

A Filosofia da Ciência e a Sua Extensão à Engenharia

E. R. DE ARANTES E OLIVEIRA

Instituto Superior Técnico - Lisboa

1. Introdução

A Escola de Viena da Filosofia da Ciência, que se desenvolveu nas primeiras décadas do século XX, tinha uma visão ambiciosa da Ciência. Acreditava, nomeadamente, que seria possível formular normas gerais para o processo científico, analisar a estrutura lógica dos conhecimentos científicos, e mostrar que a Ciência serve o objectivo racional de adquirir um conhecimento global e fiável do Universo.

Os filósofos da Escola de Viena, que representaram em grande parte a corrente *neo-positivista* da Filosofia da Ciência, defendiam o chamado *verificacionismo*, segundo o qual as proposições das ciências empíricas só têm sentido se forem verificáveis por observações de carácter experimental. De acordo com os neo-positivistas, as construções teóricas susceptíveis de tornar possível explicar e prever, só seriam válidas se fossem apoiadas num procedimento hipotético-dedutivo resultante de uma combinação de *indução e dedução*.

O chamado *Manifesto* da Escola de Viena (1929) apresentou uma visão da Ciência segundo a qual esta, “*vista através das lentes da análise lógica* (que se servia da lógica) *e modelada pela Física, poderia constituir uma base para a unidade do conhecimento*”. Segundo os seus signatários, uma tal visão utópica da Ciência levaria a uma concepção do Mundo totalmente livre de preconceitos, e aberta à inter-subjectividade, conceito que, na sua óptica, substituiria o da objectividade, que lhes parecia carregado de metafísica.

A concepção neo-positivista da Ciência, inspirada pela Física, negligenciava as outras ciências, nomeadamente as ciências sociais. Também o universo da Engenharia, parte integrante de uma realidade que as ciências em geral, e não exclusivamente a

Lógica, a Matemática e a Física, são chamadas a teorizar, ultrapassava o estreito mundo das concepções neo-positivistas.

Como diria Henry Petroski em 1994, “*one can go so far as to say that the ever-evolving world of human-designed artefacts can always be expected to hold challenges for the engineering scientist no less than does the natural universe hold challenges for the natural and physic scientist*”.

2. O Pós-Positivismo de Popper

Karl Popper foi o mais importante filósofo da Ciência no século XX. Pode dizer-se que foi ele quem resolveu o problema do método científico que, na prática, nunca se conformara com os princípios que *Francis Bacon* enunciara já nos fins do século XVI.

Segundo *Popper*, o conhecimento científico não é descoberto e verificado por via das generalizações indutivas, isto é, não *salta* dos instrumentos científicos de medida para espíritos humanos completamente vazios. Pelo contrário, o avanço da Ciência faz-se por *falsificações dedutivas*, seguindo um processo de *conjecturas e refutações*.

A experiência e a observação permitem ensaiar teorias, mas são incapazes de as produzir. É a imaginação e a criatividade, não a indução, que geram verdadeiras teorias científicas. Foi assim possível que *Einstein* estudasse o Universo sem mais aparelhos que lápis e pedaços de giz.

Em 1934, Popper publicou a sua obra mais famosa : “*The Logic of Scientific Discovery*”. Advogando o *método das conjecturas e refutações* em vez do *método indutivo*, deu um golpe mortal no pós-positivismo. A partir da publicação dessa obra, o *método indutivo*, para o qual nunca tinha sido encontrado fundamento satisfatório, foi substituído pelo que Popper chamou o “*deductive method of testing*”.

Segundo Popper, o passo inicial no avanço da Ciência consiste na formulação das *teorias*, que são seguidamente cotejadas com as proposições e previsões decorrentes que delas decorrem, e com os resultados das suas aplicações, ou de experiências especialmente concebidas para tentar *falsificá-las*. Se o resultado da comparação for negativo, isto é, se as consequências da *teoria* puderem ser *falsificadas* (ou seja, *refutadas empiricamente*), dir-se-á que a teoria da qual elas foram logicamente deduzidas foi também *falsificada*. Por outras palavras, a actividade do experimentador deve ter por objectivo *falsificar*, a todo o transe, a teoria; não *verificá-la*, como pretendiam os pós-positivistas”.

Enquanto a teoria resistir às sucessivas experiências sistematicamente concebidas para tentar falsificá-la, e não for substituída por outra teoria no decurso do progresso científico, pode afirmar-se que se encontra corroborada.

Diria Kruger em 1973: “*Na filosofia da Ciência de Popper, a ideia de construir teorias a partir de factos observados foi substituída por uma concepção anti-indutivista radical, de acordo com a qual a actividade científica parte de problemas e teorias, e não de observações*”. E ainda: “*A única relação aceitável entre teoria e experiência é a dedução, a partir da teoria, de proposições decidíveis pela observação (observationally decidable statements)*”.

Só podem pois ser científicas proposições susceptíveis de ser *falsificadas*, isto é, *empiricamente refutáveis*.

O *modus tollens*¹, único tipo de inferência que vai do singular para o universal, dispensa a indução. É pois, para Popper, o único admissível.

Vejam-se agora, à luz da filosofia de Popper, algumas teorias usadas na Engenharia e muito especialmente na *Engenharia das Estruturas*, especialidade do autor.

¹ Modus tollens : “Se *p* for dedutível de *t*, e se *p* for falso, então *t* é também falso”.

Antes, recorde-se a revolução desencadeada em finais do século XVIII, na *Engenharia das Estruturas*, pelo uso de modelos matemáticos baseados nas equações da *Mecânica*. Essa revolução desenvolveu de modo impressionante a capacidade de prever o comportamento das estruturas e de interpretar os resultados fornecidos pela experiência.

É sabido que o que se passou na *Engenharia das Estruturas* passou-se também noutras áreas científicas. Por exemplo: várias culturas descobriram regularidades no movimento dos astros que tornaram possível, por exemplo, prever os eclipses. Porém, só se tornou possível fazer previsões menos triviais, como a da existência de planetas nunca antes observados, depois de tais regularidades poderem ser entendidas à luz das leis de *Newton*. O exemplo clássico é o da descoberta de Neptuno pelo astrónomo *Leverrier*.

Ao contrário dos modelos físicos, que só permitem medir as grandezas físicas, os modelos matemáticos permitem calculá-las.

Durante o século XIX, os modelos matemáticos da Engenharia das Estruturas progrediram ao longo de duas vias distintas: a da *teoria da elasticidade* e a da *resistência dos materiais*. A primeira é mais geral e precisa, mas as suas equações só podiam ser resolvidas em casos muito especiais. Só o advento dos computadores e de poderosas técnicas de análise, como o *método dos elementos finitos*, permitiram resolver com a necessária generalidade as equações da teoria da elasticidade.

Mais do que isso: reforçaram poderosamente a capacidade de *experimentação numérica*, pondo nas mãos dos cientistas um instrumento que, ao ampliar a sua capacidade de *falsificação* das teorias científicas, não poderia deixar de ter importantes consequências para a evolução da Ciência e da Tecnologia.

3. Macro e Micro-Teorias

Desde a época de *Newton* até tempos relativamente recentes, muitos cientistas da Natureza consideraram *o ponto de massa* a entidade fundamental da Mecânica. Segundo eles, a matéria era composta de partículas obedecendo às leis da mecânica de *Newton*. Consequentemente, o comportamento global de um corpo devia poder ser previsto a partir do conhecimento das forças que se exerciam entre as partículas que o constituíam.

A chamada *mecânica dos meios contínuos* parecia-lhes uma teoria secundária, uma espécie de “parente pobre” dentro da *Mecânica*.

Os engenheiros estruturais modernos recorrem no entanto a modelos matemáticos que supõem a continuidade da matéria.

O *postulado da continuidade*, que se tem revelado adequado e fecundo para os engenheiros civis e mecânicos, é evidentemente rejeitado pelos físicos, químicos e pelos cientistas de materiais, que olham o corpo como um sistema de partículas cujo comportamento não obedece necessariamente às leis da *Mecânica Clássica*.

Uma controvérsia famosa na história da mecânica dos meios contínuos desencadeou-se a propósito do estabelecimento das *relações tensões-deformações*, isto é, das *equações constitutivas da teoria da elasticidade*.

Duas vias foram de facto seguidas que levaram sucessivamente :

- a equações constitutivas baseadas nas hipóteses de *Boskovich* (teoria micro) ;
- a equações constitutivas baseadas em considerações de ordem energética (teoria macro).

A primeira via deu origem à que se tornou conhecida como a *teoria rariconstante de Cauchy*, em que as equações constitutivas apresentam 15 constantes independentes. Para corpos isótropos, o chamado coeficiente de *Poisson* seria

forçosamente igual a $0,25$, o que, em princípio, sendo contrário à experiência, implica a falsificação da teoria.

Já a segunda via, que conduziu à chamada *teoria multiconstante*, implicava 21 constantes e, no caso dos *corpos isotropos*, 2 constantes independentes, podendo o coeficiente de *Poisson* tomar qualquer valor entre -1 e $0,5$.

Os progressos dos conhecimentos sobre a constituição da matéria levaram porém à conclusão de que as hipóteses de *Boskovich* pecavam sobretudo pela ingenuidade: considerações do mesmo tipo baseadas em hipóteses mais realistas podem levar ao mesmo número de constantes que as considerações de ordem energética.

Não é pois a experiência que permite decidir a favor das teorias *micro* ou *macro*.

O que se passa no caso das teorias *micro* e *macro* é exemplo do que se passa com outras teorias, e ilustra dificuldades que têm aparecido na aplicação das ideias de *Popper*.

Segundo o filósofo húngaro *Imre Lakatos*, as hipóteses de base de uma teoria cindem-se em dois grupos: o núcleo duro (*hard core*) e a cintura de protecção (*protective belt*). Para quem tiver lido “*The Logic of Scientific Revolutions*”, de *Kuhn*, os núcleos duros correspondem aos *paradigmas*, e as cinturas de protecção ao que *Kuhn* chama a *ciência normal* (“*normal science*”).

A cintura de protecção consta de um conjunto de condições iniciais e de hipóteses auxiliares que protegem o núcleo duro. Este é tornado irrefutável por um *fiat* metodológico. É isto por uma razão: a de que o núcleo duro é uma parte da teoria que se desenvolveu muito lentamente, por tentativas e, como escreveu *Lakatos*, servindo-se de uma imagem inspirada pela mitologia clássica, não nasceu já revestido de armadura, como *Palas Ateneia* da cabeça de *Zeus*. As hipóteses que o constituem são muito gerais e profundas e têm em geral a seu favor o terem-se revelado extremamente fecundas.

Voltando à teoria *rariscontante*, pode dizer-se que as hipóteses de *Boskovich* constituem a *cintura de protecção* da teoria de *Cauchy*. Uma vez substituídas por outras mais adequadas, a teoria pôde ser salva e escapar à *falsificação*.

Do mesmo modo, a descoberta de anomalias na órbita de *Urano* só não levou à falsificação da *Mecânica Clássica* porque esta estava protegida por uma hipótese auxiliar, a de que não havia mais que seis planetas no *Sistema Solar*, a qual constituía a sua *cintura de protecção*. Quando *Leverrier* admitiu a existência de um sétimo planeta, a que chamou *Neptuno*, a *Mecânica Clássica* salvou-se. Só viria a ser falsificada quando se concluiu que era incapaz de explicar o avanço do *periélio de Mercúrio*.

Os actuais engenheiros civis e mecânicos não parecem preocupar-se com a estrutura da matéria : não só trabalham com *macro-conceitos*, como os de *tensão* e de *deformação*, como exprimem os *critérios de resistência* em termos das componentes do *tensor das tensões*.

É importante assinalar que, no que se refere aos critérios de resistência, a experiência parece dar razão a critérios como o de *von Mises*, que resulta de *considerações de continuidade* – um conceito de ordem macroscópica – e não a critérios como o de *Tresca*, fisicamente mais intuitivos, mas que pressupõem descontinuidades nas leis naturais que regem o comportamento dos corpos.

Observe-se que o *postulado da continuidade* não exige pôr completamente de lado considerações sobre a estrutura da matéria. A *mecânica dos meios contínuos generalizados* foi desenvolvida, a partir dos *Cosserat*, justamente para tomar em linha de conta a estrutura interna dos materiais. No entanto, a *mecânica dos meios contínuos generalizados* não pretende encontrar uma explicação microscópica para esse comportamento.

Uma abordagem mais intuitiva consiste em representar simbolicamente o comportamento dos corpos por modelos mecânicos muito simples, ditos *modelos reológicos*, tais como *molas*, *amortecedores viscosos* e *blocos que escorregam com*

atrito sobre superfícies rugosas, o comportamento dos materiais respectivamente *elásticos (corpo de Hooke)*, *viscosos (corpo de Newton)*, ou *plásticos*.

Combinando vários destes modelos simples, torna-se possível simular comportamentos muito complexos. Os modelos reológicos sugerem, por outro lado, como devem ser combinadas as equações que regem o comportamento dos corpos mais simples para estabelecer os modelos matemáticos mais complexos. Podem sugerir também decomposições fictícias desses corpos complexos em corpos mais simples para efeitos de análise matemática. Ver-se-á adiante que decomposições destas serviram de base a análises de convergência em sistemas de elementos finitos.

Porém, também os modelos reológicos nada têm a ver porém com micro-teorias : tudo se passa no quadro tipicamente macroscópico da *mecânica dos meios contínuos*.

4. A Teoria das Estruturas e a Sua Reformulação

Poucas teorias das *Ciências da Engenharia* progrediram tanto, na segunda metade do século XX, como a *teoria das estruturas*.

Esta deixou de ser uma simples colecção de métodos de análise e passou a constituir um sistema de modelos análogos uns aos outros, e ordenados hierarquicamente, no sentido de que são gerados, uns a partir dos outros, recorrendo a regras justificadas por *teoremas de convergência*.

Por outras palavras, os modelos gerados a partir de um *modelo gerador* são falsificáveis pela sua capacidade de gerar sucessões de soluções susceptíveis de convergir para as soluções fornecidas pelo referido *modelo gerador*. Tal como nos clássicos métodos de solução por *séries*, os *critérios de convergência* são essenciais para legitimarem o recurso a esses modelos.

De acordo com o seguinte esquema, o modelo tridimensional é o modelo que gera todos os outros :

MODELO TRIDIMENSIONAL

MODELOS BIDIMENSIONAIS

TEORIA DAS CASCAS - MEMBRANAS

T. DAS CHAPAS (SISTEMAS PLANOS)

T. DAS LAJES (SIST. ANTI-PLANOS)

MODELOS UNIDIMENSIONAIS

TEORIA DAS BARRAS – CABOS

RESISTÊNCIA de MATERIAIS (teoria técnica)

MODELOS DISCRETOS

SISTEMAS DE ELEMENTOS FINITOS

SISTEMAS DE ELEMENTOS DISCRETOS, etc.

MODELOS SEM MALHA (“*meshless methods*”).

O papel da convergência é bem conhecido no caso dos modelos discretos, mas não tanto no caso dos modelos contínuos bi- ou unidimensionais.

Para a construção destes últimos, duas vias são possíveis: a *via directa*, sem referência às equações do modelo tridimensional, e a *via indirecta*, a partir das equações deste, nele introduzindo as *aproximações* consideradas adequadas. Muitas investigações de carácter matemático têm tido por objecto melhorar e controlar tais aproximações.

Os matemáticos têm naturalmente tendência para porem de lado os métodos energéticos porque, no passado, foram apresentados praticamente como métodos directos, suspeitos de não permitirem investigar as relações com o modelo tridimensional.

Na visão sintética fornecida pela moderna *teoria das estruturas*, a *teoria das cascas* e a *teoria das barras* aparecem como geradas a partir da *teoria tridimensional*, e os teoremas de convergência são utilizados na sua *corroboração*. Tudo se enquadra pois nas concepções de *Popper*.

É importante mencionar que as análises de convergência são facilitadas pela existência de *teoremas de mínimo*, tais como o da *energia potencial total* e da *energia complementar total*, no caso dos corpos elásticos, e o da *taxa de variação mínima da energia de deformação*, no caso dos corpos viscosos.

Para casos mais complexos, como o do escoamento de fluidos viscosos, regidos pelas *equações de Navier-Stokes*, existe a possibilidade, já atrás mencionada a propósito dos *modelos reológicos*, de os decompor em corpos mais simples cujo comportamento seja regido por *teoremas de mínimo*. Daí o interesse da consideração dos *modelos reológicos* na análise de convergência.

5. Popper e a Metodologia do Projecto Tecnológico

Até que ponto teriam as ideias de *Popper* sido influenciadas pela metodologia do projecto tecnológico ?

Segundo *Popper*, o cientista parte de teorias pré-concebidas cujas consequências empíricas aprecia por meio de ensaios experimentais. Assim se inicia um processo iterativo de *falsificações e rejeições*.

O *projecto tecnológico* resulta de um processo conceptual que inclui o *pré-dimensionamento* das várias partes do artefacto a projectar. Inicia-se então um processo iterativo que antecipa os possíveis cenários de colapso (*falsificações*), verificando o projecto/modelo relativamente a esses, e introduzindo nele as modificações que se afigurem necessárias (*rejeições*).

Falsificações e rejeições são assim típicas de ambos os processos. No entanto:

- o *projecto* é um modelo teórico, isto é, um *sistema logicamente possível*;
- o sistema denominado *ciência empírica* tem por objectivo *modelizar o mundo real*.

Por outras palavras :

- o *projecto* precede o *artefacto*, do qual, uma vez construído, se tornará *modelo* ou *teoria*;
- o *mundo real* precede a *teoria científica*, que, a todo o transe, se tenta *falsificar*.

Mas como, de acordo com *Popper*, só podem ser científicas as proposições e teorias susceptíveis de ser *falsificadas*, e as *falsificações* resultam da dedução de *proposições decidíveis pela observação e resultando exclusivamente de uma teoria*, os modelos ou teorias da engenharia devem, não só possuir *um carácter lógico-matemático, mas incorporar códigos e regulamentos*, e ser *falsificáveis* relativamente à sua inadequação, comprovada pela experiência, para servir objectivos de natureza, não só *quantitativa*, mas *qualitativa*.

Uma conclusão a tirar é a de que as teorias destinadas a servir as necessidades da engenharia não podem ser, como sucedia no passado, de carácter exclusivamente *quantitativo*, nem mesmo exclusivamente *lógico-matemático*, ou *físico*.

6. Sobre os Paradigmas de Projecto, Seus Êxitos e Seus Falhanços

Citando *Henry Petroski* (1994): O processo do projecto tecnológico, desde à concepção à realização do artefacto, é essencialmente “*a timeless, placeless and even humanless activity that succeeds only insofar as it anticipates failure*”.

Em 1847, a ponte sobre o Rio Dee, no Reino Unido, ruiu porque a *instabilidade torcional estática* era um modo de colapso ignorado (isto é, não levantava problemas de segurança) no caso de vigas curtas e atarracadas, como as que até então tinham sido construídas.

No século XX, a *instabilidade torcional dinâmica* mostrou ser um modo de colapso dominante no caso de vigas muito flexíveis e relativamente estreitas, como as da Ponte de *Tacoma*, nos Estado Unidos.

Em ambos os casos, tinha-se extrapolado a partir de “casos de sucesso”, e os resultados foram desastrosos.

Segundo *Petroski*, não há garantia de êxito quando se projectam coisas novas exclusivamente com base em êxitos do passado. É por isso que os programas de inteligência artificial, bem como outros apoios ao projecto baseados em computadores (*computer-based design aids*), cuja lógica se baseie em êxitos passados, têm uma utilidade muito limitada. Segundo ele, é essencial que, tal como preconizou *Roebing* (que em 1855 projectou a *Ponte de Brooklin*), o engenheiro-projectista tenha total compreensão de como o colapso pode ocorrer, de modo a ser evitado. *Roebing* reconheceu lucidamente que, para construir uma estrutura com êxito, teria de imaginar como ela poderia ruir.

Infelizmente, era completamente diferente o estado de espírito dos engenheiros americanos nos anos que precederam o desastre da Ponte de *Tacoma*. “A *julgar pela escassez da literatura profissional sobre colapsos de estruturas nos primeiros 75 anos do século XX, estava, na melhor das hipóteses, fora de moda, e era, na pior das hipóteses, considerado anti-profissional, tratar de maneira demasiadamente explícita dos falhanços dos engenheiros*”.

No entanto, como *Billington* afirmou em 1977, “a *História tem, para os engenheiros, uma importância igual à da Ciência*”. E a *História* revela que, quando os projectos falham, as razões por que falham são essencialmente *não-quantitativas*, e os

problemas levantados pelos colapsos respectivos são essencialmente de natureza *não-numérica*.

A verificação do projecto relativamente aos modos de colapso supõe evidentemente o recurso à análise, mas, como o autor escreveu num trabalho que apresentou em 1986, *protótipos, idealizações, modelos, análise* são os sucessivos elos da cadeia que se apresenta aos engenheiros. O progresso na engenharia exige o fortalecimento do elo mais fraco. Antes de ter ocorrido a revolução dos computadores, esse elo era a análise. O acento da investigação era pois posto na análise. Chegou porém o tempo em que uma exagerada preocupação com o progresso da análise deixou de ter sentido. Já que os métodos de análise são, hoje em dia, suficientemente poderosos para permitirem prever o comportamento das estruturas, os mais importantes temas de investigação passaram a estar associados com o progresso nas idealizações das estruturas, das acções e dos cenários de colapso. Para cada tipo de estrutura terão de considerar-se idealizações dos cenários de colapso mais importantes e das acções que os provocam. A informação sobre tais cenários pode ser coligida a partir da observação directa das situações extremas que por vezes se verificam nos vários tipos de estruturas.

Pode concluir-se que a automatização do projecto compreende dois aspectos principais:

- (i)- a construção dos modelos conceptuais de projecto e o pré-dimensionamento das suas várias partes;
- (ii)- a antecipação de todos os possíveis modos de colapso e a verificação de tais modelos relativamente a eles.

7. Um Paradigma Metodológico Global e a Sua Rejeição

Os computadores trouxeram consigo uma possibilidade, a da automatização do cálculo, que exigiu a modelação dos processos de análise.

Ora, durante os anos 50, os conceitos de *programa* e de *biblioteca de programas* definiram um processo de utilização dos computadores que se revelou perverso para a prática da engenharia.

Segundo reconheceu *Charles Miller*, na altura (1964) presidente do Departamento de Engenharia Civil do MIT: “*Torna-se evidente que as bibliotecas de programas podem tornar-se obstáculos reais ao progresso técnico e tecnológico*”.

Um tal paradigma global poder-se-ia pois considerar empiricamente refutado, ou seja, falsificado, no sentido de *Popper*.

Segundo *Miller*, “*um engenheiro é essencialmente um decisor*”, e “*uma organização de engenharia é um sistema de informação no qual a informação em bruto é introduzida, reduzida, processada, armazenada e combinada com mais informação*”. Estas últimas tarefas tinham sido até então atribuídas a engenheiros; muitas delas deveriam passar a ser partilhadas com computadores.

As ideias pós-positivistas de *Popper* sobre *falsificação* e *rejeição* devem pois ser aplicadas, não a simples teorias ou modelos científicos, mas a *esses* e ao *corpus* de documentos e rotinas utilizados na *organização*.

É este *corpus* que constitui o *paradigma tecnológico* da *organização*, e é ele que assegura a continuidade da sua *eficácia*.

8. A Emergência da Inteligência Artificial

Na altura em que *Charles Miller* escrevia o seu artigo, estavam a ser dados os primeiros passos para tornar possível modelizar e automatizar todo um conjunto de processos que até então tinham dependido inteiramente da intervenção humana. Tratava-se de processos de *CAD*, ou, mais precisamente, de *CAE*.

As contribuições das ciências computacionais e das ciências cognitivas, bem como as investigações sobre o processo do projecto tecnológico permitiram que os sistemas de *CAE* atingissem um grau muito elevado de funcionalidade.

Tornou-se assim possível que estes sistemas passassem a encarregar-se, não só de rotinas na melhor das hipóteses muito demoradas, fatigantes e enfadonhas para os *agentes humanos*, mas também da resolução de problemas (*problem-solving activities*) sem qualquer intervenção dos utilizadores. Foi por este motivo que foram denominados *sistemas inteligentes*.

Não é de surpreender que as ciências cognitivas viessem a desempenhar um papel muito relevante nas tecnologias da computação. O espírito e o comportamento humanos são de facto a melhor fonte de inspiração para os engenheiros e, muito especialmente, para os cientistas da computação.

Na sua obra "*Artificial Intelligence. A modern Approach*" (1995), *Russell e Norvig* consideraram quatro categorias de definições da Inteligência Artificial:

- "*Sistemas que actuam humanamente*",
ou o "*Turing Test approach*";
- "*Sistemas que pensam humanamente*",
ou o "*Cognitive Modelling approach*";
- "*Sistemas que pensam racionalmente*",
ou o "*Laws of Thought approach*";
- "*Sistemas que actuam racionalmente*",
ou o "*Rational Agents approach*".

Russell e Norvig manifestam a sua preferência pela via dos agentes racionais.

Um *agente* é uma entidade que funciona *continuamente* e *autonomamente* num ambiente de comportamento parcialmente imprevisível no qual estão normalmente em curso outros processos.

Autonomia significa que o agente actua sem necessidade de uma constante intervenção humana.

Bento e Feijó propuseram uma via híbrida: a tecnologia dos *agentes reactivos*, como um paradigma *pós-objecto* para a construção de *Sistemas CAD Inteligentes (ICAD)*. Introduziram por outro lado o conceito de *suporte activo (active support)*. Preferiram, assim, não apresentar uma *arquitectura de agentes* para um sistema específico de *CAD*, mas um *ambiente* capaz de suportar a implementação desse tipo de arquitectura.

Enquanto escrevia este texto, o computador por mim utilizado, actuando de acordo com o modo como se encontra programado, sublinhava a *vermelho* as palavras cuja grafia estava incorrecta e a *verde* as frases redigidas de forma menos ortodoxa. Não pude o autor deixar de notar que beneficiava da acção de *agentes artificiais* que lhe prestavam um apoio activo dos mesmo tipo do que *Bento e Feijó* tinham sugerido para o projecto tecnológico.

9. “Friendliness” e Analogia

Conhecemos, no decurso das nossas vidas, profissionais que têm como ideal comportar-se como meros agentes artificiais. Muitos desses profissionais conseguiram tornar-se socialmente bem sucedidos, escondendo a vacuidade dos conceitos sob um discurso hermético e irritantemente “*unfriendly*”.

Muitas pessoas supostamente responsáveis acreditam cegamente neles, tal como outros acreditam em computadores alimentados com *modelos de natureza lógica ou matemática* que tomam ingenuamente pela realidade.

Agindo em sentido oposto, os cientistas da computação procuraram tornar-se “friendly”. E conseguiram-no, em grande parte, usando, de forma que muitos consideraram abusiva, palavras como *crença*, *aprendizagem*, *criatividade*, *perícia* e, evidentemente, *inteligência*, que pareciam atribuir aos computadores dotes característicos dos seres humanos.

O uso dessas palavras explica em grande parte a atracção que a inteligência artificial tem tido sobre muitas pessoas não necessariamente membros da comunidade científico-tecnológica, e as grandes expectativas que criou. Aplicadas aos agentes artificiais, tais palavras sugerem no entanto que os computadores vão pouco a pouco tomando o lugar do homem, o que é evidentemente disparatado.

Os matemáticos já antes tinham feito algo de semelhante. Lembre-se o caso da *Análise Funcional*, na qual se empregam termos retirados da Geometria. Uma tal ideia revelou-se fecunda, já que tornou possível usar a intuição geométrica para ajudar a reflectir sobre conceitos extremamente subtis e abstractos. Possibilitou nomeadamente, tirar partido de analogias que a complexidade das situações torna muitas vezes difícil descobrir e explorar. Ora, a *analogia* é de facto uma das principais fontes da *criatividade*.

Os cientistas da computação podem esperar que algo de semelhante aconteça se usarem as mesmas palavras para descreverem o comportamento das pessoas e das máquinas.

Os *algoritmos genéticos*, usados na modelação de processos do espírito humano que têm a ver com a *criatividade*, e as chamadas *técnicas de computação neuronal*, que têm sido usadas na simulação dos processos de *aprendizagem*, são exemplos de técnicas bem sucedidas que exploram analogias entre o comportamento das máquinas e o comportamento humano.

Dois exemplos:

A- A APRENDIZAGEM ARTIFICIAL:

Num seu artigo intitulado “*Modelling Mechanical Behaviour without Mechanics*”, o professor do IST *João Bento* usou redes neuronais computacionais para resolver o problema inverso da Mecânica Estrutural. Por outras palavras, treinou computadores para identificarem formas estruturais, partindo de padrões de comportamento que as máquinas tinham “aprendido” a reconhecer.

B- A CRIATIVIDADE ARTIFICIAL:

Em 1990, *John Gero* lançou o conceito de *projecto criativo*, que pode ser definido como um projecto não-rotineiro que utiliza novas variáveis por intermédio das quais é possível expandir o espaço dos projectos possíveis (“*creative design can be defined as non-routine design that uses new variables for producing new types and, as a result, extending or moving the state space of potential designs*”). Pode pois ser interpretado como um processo através do qual os protótipos são adaptados de modo a gerar protótipos novos (“*creative design can be viewed as a means by which design prototypes are adapted to produce new design, that is, design prototype generation*”).

Segundo Gero, *combinação, analogia, mutação, e primeiros princípios* são os quatro principais processos computacionais susceptíveis de produzir as novas variáveis necessárias ao *projecto criativo*.

10. Engenharia e Construtivismo

Os problemas levantados pelas ciências sociais e pelo desenvolvimento da engenharia levou a uma nova escola da filosofia da Ciência inspirada por filósofos americanos, tais como *Patrick Suppes*, professor de filosofia na Universidade de Stanford, *Bas van Fraassen*, *Brian Skyrms*, e outros.

Citando *van Fraassen*, que rotulou a sua filosofia de *empiricismo construtivista*, “o objectivo da Ciência não é a verdade como tal, mas a *adequação empírica*, ou seja relativa aos *fenómenos observáveis*”. Trata-se de uma atitude oposta ao *realismo científico*, segundo o qual uma teoria ou é verdadeira ou é falsa, e o critério do êxito é a verdade.

O *construtivismo* desiste assim de uma descrição única da Ciência. Em vez de procurar uma imagem monolítica desta, adopta uma atitude pragmática, segundo a qual tanto a ciência como a própria *epistemologia* são *actividades de resolução de problemas* (“*problem-solving activities*”) orientadas para objectivos específicos. A distinção *neo-positivista* entre a linguagem *teórica* e a linguagem *observacional* dá lugar a uma imagem da Ciência como uma *hierarquia de modelos*, desde os *modelos empíricos*, ou *modelos de dados* (na terminologia de *Suppes*) aos *modelos matemáticos* ou *teorias* propriamente ditas.

Citando *Suppes*:

“A aplicação de teorias científicas que realmente funcionem a áreas específicas da *Ciência* é quase sempre esquemática e de carácter aproximado, quer se trate de prever o *comportamento de partículas elementares*, quer o *tempo na meteorologia*, quer o *comércio internacional*, quer outro qualquer fenómeno suficientemente complexo. Só podemos esperar abarcar uma parte restrita do fenómeno”. “Diz-se muitas vezes que o papel da experimentação é isolar fragmentos particulares da experiência que possam ser tratados de modo tão completo quanto possível. Trata-se, a meu ver, mais de um dogma de filósofos que nunca se envolveram verdadeiramente na experimentação, do que de um ponto de vista de cientista experimental”. “O que me tem impressionado ao envolver-me num trabalho experimental, é o facto de constatar quanto a minha visão esquemática das coisas se aplica também ao trabalho experimental. Trata-se de abstrair e simplificar um aspecto concreto, e depois outro, e outro ainda, até que os dados possam ajustar-se ao limitado conjunto de conceitos da teoria que pretendo ensaiar”.

Ainda citando *Suppes*:

“Uma concepção da Ciência habitualmente adoptada pelos filósofos é a de que ela constitui uma aproximação cada vez mais próxima de um conjunto de verdades eternas e universais. Esta concepção da Ciência vem de *Platão* e *Aristóteles* e continuou por *Descartes*, *Kant*, e filósofos mais recentes. Foi adoptada igualmente por muitos cientistas”. “O meu modo de ver (o dele, *Suppes*) é o de que filósofos como *Pierce*, *Dewey*, e os discípulos destes, estiveram muito mais próximos de ter razão”. “De facto, a actividade científica é um perpétuo *problem solving*. Nenhuma área científica pode ser completamente apreendida através de um esquema de verdades eternas; o que de facto acontece é que somos constantemente confrontados com novas situações e novos problemas, e que trazemos para a resolução desses problemas um *pot pourri* de variada técnicas, conceitos e métodos científicos”.

Tudo se passa pois como se o cientista, com a sua panóplia de instrumentos científicos, encarasse a Natureza como um pintor com a sua paleta. Tal como o artista, o cientista é obrigado a sacrificar e a simplificar, mantendo porém o que considera ser o essencial. Mas o que é o essencial? Trata-se de uma questão que é importante para o artista, mas também o é para o engenheiro, para o cientista das ciências sociais, e para todos os que exerçam uma actividade de resolução de problemas, na qual a síntese e a análise se concentrem no espaço e no tempo, e ponham a um único homem, ou a uma equipa fortemente coordenada, o problema da decisão sobre o que deve ser retido e o que deve ser desprezado.

É este o tipo de realidade encarado pelos cientistas aplicados, diferente do que se põe aos cientistas puros que, juntamente com muitos outros, espalhados no espaço e no tempo, cooperam na construção de modelos extremamente amplos. A evolução desses modelos é necessariamente lenta, já que só raramente ocorrem as revoluções científicas cujo padrão *Thomas Kuhn* analisou na sua famosa obra intitulada “*The Logic of Scientific Revolutions*”.

Observe-se que o trabalho de numerosos cientistas espalhados no espaço e no tempo, e fracamente coordenados, não é desconhecido em Arte. Lembrem-se, por exemplo, as grandes *criações urbanísticas* para que cada geração dá a sua contribuição, retocando, completando e ampliando o trabalho das que a precederam. A *Matemática*, a *Física*, a *Química*, a *Biologia*, cresceram dessa forma: como cidades.

Voltando a Suppes:

“A Ciência transforma-se numa actividade de construção de modelos aptos a fornecer uma descrição adequada dos resultados da experiência, mais do que numa descoberta de novas teorias”. “Esses modelos são usados para fazer previsões, e nalguns casos permitem explicar. Explicar passa porém a significar exercer uma actividade pragmática que depende da informação disponível num certo contexto. Concebida assim, a explicação deixa de ser um objectivo privilegiado da Ciência, para se tornar numa entre várias outras operações que é útil executar”. “Uma abordagem como esta centra-se mais em modelos que em leis. Observa-se que aqueles são menos gerais e mais flexíveis do que estas. Tipicamente dependentes do contexto, são recheados de elementos de índole pragmática, tais como a intenção específica que presidiu à sua construção e as circunstâncias em que são utilizados”.

Longe de impedir uma análise epistemológica da Ciência, a adopção de modelos em vez de leis permite uma análise comparada da estrutura do conhecimento em diferentes disciplinas. *“Partindo da pluralidade, este tipo de epistemologia não visa assim uma unidade pré-estabelecida da Ciência, mas uma integração transcultural das diferentes disciplinas científicas”.*

No que se refere à engenharia, a *hierarquia de modelos* mencionada por Suppes vai desde os *modelos empíricos* (sejam eles *físicos*, *matemáticos* ou *lógicos*), a *regulamentos* mais ou menos formais, sistemas de *normas técnicas*, diferentes tipos de *cadernos de encargos*, e mesmo *leis*, isto é, todos os documentos que, em situações concretas, orientam a actividade dos membros de uma *organização* de carácter técnico.

Tal concepção parece pois particularmente adequada à *Engenharia*.

Dezembro de 2000

Referências

- [1] ACHINSTEIN, P., 1973, « Macrotheories and Microtheories », in *Proc. of the 4th Int. Cong. for Logic, Methodology and Philosophy of Science*, Suppes, Henkin, Joja & Moisil (eds.), Bucharest.
- [2] ARANTES e OLIVEIRA, E. R., 1970, « The Convergence Theorems and their Role in the Theory of Structures », *Proc. of the IUTAM Symp. on high Speed Computing of Elastic Structures*, Veubeke (ed.), Liège.
- [3] ARANTES e OLIVEIRA, E. R., 1973, « Advanced Theory of Structures », *CEB International Course on Structural Concrete*, LNEC, Lisbon.
- [4] ARANTES e OLIVEIRA, E. R., 1975, « Convergence of Finite Element Solutions in Viscous Flow Problems », *Int. J. Numerical Methods in Engineering*.
- [5] ARANTES e OLIVEIRA, E. R., & PEDRO, J. O., 1986, « The Rise and Decline of Structural Analysis as a Research Topic in Structural Engineering », *Conference on Recent Advances in Simulation of Complex Systems*, Tokyo, July, 15-17th, 1986.
- [6] ARANTES e OLIVEIRA, E. R. & BENTO, J., 1998, « The Sense of Progress in Structural Engineering », in *Development of Knowledge-Based Systems for Engineering*, Tasso, C. & Arantes e Oliveira, E. R. (eds.), 1-10, Springer Verlag.
- [7] ARANTES e OLIVEIRA, E. R., 1999, *Elementos da Teoria da Elasticidade*, IST Press, Lisboa.
- [8] BENTO, J., 1998, « Modelling Mechanical Behaviour without Mechanics », in *Development of Knowledge-Based Systems for Engineering*, Tasso, C. & Arantes e Oliveira, E. R. (eds.), 37-58, Springer Verlag.
- [9] BENTO, J.; FEIJÓ, B., 1997, « An Agent-based Paradigm for Building Intelligent CAD Systems », in *Artificial Intelligence in Engineering*, 11(3), 231-244, Elsevier Applied Science.
- [10] FRAASSEN, B. C. van, 1986, « Aim and Structure of Scientific Theories », in *Proc. of the 7th Int. Cong. for Logic, Methodology and Philosophy of Science*, Barban Marcus, Dorn & Weingarter (eds.), Salzburg.

- [11] GALAVOTTI, M. C., 1999, « What makes Science Unique in the Experience of Mankind? The Specificity of the Scientific Approach », paper presented to the UNESCO-ICSU *World Conference on Science for the Twenty-First Century : a New Commitment*, Budapest, 1999.
- [12] GERO, J., 1990, *Design Prototypes: a Knowledge Representation Schema for Design*.
- [13] KRUGER, L., 1973, « Falsification, Revolution and Continuity in the Development of Science », in *Proc. of the 4th Int. Cong. for Logic, Methodology and Philosophy of Science*, Suppes, Henkin, Joja & Moisil (eds.), Bucharest.
- [14] KUHN, T. S., 1962, *The Structure of Scientific Revolutions*, The University of Chicago Press.
- [15] KUHN, T. S., 1970 a), « Logic of Discovery or Psychology of Research », in : *Criticism and the Growth of Knowledge, Proc. of the International Colloquium on the Philosophy of Science*, Vol. 4, pp. 1-21, Lakatos & Musgrave (eds.), Cambridge University Press.
- [16] KUHN, T.S., 1970 b), « Reflections on my Critics », in : *Criticism and the Growth of Knowledge, Proc. of the International Colloquium on the Philosophy of Science*, Vol. 4, pp. 231-278, Lakatos & Musgrave (eds.), Cambridge University Press.
- [17] LAKATOS, I., 1970, « Falsification and the Methodology of Scientific Research Programmes », *Criticism and the Growth of Knowledge, Proc. of the International Colloquium on the Philosophy of Science*, Vol. 4, pp. 91-195, Lakatos & Musgrave (eds.), Cambridge University Press.
- [18] MILLER, C. L., 1963, « Man-Machine Communication in Civil Engineering », *Proc. ASCE, J. Str. Div.*, p. 3593.
- [19] MUSGRAVE, A. E., 1973, « Falsification and its Critics », in *Proc. of the 4th Int. Cong. for Logic, Methodology and Philosophy of Science*, Suppes, Henkin, Joja & Moisil (eds.), Bucharest.
- [20] PETROSKI, H., 1994, *Design Paradigms : Case Histories of Error and Judgement in Engineering*, Cambridge University Press.

- [21] POPPER, K. R., 1961, *The Logic of Scientific Discovery*, Science Editions, New York.
- [22] RUSSELL, S. ; NORVIG, P., 1995, *Artificial Intelligence. A Modern Approach*, Prentice Hall.
- [23] SUPPES, P., 1962, « Models of Data », in *Proc. of the 1st Int. Cong. for Logic, Methodology and Philosophy of Science*, Stanford University Press.
- [24] SUPPES, P., 1993, *Models and Methods in the Philosophy of Scienc: Selected Essays*, Kluwer Academic Publishers.