

## 2 Sistemas complexos

### 2.1. Introdução

Este capítulo visa a definir os chamados *sistemas complexos* e apresentar as suas principais características. Em especial, mencionar-se-á que tais sistemas, face ao desenvolvimento de comportamentos não-locais, apresentam a capacidade de se auto-organizarem em um estado de *estabilidade marginal*, na fronteira entre ordem e desordem.

Este estado pode ser percebido em diferentes sistemas, razão de ser de sua robustez e fruto de seu comportamento coletivo, sistêmico.

Por fim, embora apresente características de imprevisibilidade, sua evolução temporal, ou, pelo menos, aspectos relacionados a mudanças qualitativas bruscas em sua evolução, podem ser identificados, o que torna possível a sua previsão.

### 2.2. O que são sistemas complexos?

Como se sabe, a metodologia normalmente adotada no estudo de um fenômeno natural consiste em analisá-lo por etapas, dividindo-o em partes menores e investigando-se cada uma delas isoladamente. No caso específico de sistemas *lineares*, em que o desempenho do todo é a *superposição* dos efeitos de cada uma de suas partes formadoras, o estudo em separado é suficiente para uma avaliação global do sistema.

Entretanto, a estratégia anterior torna-se inoperante nos casos em que o comportamento global do sistema é marcadamente distinto daquele obtido considerando-se unicamente a soma de suas partes, ou ignorando a influência recíproca de seus elementos constituintes. Assim, em razão de seu comportamento acentuadamente sistêmico, as propriedades destes sistemas só podem ser identificadas durante o seu comportamento coletivo, sendo ao nível de suas

células elementares, irreduzíveis. Tais sistemas são, por conseguinte, chamados de *complexos*.

Percebe-se, claramente, pelo que se acabou de observar, que, neste contexto, o adjetivo complexo não tem a acepção de *complicado*. De fato, estes sistemas são constituídos por inúmeras unidades de comportamento muito simples, influenciando-se mutuamente numa intrincada rede de conexões e gerando, deste modo, o comportamento complexo global.

A impossibilidade de se separar sistemas complexos em suas partes constituintes, além da notória dificuldade no seu trato analítico, da qual o fenômeno de turbulência é o exemplo mais conhecido, impediu até recentemente um maior desenvolvimento de seu estudo. Porém, graças ao desenvolvimento de computadores e ao aprimoramento de modelos numéricos cada vez mais sofisticados, sua investigação tem se tornado uma área de pesquisa das mais promissoras.

Nota comum ao campo de pesquisa complexo são a abrangência e a interdisciplinaridade dos fenômenos que se propõe a explicar, sendo, portanto, uma área avessa a especialistas e ao pensamento formal reducionista. Assim, fenômenos naturais relacionados a diferentes campos do saber, como a matemática, a física, a química, a biologia, a economia, dentre outros, têm sido objeto de estudo e pesquisa desta forma de ver totalizante.

Não há, pois, uma definição clara e abrangente de sistemas complexos. No entanto, como o leitor verá em seguida, diversos fenômenos comungam de certas características comuns, o que permite englobá-las e analisá-las conjuntamente.

### 2.3. Características dos sistemas complexos

Face ao seu caráter marcadamente multidisciplinar e anti-reducionista, não há, a bem da verdade, até o momento, uma definição rigorosa e abrangente de tais sistemas. Diferentes pesquisadores têm se contentado, por conseguinte, em fornecer algumas de suas características que julgam fundamentais e que são compartilhadas, em maior ou menor grau, por diferentes sistemas dinâmicos evolutivos.

Nussenzveig [4] apresenta, de uma forma bastante didática, algumas destas características:

- São sistemas dinâmicos não-lineares em evolução permanente, abertos para o exterior, constituídos por um grande número de unidades que interagem com um certo número bem menor de vizinhos.
- Cada unidade constituinte pode apresentar o fenômeno de *frustração*, posto que o caráter das mensagens recebidas de cada vizinho pode ser extremamente contraditório, impedindo o cumprimento de cada uma delas simultaneamente.
- O sistema pode desenvolver, ao longo de seu processo evolutivo, acoplamento espaço-temporal, apresentando correlações de longo alcance temporal (memória) e espacial (estruturas fractais). Assim, o sistema se auto-organiza de forma espontânea, criando ordem a partir de um estado inicialmente desordenado ou desprovido por completo de estrutura - a formação de estruturas hierarquizadas é um exemplo típico e fascinante deste efeito de *ordem emergente*.
- Face ao seu comportamento sistêmico, é possível o surgimento de propriedades coletivas emergentes, qualitativamente novas, e que não podem ser identificadas em nenhuma de suas unidades formadoras. Tais propriedades surgem pelo processo de competição e cooperação locais, de forma repetitiva e imitativa (o efeito de manada em bolsas de valores, precursores de crashes em economia, é um exemplo tristemente célebre deste processo imitativo).
- O sistema normalmente apresenta (hiper)superfícies de energia com vários mínimos locais (múltiplos atratores), o que leva a um desenvolvimento temporal extremamente dependente de toda a história anterior, com um grande número de configurações de quase-equilíbrio (meta-equilíbrio). Neste sentido,

diz-se que o sistema tem a sua ergodicidade quebrada ou violada, visto que, ao permanecer enclachado em um dado mínimo local, ficaria impedido de visitar outros estados possíveis. Portanto, qualquer pequena perturbação – externa ou interna – que porventura venha a sofrer, poderá deslocá-lo para outro estado com características totalmente distintas do seu estado originário. Esta é uma das razões pelas quais o tratamento analítico destes sistemas é difícil e, por vezes, mesmo impossível.

- O sistema se organiza espontaneamente na chamada criticalidade auto-organizada (*self-organized criticality* - *SOC*, Bak *et al.* [5,6]), o que o torna extremamente sensível a qualquer perturbação, externa ou interna. A palavra crítico diz respeito a um estado desprovido de qualquer escala característica (fractal), dinamicamente alcançado de forma espontânea, em que as estatísticas de seus principais parâmetros são em lei de potência. Tal estado peculiar, referido na literatura como fronteira do caos, fronteira entre ordem e caos, limiar do caos ou caos fraco (*weak chaos*), caracteriza-se, matematicamente, por apresentar o seu expoente de Lyapunov nulo ou muito próximo de zero. O motivo pelo qual sistemas auto-organizados evoluem na fronteira ordem-caos é que, se por um lado, partilham com sistemas ordenados a capacidade de se adaptarem gradualmente a pequenas perturbações, por outro lado, podem responder rapidamente a mudanças bruscas externas ou internas. Neste sentido, tais sistemas são marginalmente estáveis, sendo comumente adjetivados de “robustos”.
- Outra característica importante diz respeito às flutuações de determinadas propriedades ao longo do tempo, reveladoras de uma superposição de sinais provenientes de todas as escalas de observação, o chamado *ruído bruxuleante* (*1/f noise*).

A proposição de se “observar a floresta ao invés de se ater a uma dada árvore” é extremamente válida, e típica das abordagens holísticas, muito em voga recentemente. Sistemas que compartilham destas importantes características estão presentes em diferentes áreas do conhecimento. Na *biologia*, por exemplo, pesquisas relacionadas à evolução (Gould e Eldredge [7], Bak e Sneppen [8], entre outros) e origem da vida (Kauffman [9]) frequentemente utilizam modelos

matemáticos (redes booleanas, autômatas celulares, redes neurais, etc) cujos resultados estão em sintonia com o paradigma supracitado.

A visão moderna das *ciências sociais* baseia-se, igualmente, na constatação do caráter complexo dos processos econômicos (Anderson et al. [10], Gleiser [11]), e a sociologia também têm se beneficiado desta forma englobante, não reducionista, de ver os processos sociais (Sornette [12]).

## 2.4. Os sistemas complexos e as geociências

Desde meados dos anos 60, geólogos e geofísicos russos do Instituto Internacional de Previsão de Terremotos e Geofísica Matemática, em Moscou, encabeçados por V. I. Keilis-Borok, têm aplicado uma abordagem sistêmica semelhante à que se está descrevendo, na análise e previsão de terremotos ([13]).

Mais recentemente, nos EUA, D. Turcotte [14] e J. Rundle [15], das Universidades de Cornell e do Colorado, bem como D. Vere-Jones [16], da Universidade de Vitória, Nova Zelândia, e I. G. Main [17], da Universidade de Edinburgo, Escócia, dentre outros, vêm utilizando com sucesso a teoria dos sistemas complexos na elaboração de modelos matemáticos para análise e previsão de terremotos. E os exemplos poderiam se multiplicar.

Portanto, o rol das questões abarcadas por esta nova perspectiva é, como se observa, bastante abrangente.

O leitor que porventura tenha formação filosófica certamente identificará, em tal abordagem totalizante, as relações contraditórias entre as categorias filosóficas do geral e do particular, do contingente e do necessário, tão caras à história do pensamento filosófico ([18],[19]). Ressalte-se, pois, que não se trata, em absoluto, de se priorizar uma dada categoria em detrimento de outra, estudar, por exemplo, o geral por si só, deixando-se de lado o particular. Muito ao contrário, trata-se de ver, no particular e contingente, aspectos reiterados, universais, que possam conduzir ao geral e ao necessário.

Entretanto, é forçoso reconhecer que, no campo da engenharia civil, e, em particular, na engenharia geotécnica, a grande maioria das investigações ainda se restringe à análise do particular pura e simplesmente, sendo raras as vezes em que se opera a síntese generalizadora. Assim, por exemplo, na maioria das vezes, a análise *post-mortem* de rupturas em encostas naturais é totalmente inconclusiva, a busca sendo caracterizada pela identificação de algum agente perturbador externo supostamente responsável pela ruína do material. A suposição de que algum fator exógeno ao sistema deva existir necessariamente, de forma a poder explicar o processo catastrófico, é um sintoma característico da forma reducionista, clássica, de encarar a ciência. Para ela, a estabilidade é o estado “normal” do sistema, e a sua instabilidade uma grave alteração desta aparente “normalidade”, necessitando,

por isto mesmo, de um agente causador externo, cuja intensidade seria equivalente à do estrago provocado.

Curiosamente, já faz aproximadamente duas décadas que um grupo de físicos liderados pelo recentemente falecido pesquisador dinamarquês Per Bak, do Instituto Niels Bohr, na Dinamarca, estabeleceram um modelo clássico de sistema que evolui à margem do caos - *a pilha de areia* (Bak *et al.* [5]) -, que em tudo diz respeito aos estudos de estabilidade de encostas, sendo, no entanto, totalmente desconhecido da comunidade geotécnica.

O exemplo é bastante simples, baseado no conceito de ângulo de atrito no repouso, algo sobejamente conhecido dos mecanicistas de solo, que, aparentemente, não extraíram dele todas as suas possibilidades. Imagine-se uma mesa e um aparelho capaz de depositar um grão de areia por vez, no mesmo ponto, de cima para baixo, a uma velocidade constante (Held *et al.* [20]). Com o passar do tempo, o montículo irá crescer até o ponto em que as avalanches de areia manterão a sua inclinação aproximadamente constante. Assim, quando a inclinação num dado local excede a do ângulo de atrito interno no repouso, a areia instabiliza-se, produzindo uma pequena avalanche que reconduz o sistema à sua inclinação crítica.

Percebe-se, por conseguinte, que ele se mantém num estado de *equilíbrio dinâmico*, robusto, ditado pela areia despejada continuamente no tampo e a que deixa o sistema pelas avalanches. O ponto em que as instabilizações começam a acontecer corresponde ao limiar, ao nível crítico do sistema. Neste *estado crítico*, cada grão de areia adicionado à pilha pode produzir uma pequena avalanche (i.é., localmente restrita), ou pode ocasionar uma *reação em cadeia*, gerando instabilizações de qualquer tamanho ou volume, a adoção de uma ou outra opção sendo algo *puramente casual e contingente*. Com isso, a resposta do sistema não é, de modo algum, linear e proporcional à sua entrada, podendo eventos catastróficos serem gerados por uma ínfima perturbação.

Além disso, pode-se mostrar que a frequência com que ocorrem avalanches é uma lei de potência do tamanho das mesmas (Bak [21], Frette [22], Olami [23], entre outros), o que vale dizer que avalanches de todos os tamanhos têm igual probabilidade de ocorrência, não havendo um tamanho característico ao qual o sistema estaria mais propenso a operar.

A figura 2.1 ilustra a distribuição estatística da série temporal da intensidade dos sismos em lei de potência [24]. Tal estatística é conhecida na literatura como *lei de Gutenberg-Richter* [25].

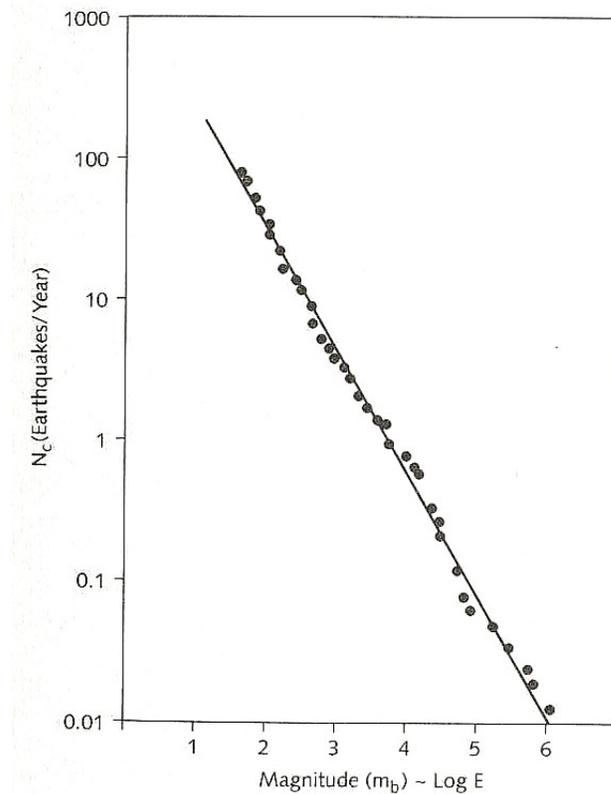


Figura 2.1 – Lei de Gutenberg-Richter.

Em suma, diferentes pesquisadores mostraram que muitos sistemas complexos se auto-organizam entre ordem (estabilidade) e caos (instabilidade), onde o tamanho dos eventos obedece a uma lei de potência.

Assim sendo, compreende-se que, em tais sistemas, apesar de haver uma lei de distribuição de avalanches bem estabelecida, a previsão de fenômenos catastróficos a longo prazo fique comprometida, pois, segundo o que já se observou, eventos individuais não podem ser previstos, nem sequer suas consequências.

Ainda recentemente, as revistas científicas *Nature* [26] e *Geophysical Journal International* [27] promoveram debates exatamente acerca da previsibilidade ou não de terremotos. Os colóquios mostraram que o procedimento analógico de se identificar terremotos com criticalidade auto-

organizada é teórica e experimentalmente bem fundamentado. Um dos participantes do debate da tradicional revista inglesa, o físico francês D. Sornette, da UCLA e do CNRS, defendeu a tese de que, no que concerne à previsão detalhada da evolução dos sistemas complexos, esta não é significativa, sendo mais útil e factível a predição de fases de sua evolução, suas grandes bifurcações, por assim dizer.

Mais pormenorizadamente, a maioria dos sistemas auto-organizados exhibe, segundo ele, mudanças qualitativas repentinas, bruscas, caracterizando eventos extremos e raros (p/exemplo, rupturas em materiais heterogêneos, crashes no mercado de ações, doenças, epidemias, etc). Como já se assinalou, estes sistemas, após alcançarem o estado auto-organizado, robusto, permanecem nele indefinidamente, como se estivessem sempre no ponto crítico, tal como ocorre na mudança do estado alotrópico de uma dada substância (p/ex., transformação de fase da água líquida para vapor). No entanto, para que isso ocorra, são geradas pelo próprio sistema flutuações internas de grande monta em vários de seus parâmetros, razão pela qual faz-se necessária a liberação brusca de energia acumulada, de modo a, verdadeiramente, otimizar o seu dispêndio (Rinaldo *et al.* [28]).

Estes períodos de mudança qualitativa, repentina, freqüentemente referidos como *crises*, têm papel fundamental no comportamento destes sistemas, de sorte que condicionam, em grande parte, o seu próprio processo evolutivo de longo prazo.

A hipótese aventada por Sornette, portanto – e adotada também nesta pesquisa – é a de que é possível a previsão destes eventos catastróficos em sistemas dinâmicos fora do equilíbrio. Especificamente, há evidências empíricas muito fortes (Sornette [29], Johansen [30], Feigenbaum e Freund [31], Jaumé e Sykes [32], Garcimartín *et al.* [33]) de que, com a aproximação do limiar crítico, o sistema emite sinais bastante peculiares, robustos e universais, i.é., compartilhados por diferentes fenômenos físicos - crashes em bolsas de valores, rupturas em materiais, etc.

Ao estudo destes sinais precursores de grandes transformações estão dedicados os capítulos 4 e 8, ocasião em que serão apresentados resultados experimentais que corroboram a aludida tese, sendo viável, portanto, a sua previsão quando estes fenômenos ainda se encontram em gestação.

Ademais, será mostrado no capítulo 6 que o sistema geomecânico, objeto de estudo desta pesquisa, comporta-se como um sistema auto-organizado criticamente, compartilhando de diversas propriedades aludidas anteriormente.