para a aplicação... em outras palavras, qualquer mecânico alemão de verdade, com meio século de *finesse* mecânica por trás dele, haveria de concluir que esta solução particular para este problema técnico particular era perfeito". A diferença prova ser intransponível e emocionalmente explosiva. A amizade só é salva por um tácito acordo de nunca mais discutir a manutenção e reparo de motos apesar dos dois amigos serem bastante próximos um do outro e de suas motos para embarcarem juntos na longa viagem descrita no livro.

A reação de Sutherland seria inconseqüente para nosso problema se mostrasse estupidez, ignorância ou uma peculiaridade idiossincrática acerca de soluções *ad hoc* para problemas de consertos. Mas ela vai além de qualquer um destes casos. O feito de Pirsig é mostrar-nos a coerência em vários incidentes como esse. Esse feito é bastante impressionante. Pirsig nos apresenta materiais tão ricos que nós podemos usá-los para apreciar tipos de coerência implícitos em incidentes que são um pouco diferentes do proposto pelo próprio Pirsig. Aqui eu quero tocar rapidamente em duas analogias entre a história de Sutherland e o calço feito com lata de cerveja e

assuntos que tenho discutido em relação à matemática: primeiro, o relacionamento entre estética e lógica ao se pensar a matemática, assim como motos, e, segundo, as linhas de continuidade e descontinuidade entre as matemáticas, ou motos e tudo o mais.

A partir do próprio incidente do calço de lata, e ainda muito mais do resto do livro, fica claro que a continuidade entre o homem, a máquina, e o ambiente natural é muito diferente para cada um dos personagens de Pirsig e que essas diferenças afetam profundamente suas apreciações estéticas. Para o narrador, a moto é contínua com o mundo não apenas das latas de cerveja mas muito mais geralmente, com o mundo dos metais (tomados como substância). Neste mundo, a identidade do metal não é redutível a uma corporificação particular do metal como moto ou como lata. Nem qualquer identidade pode ser reduzida a um exemplo particular disto. Para Sutherland, pelo contrário, essa continuidade não é meramente invisível. Ele tem uma forte propensão para manter as fronteiras entre o que o narrador vê como manifestações superficiais da mesma substância.

Para Sutherland, a moto não é apenas um mundo à parte das latas de cerveja; é até mesmo um mundo à parte de outras máquinas, um fato que o habilita a relacionar-se sem conflito com esta peça de tecnologia como um meio para escapar da tecnologia. Poderíamos aprofundar a análise da propensão desses dois personagens em suas respectivas posições notando seus envolvimento muito diferentes no trabalho e na sociedade. O narrador é parte de uma sociedade industrial (ele trabalha numa companhia de computação) e é forçado a procurar sua própria identidade (como ele procura a identidade do metal) no sentido de sua *substância*, que se encontra além da forma particular na qual ele foi moldado. Como metal maleável ele é alguma coisa além e talvez melhor do que a forma que lhe é imposta agora. Ele certamente não se define como um escritor de manuais de computação. Seu amigo Sutherland, por outro lado, é um músico e é muito mais capaz de enfrentar seu trabalho como tal, o que estrutura sua imagem de si mesmo do mesmo modo que ele toma a moto como uma moto e a lata de cerveja como uma lata de cerveja.

Não precisamos discutir estas questões de essência e aci-

dente por muito tempo, a fim de ressaltar um ponto importante, e um ponto que é amplamente ignorado: se estilos de envolvimento com a manutenção de motos são tão intrinsecamente entrelaçados com nossas identidades psicológica e social, raramente se poderia esperar que isto fosse menos verdadeiro com relação às variedades de envolvimento de indivíduos com a matemática.

Essas idéias do relacionamento do trabalho matemático com a pessoa como um todo foram esclarecidas anteriormente neste livro pela geometria da Tartaruga, tal como ela é usada na linguagem de programação LOGO. Estes experimentos expressam uma crítica da tradicional matemática escolar (que se aplica tanto à velha quanto a assim chamada matemática moderna). Uma descrição da tradicional matemática escolar em termos dos conceitos que nós desenvolvemos neste ensaio a revelaria, em sua encarnação "formal" puramente lógica, como sendo uma caricatura da matemática, e despersonalizada. Embora possamos documentar progressos na retórica dos professores de matemática (professores da matemática moderna são ensinados a falar em termos de "compreensão" e "descoberta"), o problema permanece por causa do que eles estão ensinando.*

Na geometria da Tartaruga nós criamos um ambiente no qual a tarefa da criança não é aprender um conjunto de regras formais mas desenvolver "idéias" suficientes sobre o modo como ela se move no espaço para permitir a transposição deste conhecimento de si mesmo para programas que levam a Tartaruga a se mover. Nesta altura o leitor deste livro está muito familiarizado com o potencial deste animal cibernético. Mas o que eu gostaria de fazer aqui é recordar e sublinhar dois aspectos intimamente relacionados da geometria da Tartaruga que são diretamente relevantes à preocupação deste ensaio. O primeiro é o desenvolvimento de uma matemática ego-sintônica, na verdade, de uma matemática "corpo-sintônica", o segundo é o desenvolvimento de um contexto para o trabalho matemático onde a dimensão estética (até no seu sentido mais estrito de "bonito") é colocada continuamente em primeiro plano.

Devemos dar um único exemplo que esclarece ambos os

* Os parágrafos seguintes foram modificados para dar continuidade a este livro.

aspectos: um exemplo de um problema típico que surge quando uma criança está aprendendo a geometria da Tartaruga. A criança já aprendeu como comandar a Tartaruga para ir para a frente na direção que está apontando e a girá-la em torno de seu eixo, ou seja, a girar um número de graus à direita ou à esquerda de acordo com o comando fornecido por ela. Com estes comandos a criança escreveu programas que levam a Tartaruga a desenhar figuras de linhas retas. Mais cedo ou mais tarde a criança faz a pergunta: "Como posso fazer a Tartaruga desenhar um círculo?" Em LOGO, nós não fornecemos "respostas", mas encorajamos os aprendizes a usar seu próprio corpo a fim de achar a solução. A criança começa a andar em círculos e descobre como fazer um círculo andando um pouco para a frente, girando um pouco, andando um pouco para a frente, girando um pouco. Agora a criança sabe como fazer a Tartaruga fazer um círculo: simplesmente, dê à Tartaruga os mesmos comandos que daria a si próprio. Expressar "ande um pouco para frente, gire um pouco" se traduz na linguagem da Tartaruga como REPITA [PARA FRENTE 1 PARA DIREITA 1]. Então nós vemos um processo de raciocínio geométrico que é ao mesmo tempo ego-sintônico e corpo-sintônico. E uma vez que a criança saiba como colocar círculos na tela com a velocidade da luz, um conjunto ilimitado de formas, figuras, e movimento foi aberto. Desse modo a descoberta do círculo (e, naturalmente, da curva) é um ponto decisivo para a habilidade da criança atingir uma experiência estética direta através da matemática.

Nos parágrafos acima parece que a matemática ego-sintônica foi inventada recentemente. Certamente não se trata disso e, de fato, contradiria o ponto salientado repetidamente neste ensaio: que a matemática do matemático é profundamente pessoal. Também não se trata de termos inventado a matemática ego-sintônica para crianças. Nós meramente demos às crianças um modo delas se reapropriarem do que sempre foi delas. Muitas pessoas sentem que não têm nenhum envolvimento "pessoal" com matemática, entretanto, como crianças eles a construíram para si mesmos. Os trabalhos de Jean Piaget na epistemologia genética nos ensinam que desde o primeiro dia de vida uma criança está engajada num empreendimento de extrair conhecimento matemático da interseção do corpo com o ambiente. O ponto é que, com ou sem

intenção, o ensino da matemática, tal como é feito tradicionalmente em nossa escola, é um processo pelo qual pedimos à criança para esquecer a experiência natural da matemática a fim de aprender um novo conjunto de regras.

Este mesmo processo de esquecer as raízes extralógicas até recentemente dominava a história formal da matemática na academia. No começo do século XX, a lógica formal foi vista como sinônimo do fundamento da matemática. Somente quando apareceu a teoria estruturalista de Bourbaki nós vimos um desenvolvimento interno da matemática que tornou-lhe acessível a "rememoração" de suas raízes genéticas. Essa "rememoração" colocou a matemática num relacionamento o mais próximo possível do desenvolvimento de pesquisa acerca de como as crianças constroem suas realidades.

As consequências destas correntes e daquelas que encontramos antes na psicologia cognitiva e dinâmica põem o empreendimento de entender a matemática no limiar de um novo período solenemente introduzido pela afirmação epigramática de Warren McCulloch de que nem o homem nem a matemática podem ser completamente compreendidos separadamente. Quando perguntado sobre que questão orientaria sua vida científica, McCulloch respondeu: "O que é um homem, feito de tal modo que pode compreender número e que é número, feito de tal modo que um homem pode entendê-lo?"

Considerações finais e agradecimentos

Em 1964 eu mudei de um mundo para outro. Durante os cinco anos anteriores eu vivera em aldeias nos Alpes, perto de Genebra, Suíça, onde trabalhava com Jean Piaget. O foco de minha atenção eram as crianças, a natureza do pensamento, e como as crianças se tornam pensadores. Mudei para o MIT, para um mundo urbano de cibernética e computadores. Ainda tinha minha atenção focalizada na natureza do pensamento, mas agora minha preocupação imediata estava no problema da Inteligência Artificial: como fazer máquinas que pensem?

Não poderia haver dois mundos mais diferentes. Mas, eu fiz a transição porque acreditava que o meu novo mundo das máquinas poderia fornecer uma perspectiva que talvez levasse às soluções dos problemas que nos tinham iludido no antigo mundo das crianças. Olhando para trás vejo que a fertilização-cruzada trouxe benefício em ambas as direções. Ha vários anos Marvin Minsky e eu temos trabalhado numa teoria geral da inteligência (chamada “A Teoria da Sociedade da Mente”) que emergiu duma estratégia de refletir simultaneamente sobre como as crianças pensam e como os computadores poderiam pensar.

Minsky e eu, naturalmente, não somos os únicos pesquisadores a usar a teoria de computação (ou processamento da informação) como uma fonte de modelos a serem utilizados na explicação de fenômenos psicológicos. Ao contrário, esta abordagem foi usada por pessoas como Warren McCulloch, Allen Newell, Herbert Simon, Alan Turing, Norbert Wiener e um grande número de pessoas mais jovens. Mas o ponto de partida deste livro foi um ponto de vista — articulado primeiramente em colaboração com Minsky — que nos separa de forma bastante nítida da maioria dos outros membros dessa companhia: isto é, ao ver as idéias da ciência da computação não apenas como *instrumentos de explanação* de como funciona a aprendizagem e o pensamento, mas também como *instrumentos de mudança* que podem alterar, e possivelmente melhorar, a maneira como as pessoas aprendem e pensam.

O livro brotou de um projeto planejado para explorar esse conceito que oferece às crianças um acesso ao “melhor da ciência da computação”, incluindo algumas de suas melhores tecnologias e idéias. No âmago do projeto estava a criação de um ambiente de aprendizagem para crianças, no mesmo prédio que hospeda o Laboratório de Inteligência Artificial do MIT e o Laboratório de Ciência de Computação (Projeto MAC). Nós esperávamos que ao trazer as crianças e pessoas particularmente interessadas em crianças para este mundo de computadores e informatas, criaríamos condições para um fluxo de idéias para se refletir sobre educação.

Não tentarei descrever tudo o que aconteceu durante este projeto ou tudo que dele se aprendeu, mas me concentrarei em algumas reflexões pessoais. Os leitores que desejarem saber mais sobre o próprio projeto encontrarão indicações de outras publicações nas notas deste livro.

O projeto é realmente um experimento em interação cultural. Ele busca desenvolver uma nova “cultura educacional” num ambiente permeado por uma forma particular de “cultura computacional”. Tantas eram as pessoas envolvidas que não consegui conhecer todas pelos nomes. A troca de idéias aconteceu muito mais em conversas nas quietas horas após a meia-noite (pois a cultura computacional não respeita os ciclos horários convencionais) do que em seminários organizados ou trabalhos escritos. Em rascunhos anteriores tentei fazer a crônica do desenvolvimento desta cultura. Mas isso

provou ser muito difícil e no final eu escrevi o livro num estilo muito pessoal. Isso apresenta uma certa vantagem pois me permite dar uma rédea mais solta às minhas interpretações pessoais de idéias e incidentes que outros participantes talvez vissem de modo bastante diferente. Espero que isso não obscureça meu senso de pertencer a uma comunidade e de expressar um conjunto de idéias que são compartilhadas com os seus demais membros. Lamento que o espaço não me permita mostrar como algumas dessas idéias foram retomadas por outros e elaboradas em formas muito mais avançadas.

Marvin Minsky foi a pessoa mais importante na minha vida intelectual durante a gestação das idéias deste livro. Foi dele que primeiro aprendi que a computação poderia ser mais do que uma ciência teórica e uma arte prática: ela também pode ser o material a partir do qual modelar uma visão poderosa e pessoal do mundo. Tenho desde então encontrado várias pessoas que assim o fizeram com sucesso e de modo inspirado. Destas, uma que se destaca por ter tão consistentemente direcionado sua visão computacional pessoal para refletir sobre crianças é Alan Kay. Durante toda a década de 1970 seu grupo de pesquisa no Centro de Pesquisa de Palo Alto da Xerox e nosso grupo do MIT foram os únicos pesquisadores de computação para crianças que decidiram claramente não ser possível realizar pesquisa relevante baseada nos computadores primitivos que estavam disponíveis nas escolas, centros de pesquisa, e laboratórios de pesquisa educacional. Para mim, a frase “computador como lápis” evoca os tipos de usos de computadores que imagino serão feitas pelas crianças do futuro. Os lápis são usados tanto para rabis-car como para escrever, para garatujar assim como desenhar, para notas ilícitas assim como para tarefas oficiais. Kay e eu partilhamos uma visão na qual o computador seria usado tanto de forma casual quanto de forma pessoal para uma diversidade de finalidades ainda maior. Mas nem o terminal de computador de 1970 nem o computador pessoal da Radio Shack de 1980 têm o poder e a flexibilidade para fornecer sequer uma aproximação desta visão. Para fazer isso, um computador deve oferecer melhores recursos gráficos e uma linguagem muitíssimo mais flexível do que os computadores dos anos 70 podem fornecer a um preço acessível a escolas e indivíduos.

Em 1967, antes que o laboratório de crianças do MIT fosse formalmente criado, eu comecei a pensar sobre planejar uma linguagem de computação que seria apropriada a crianças. Isto não significava que devia ser uma linguagem “de brinquedo”. Pelo contrário, eu desejava que ela tivesse o poder das linguagens de programação profissionais, mas também queria que ela tivesse fáceis vias de acesso para principiantes sem domínio da matemática. Wallace Feurzeig, chefe do Grupo de Tecnologia Educacional na firma de pesquisa de Bolt Beranek e Newman, rapidamente reconheceu o mérito da idéia e arrumou financiamento para a primeira implementação e experimentação da linguagem. O nome LOGO foi escolhido para a nova linguagem para sugerir o fato de ser primariamente simbólica e apenas secundariamente quantitativa. Meu plano original para a linguagem foi grandemente melhorado ao longo de discussões com Daniel Bobrow, que tinha sido um dos primeiros alunos de pós-graduação do grupo de Inteligência Artificial do MIT, Cynthia Salomon, e Richard Grant, sendo que naquela época todos trabalhavam na Bolt Beranek e Newman. A maior parte dos desenvolvimentos subsequentes da linguagem LOGO, que já atravessou várias etapas de “modernização”, realizaram-se no MIT. Das muitas pessoas que contribuíram para isso posso listar apenas algumas: Harold Abelson, Bruce Edwards, Andrea diSessa, Gary Drescher, Ira Goldstein, Mark Gross, Ed Hardeback, Danny Hillis, Bob Lawler, Ron Lebel, Henry Lieberman, Mark Miller, Margareth Minsky, Cynthia Salomon, Wade Williams e Terry Winograd. Durante muitos anos Ron Lebel foi o programador-chefe de sistemas, encarregado do desenvolvimento do LOGO. Mas as pessoas que trabalhavam diretamente com o LOGO formam a ponta do *iceberg*: a influência da comunidade do MIT sobre o LOGO foi muito mais profunda.

Nosso Laboratório de Inteligência Artificial tem estado sempre próximo do centro de um movimento de aspecto fortemente contracultural no mundo mais amplo dos computadores, que encara as linguagens de programação como possuindo profundo compromisso epistemológico e estético. Para mim, essa visão “whorfiana” foi melhor articulada no trabalho de três cientistas da computação que eram alunos de pós-graduação no tempo em que o LOGO estava se forman-

do: Carl Hewitt, Gerald Sussman e Terry Winograd. Mas ela remonta aos fundadores do grupo de Inteligência Artificial do MIT, Marvin Minsky e John McCarthy, e deve muito à tradição dos *hackers*, dos quais eu senti mais diretamente a influência de William Gosper e Richard Greenblatt. Na atmosfera cultural criada por tais pessoas, era inaceitável que as crianças entrassem na cultura de computação através de linguagens tipo BASIC, do mesmo modo que seria inaceitável confinar seu acesso à poesia inglesa através de traduções para um dialeto inglês.

Eu sempre quis aprender um *hobby* e desenvolvi muitas idéias a respeito de sua natureza ao cultivar a sensibilidade de observar minhas ações ao fazê-lo. Portanto, eu talvez tenha me engajado na aprendizagem deliberada de uma maior variedade de assuntos que a maioria das pessoas. Exemplos de coisa que eu aprendi com esse espírito inclui capítulos de ciência (como termodinâmica), ler caracteres chineses, pilotar aviões, várias cozinhas típicas, desempenhar artes circenses, como malabarismo, e até dois turnos de viver durante várias semanas com óculos de distorção (numa ocasião a distorção era inverter esquerda e direita, na outra era uma distorção prismática mais complexa do campo visual). Parte do que achei de tão atraente na comunidade de Inteligência Artificial era um interesse compartilhado na abordagem de usar a si mesmo como fonte de idéias sobre os processos psicológicos e um interesse particular em se observar a si próprio ocupado em hábeis atividades. Aqui eu tenho, outra vez, dívidas para com muitas pessoas e sou capaz de destacar apenas aquelas cujas contribuições foram mais salientes: Howard Austin, Jeanne Bamberger, Ira Goldstein, Bob Lawler, Gerald Sussman, e os alunos de pós-graduação que participaram dos meus seminários de "pensar em voz alta", onde tais métodos eram explorados. Minha abordagem do "pensar em voz alta" adquiriu uma maior sofisticação durante um período de colaboração com Donald Schon e Benson Snyder e de relacionamento com alguns psicólogos, incluindo Edith Ackermann, Daniel Bobrow, Howard Gruber, Annette Karmiloff-Smith e Donald Norman.

Todas essas influências contribuíram para a emergência de uma metodologia de ensino/aprendizagem no ambiente computacional que estávamos construindo para crianças. A

pessoa mais próxima de mim nesse trabalho foi Cynthia Salomon. Como no caso de Marvin Minsky, minha colaboração com ela foi tão próxima durante um período de tempo tão longo que acho impossível enumerar as suas contribuições substanciais. Salomon também foi a primeira a desenvolver uma metodologia intelectualmente coerente para treinar professores para introduzir crianças ao computador e ainda é uma das poucas pessoas que abordaram esse problema com a seriedade que ele merece.

Muitas pessoas contribuíram com idéias de como ensinar LOGO às crianças. Ira Goldstein encarregou-se do difícil problema de desenvolver um arcabouço teórico para o processo instrucional e foi seguido por Mark Miller nesse trabalho. Outros abordaram o ensino num espírito mais pragmático. Contribuições especiais foram feitas por Howard Austin, Paul Goldenberg, Gerianne Goldstein, Virginia Grammar, Andree Green, Ellen Hildreth, Kiyoko Okumura, Neil Rowe e Dan Watt. Jeanne Bamberger desenvolveu métodos para usar LOGO na aprendizagem de música e para aumentar a sensibilidade dos professores em relação a seus próprios pensamentos.

Uma idéia central, subjacente ao nosso ambiente de aprendizagem, era que as crianças seriam capazes de usar idéias poderosas da matemática e da ciência como instrumentos de poder pessoal. Por exemplo, a geometria tornou-se um modo de criar efeitos visuais numa tela de televisão. Mas atingir isso muitas vezes significa desenvolver novos tópicos em matemática e ciência, uma empreitada que foi possível apenas porque nós estávamos trabalhando dentro de uma instituição rica em talentosos matemáticos criativos. A tarefa é de um novo tipo: consiste em fazer o que é realmente pesquisa original em matemática ou ciência, mas em direções escolhidas para levar o conhecimento a formas mais compreensíveis ou mais "apreensíveis" e não pelo tipo de razões que tipicamente motivam a pesquisa matemática. Muitos alunos e professores do MIT contribuíram para este trabalho, mas dois se destacam como profissionais nessa área: Harold Abelson, matemático, e Andrea diSessa, físico.

Muitos pesquisadores do LOGO contribuíram para a estética dos desenhos da Tartaruga. Aquelas que mais me influenciaram foram Cynthia Salomon, Ellen Hildreth e Ilse Schenck (que elaborou o jardim e pássaros deste livro).

Neste livro escrevo sobre crianças, mas, de fato, a maioria das idéias expressas são relevantes para como as pessoas aprendem em qualquer idade. Faço referências específicas a crianças como uma reflexão de minha convicção pessoal de que é a criança de mais tenra idade a que tem mais a ganhar com a mudança de condições de aprendizagem. A maioria das crianças que colaboraram conosco pertenciam à faixa etária correspondente aos meados do 1.º grau. Radia Perlman foi a primeira a explorar técnicas para trabalhar com crianças bem mais novas, até de quatro anos de idade. Abelson e disessa especializaram-se no trabalho com alunos mais velhos, de 2.º e 3.º graus. Gary Drescher, Paul Goldenberg, Silvia Weir e José Valente estão entre aqueles pioneiros em ensinar LOGO a crianças severamente deficientes. Bob Lawler desenvolveu o primeiro, e por enquanto o único, exemplo de um experimento de aprendizagem de um tipo diferente, um tipo que penso que se tornará muito importante no futuro. No seu experimento, Lawler observou uma criança em "tempo integral" durante um período de seis meses a fim de apreender não apenas a aprendizagem, que ocorreu em situações planejadas, mas toda a aprendizagem manifesta ocorrida durante aquele período. Também fui influenciado por outro estudo de "aprendizagem natural" sendo conduzido agora como parte da pesquisa de Lawrence Miller para sua tese em Harvard. Ambos forneceram dados para uma posição intelectual geral subjacente a este livro: a melhor aprendizagem ocorre quando o aprendiz a assume. A tese de doutoramento de Edwina Michner foi um estudo de aprendizagem de uma espécie muito diferente, foi uma tentativa de caracterizar alguns dos conhecimentos matemáticos que a cultura matemática não coloca em livros.

Eu agradei meus compromissos intelectuais a muitas pessoas. E devo agradecer à maioria delas também por outro motivo: pelo apoio e paciência com um estilo de trabalho muitas vezes desorganizado. Sou extremamente grato a todos que me agüentaram, especialmente Gregory Gargarian, que tinha a função muito difícil de manter a organização do Laboratório LOGO e de pôr em dia as muitas versões sucessivas deste livro nos arquivos do computador. Além de sua competência e profissionalismo, sua amizade e apoio facilitaram muitos momentos da elaboração deste livro.

O MIT forneceu um ambiente intelectual altamente estimulante. Os seus ambientes administrativos também são muito especiais pois permitem o florescimento de projetos fora do comum. Muitas pessoas ajudaram no plano administrativo: Jerome Wiesner, Walter Rosenblith, Michael Dertouzos, Ted Martin, Benson Snyder, Patrick Winston, Barbara Nelson, Eva Kampits, Jim McCarthy, Gordon Oro, Russel Noftsker, George Wallace, Elaine Medverd e certamente outros. Destes eu tenho uma dívida muito especial para com Eva Kampits, que foi minha secretária e agora é Dra. Kampits.

O projeto LOGO não poderia ter acontecido sem uma espécie diferente de apoio que não mencionei até agora. A *National Science Foundation* financiou o projeto LOGO desde a sua concepção. Também quero mencionar algumas pessoas da fundação cuja compreensão imaginativa tornou possível nosso trabalho: Dorothy Derringer, Andrew Molnar e Milton Rose. O valor do apoio recebido dessas pessoas foi tanto moral como material, e gostaria de incluir nesta categoria Marjorie Martus, da Fundação Ford, Arthur Melmed, do *National Institute of Education*, Alan Ditman, do *Bureau for the Education of the Handicapped*, e Alfred Ricomi, da *Texas Instruments*. Gostaria também de incluir muito especialmente três indivíduos que nos deram apoio moral e material: Ida Green, Erik Jonsson e Cecil Green, todos de Dallas, Texas. Foi uma experiência particularmente rica para mim trabalhar junto a Erik Jonsson no desenvolvimento de um projeto para usar computadores na Escola Lamplighter em Dallas. Eu aprendi a apreciar sua clareza de pensamento e largueza de visão e a pensar nele como um colega e um amigo. Seu apoio às minhas idéias e sua intolerância com a minha desorganização ajudaram a fazer este livro acontecer.

John Berlow contribuiu excessivamente para a elaboração deste livro. Ele entra em cena como um editor inusualmente inteligente. Em todas as fases do desenvolvimento do manuscrito, suas leituras críticas e entusiásticas levaram a uma nova clareza e a novas idéias. Enquanto o projeto se desenvolvia ele se tornou para mim mais do que um editor. Ele se tornou um amigo, um parceiro de diálogo, um crítico e um modelo do tipo de leitor que eu mais desejo influenciar. Quando encontrei John, ele não possuía conhecimentos sobre computador, embora seu conhecimento de outras áreas o su-

prisse de uma base imediata para gerar suas próprias idéias a respeito de computadores e educação.

Há muitas pessoas cuja contribuição não pode ser classificada. Nicholas Negroponté é uma fonte constante de inspiração, em parte porque ele desafia qualquer classificação. Também desejo agradecer a Susan Hartnett, Androula Henriques, Barbel Inhelder, A. R. Jonckheere, Duncan Stuart Linney, Alan Papert, Dona Strauss e J. B. Tabata. E há umas poucas pessoas cujas divergências sobre como os computadores deveriam ser usados sempre foram valiosas: John Seeley Brown, Ira Goldstein, Robert Davis, Arthur Leuhrman, Patrick Suppes. Se o livro pode ser lido como uma expressão de pensamento positivo e otimista isto pode ser atribuído à minha mãe, Betty Papert. Artemis Papert me auxiliou de tantas maneiras que eu só posso dizer: *Merci*.

Todo mundo interessado em como a criança pensa tem um débito geral e imenso para com Jean Piaget. Eu também tenho um débito especial. Se Piaget não tivesse entrado na minha vida eu seria agora um "matemático de verdade" em vez de ser o que quer que seja que eu tenha me tornado. Piaget investiu muita energia e muita fé em mim. Espero que ele reconheça que o que eu tenho contribuído para o mundo da criança está dentro do espírito do empreendimento de sua vida.

Deixei Genebra enormemente inspirado pela imagem piagetiana da criança, particularmente por sua idéia de que as crianças aprendem muito sem serem ensinadas. Mas eu também estava enormemente frustrado pelo pouco que ele poderia nos dizer sobre como criar condições para que mais conhecimento pudesse ser adquirido pelas crianças através desse maravilhoso processo de "aprendizagem piagetiana". Percebi a idéia popular de planejar um "currículo piagetiano" como virar Piaget de ponta cabeça: Piaget é o teórico por excelência da aprendizagem sem currículo. Como conseqüência disso, comecei a formular duas idéias que permeiam este livro: 1) mudanças significativas em padrões de desenvolvimento intelectual acontecerão através da mudança cultural; e 2) o mais provável condutor de mudanças culturais potencialmente relevantes no futuro próximo é a presença cada vez mais difundida do computador. Embora essas perspectivas tenham nortead o projeto LOGO desde o seu início, por

muito tempo eu não pude ver de que modo lhes dar uma estrutura teórica.

Fui ajudado nisso, como de muitos outros modos, por minha esposa, Sherry Turkle. Sem ela este livro poderia não ter sido escrito. Idéias emprestadas de Sherry vieram a ser elos perdidos na minha tentativa de desenvolver maneiras de pensar sobre computadores e culturas. Sherry é uma socióloga cujo interesse particular está centrado na interação de idéias e formação de cultura, em particular como idéias complexas são adotadas e articuladas através de grupos culturais. Quando a conheci, ela recentemente completara uma investigação de uma nova cultura psicanalítica francesa, de como a psicanálise tinha "colonizado" a França, um país que havia resistido ferozmente à influência freudiana. Ela voltara sua atenção para as culturas computacionais e estava pensando em como o relacionamento das pessoas com o computador influencia sua linguagem, suas idéias sobre política, e as suas percepções de si próprias. Ouvi-la discorrer sobre ambos os projetos me ajudou a formular minha própria abordagem e a atingir um senso de consistência suficiente de minhas idéias para embarcar neste projeto de escrever o livro.

Através dos anos Sherry tem me dado todo tipo de ajuda. Quando não conseguia escrever, ela me dava horas de conversa e ajuda editorial. Mas sua ajuda foi mais decisiva nas muitas ocasiões em que não gostava mais do livro ou quando minha confiança em escrevê-lo esmorecia. Então, sua dedicação ao projeto o manteve vivo e seu amor por mim ajudou-me a encontrar meu caminho de volta e a me manter apaixonado pelo meu trabalho.

Seymour Papert
Cambridge, Massachusetts
Abril, 1980

Sobre o Autor

Seymour Papert é um dos mais polêmicos teóricos da educação da atualidade. Seguidor de Piaget, e tendo trabalhado no instituto do mesmo nome, ele criou Logo, uma linguagem de computação que propõe uma transformação profunda da concepção de ensino e aprendizagem. Seu método, que já vem sendo experimentado com sucesso há alguns anos na Europa, Estados Unidos e até por alguns países do terceiro mundo, chega agora ao Brasil em tradução inédita.

Professor de Matemática e Educação do Instituto de Tecnologia de Massachusetts, Papert foi vencedor, em 1981, do Marconi International Fellowship Award.

REPENSANDO A CIÊNCIA

ALBERT EINSTEIN - *Pensamento Político e Últimas Conclusões*

Seleção e prefácio de Mário Schenberg

Coletânea do último período da vida de Einstein, inclui tanto textos de divulgação científica de qualidade excepcional, como outros de notável conteúdo filosófico, político, social e econômico, de significativa atualidade.

FILOSOFIA DA CIÊNCIA - *Introdução ao Jogo e suas Regras*

Rubem Alves

Reavaliando todo o processo de elaboração do conhecimento pelo homem, o autor procura desmistificar o cientista como pessoa que pensa melhor do que as outras.

PENSANDO A FÍSICA

Mário Schenberg

Um livro que encaminha a uma aventura viva que é a da Ciência. As palavras do autor, este físico-matemático-artista-pensador, são palavras que abrem caminhos para os pensamentos e as práticas científicas.
