

# As mil e uma maravilhas dos

## Jason Alfredo Carlson Gallas

*Instituto de Física,  
Universidade Federal do  
Rio Grande do Sul.  
Centro de Computação  
de Alta Capacidade,  
Centro de Pesquisas de  
Julich (Alemanha)*

## Hans Jürgen Herrmann

*Instituto de Aplicações  
Computacionais I,  
Universidade de Stuttgart  
(Alemanha).  
Laboratório de Física e  
Mecânica de Meios  
Heterogêneos,  
Escola Superior de Física  
e Química Industriais,  
Paris (França)*

Os materiais compostos de grãos – areia, farinhas, cereais, castanhas, açúcar, pilulas, cimento, minérios e muitos outros – têm comportamentos tão estranhos que até hoje não há um modo confiável de diferenciar um estado fluido ou um estado sólido em tais materiais. Nos últimos tempos, a importância das propriedades dos meios granulares para a criação de materiais avançados e as novas possibilidades de pesquisa trazidas pelos modernos computadores vêm aumentando entre os cientistas o interesse por esse tema. O motivo é claro: o desenvolvimento dos materiais que serão usados no futuro certamente exigirá uma compreensão melhor dos fenômenos estranhos observados na matéria em estado granular.



# meios granulares

**A caixa de areia** fez parte das brincadeiras de muitos de nós, na infância. Na época, porém, não prestávamos atenção à maneira como a areia escorria entre os dedos e pelos furos da peneira, ou como desmoronava se tentássemos construir um castelo, ou ainda como podia ser moldada, quando úmida. Agora, olhando com outros olhos a velha caixa, podemos fazer muitas descobertas interessantes. A primeira coisa que notamos é que a areia situada mais perto da superfície é facilmente deformada ou varrida como um fluido (como ao puxarmos água do piso com um rodo), enquanto a que está mais fundo é dura. Em uma

praia, por exemplo, a areia úmida mais no fundo é às vezes tão dura que podemos – mas não devemos – passear sem dificuldades com um automóvel sobre ela.

Experiências simples mostram que a areia se comporta de modo bem estranho: se pusermos areia sobre uma superfície plana e inclinarmos todo o conjunto, a areia começará a escorregar à medida que aumenta a inclinação, produzindo avalanches irregulares que se congelam de repente, parando de cair. Mesmo que a areia esteja bem seca e fluida acontecem coisas curiosas: uma ampulheta, por exemplo, funciona porque não obedece a uma lei da mecânica dos fluidos, a lei de Hagen-Poiseuille.

Elaborada de forma independente pelo engenheiro alemão Gotthilf Hagen (1797-1884) e pelo médico francês Jean-Louis-Marie Poiseuille (1799-1869), a lei diz que a velocidade de um fluido em



**Figura 1. Diagrama espaço-temporal de um meio composto de partículas esféricas em queda dentro de um cano na posição vertical (aceleradas pela força da gravidade). Na simulação, foi usada a técnica de dinâmica molecular, com um modelo bidimensional e condições de contorno periódicas (as partículas que saem do cano são reinjetadas por cima). Cada dois traços verticais, separados por espaços brancos, representam uma imagem da configuração interna do cano cheio de partículas**

um cano aumenta à medida que cresce a altura da coluna de fluido. Na ampulheta, porém, a velocidade da areia que passa pelo gargalo é constante. Assim, a ampulheta só é útil, permitindo medir determinado intervalo de tempo, por violar a lei de Hagen-Poiseuille.

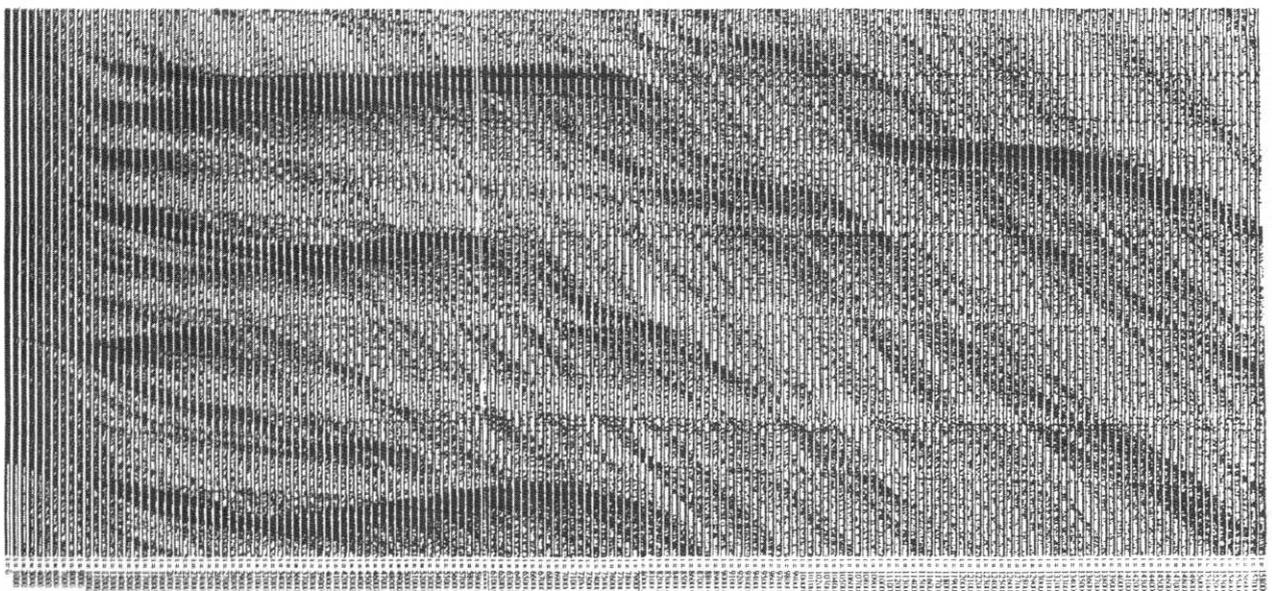
Mas por que devemos examinar melhor tais propriedades curiosas? É simples: materiais granulares, como areia, grãos de cereais, farinhas, açúcar, pílulas, minérios, cascalho, granulados, cimento e argila, têm grande importância na vida moderna. Por isso, suas propriedades são estudadas desde o início do século por engenheiros e técnicos em processos industriais. Graças a tais estudos, muitas leis interessantes que regem o comportamento desses materiais foram descobertas.

As propriedades exóticas de grãos e pós já fascinavam cientistas desde o século passado: os ingleses Michael Faraday (1791-1867) e Osborne Reynolds (1842-1912) e o próprio Hagen estão entre os que contribuíram para seu entendimento. Embora se saiba que toda matéria é constituída por átomos e moléculas, fluidos familiares como água e outros líquidos são perfeitamente descritos por teorias que os tratam como meios contínuos. Mas ninguém formulou uma teoria do contínuo adequada para os 'fluidos' granulares, e por isso eles permaneceram uma espécie de tabu para os grandes físicos teóricos da virada do século XIX

para o atual.

Até recentemente, o estudo dos meios granulares era orientado pelas inúmeras aplicações práticas derivadas de seus estranhos comportamentos. Agora, porém, o interesse dos físicos por esses meios apresenta uma espécie de renascimento. Isso decorre, em parte, da introdução de novos conceitos que ajudam a compreender meios desordenados e sistemas coletivos – como o de 'criticalidade auto-organizada' (ver 'O que avalanches de grãos de arroz podem revelar aos físicos?', em *Ciência Hoje* nº 124). Além disso, os sofisticados centros de computação atuais oferecem novas possibilidades de simulação de sistemas com muitas partículas, permitindo muitas vezes comparar resultados teóricos e dados experimentais.

Métodos da dinâmica molecular permitem calcular a trajetória de cada grão durante períodos de tempo realísticos (até por minutos). Isso permite, com a ajuda dos atuais computadores, investigar o comportamento simultâneo de até 10 mil grãos, usando-se leis de força simplificadas para descrever as interações entre eles. Um sistema com um número ainda maior de partículas pode ser simulado através do modelo denominado 'gás sob rede' (em inglês, *lattice gas model*), especialmente apropriado para simulações em computadores de processamento paralelo.



tempo

EXTRAÍDO DE PÖSCHHEL

Mas o que existe de tão especial nos meios granulares, para atrair tanta atenção e justificar tanto esforço? A resposta está em certas propriedades e em suas múltiplas aplicações.

## Dissipação de energia

Uma propriedade importante para os físicos é a de que materiais granulares são meios dissipativos. Por causa das deformações plásticas sofridas pela superfície dos grãos ao colidirem uns com os outros, tais colisões são ditas inelásticas. Isso significa que parte da energia envolvida na colisão é gasta para deformar o grão, que não retorna depois à forma original. O calor resultante das colisões é irradiado e difundido através do ar. Nesse caso, em contraste com as leis microscópicas da física, ocorre perda local de energia, e se essa energia não for reposta de modo contínuo, os grãos atingem eventualmente o estado de repouso.

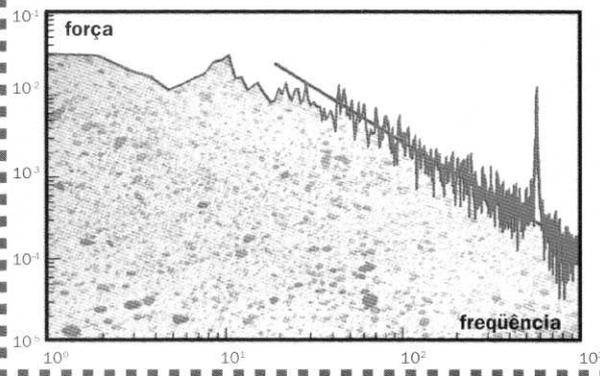
Todos sabemos que é mais fácil mover a mão dentro da água do que em uma caixa de areia. Dentro da areia, o movimento aquece a mão. Sistemas dissipativos semelhantes são, por exemplo, o tráfego de automóveis e o comportamento coletivo de seres vivos (colônias de bactérias, cardumes de peixes e outros).

A dissipação causa instabilidade na densidade do meio granular. Para entender isso, basta pensar que colisões inelásticas são mais frequentes em áreas de densidade mais alta, onde os grãos estão mais perto uns dos outros. Com as colisões, a energia cinética (de movimento) local diminui, reduzindo a pressão local e fazendo com que mais grãos fluam para essas áreas de baixa pressão. Assim, a densidade cresce mais ainda em locais onde já era mais alta. Em um fluxo dentro de um cano, as áreas mais densas movem-se como ondas, semelhantes às 'ondas de engarrafamento' em uma auto-estrada. Outro exemplo é o esvaziamento de silos industriais: às vezes as ondas de choque tornam-se tão fortes que podem romper as paredes, nos chamados 'terremotos de silos'.

Estudos recentes revelaram que, como acontece nos verdadeiros terremotos, as flutuações da densidade em meios granulares podem atingir valores críticos. Nesse caso, surgem adensamentos com comprimentos de onda que podem se

## Uma análise das flutuações

As flutuações de densidade podem ser calculadas em relação à frequência. A figura 2 mostra como se comporta a densidade (dada no gráfico pela transformada temporal de Fourier dessa densidade) em determinado local do meio granular à medida que aumenta a frequência (o número de ondas de choque em determinado período de tempo, nesse meio). A escala usada é duplamente logarítmica, necessária para descobrir a relação entre essas duas variáveis. É possível reconhecer na inclinação da imagem formada no gráfico uma lei de potências com o expoente  $4/3$  e uma linha que corresponde à onda cinemática. O cálculo foi feito com um gás sob rede dissipativo sobre uma malha triangular.



**Figura 2.** Comportamento da densidade em função da frequência

tornar arbitrariamente grandes. Como nos movimentos da crosta terrestre, o sistema atinge por si mesmo esse estado crítico, denominado 'criticalidade auto-organizada'.

Flutuações de densidade podem ser observadas na simulação, em computador, de um meio formado por partículas esféricas aceleradas pela gravidade em um cano (figura 1). Colocando-se lado a lado várias imagens da configuração interna do cano, obtidas a intervalos de tempo iguais, é possível visualizar como o processo evolui. A simulação mostra densificações (faixas escuras) e rarefações (faixas claras) grandes e quase estacionárias, além de linhas de aumento constante (oblíquas) correspondentes às chamadas 'ondas cinemáticas' (ver 'Uma análise das flutuações').

Por causa do mecanismo de dissipação de energia, a velocidade do movimento de 'zig-zague' (agitação) dos grãos em um fluxo de areia é da mesma ordem de grandeza que a velocidade do fluxo inteiro. Na linguagem dos fluidos moleculares, isso significa que nessa situação não podemos diferenciar, em termos energéticos, as contribuições térmicas das contribuições

convectivas. A viscosidade (grau de atrito interno de um fluido) não é constante, mas sim proporcional à velocidade relativa entre as 'camadas' do meio em estudo (chamada de velocidade de cisalhamento). Essa lei de proporcionalidade foi medida pela primeira vez em 1954 pelo geólogo inglês Ralph A. Bagnold (1896-1990). Portanto, por causa das dissipações locais, a areia comporta-se como um fluido não-newtoniano, ou seja, um fluido no qual a viscosidade não é constante, mas proporcional à velocidade em que ele se move.

**Figura 3. Propagação de frente de onda (estrutura mais escura à direita) prestes a se chocar com a parede lateral direita. Tons mais escuros indicam partículas com maior energia cinética. A frente de onda foi gerada pelo deslocamento súbito da parede esquerda, de apenas um centésimo do diâmetro das partículas. A densidade afunilada que parece 'cair' à esquerda) deve-se ao efeito combinado da não-linearidade do meio e da superfície aberta do sistema**

## Forças não-lineares

Em montinhos de areia em repouso, as forças que atuam entre os grãos também têm suas particularidades. No caso ideal de grãos secos, sob tensões atrativas, não existe uma força que restaure o formato original dos grãos. Mas se o montinho for comprimido a situação muda, e a força entre os grãos passa a depender do formato destes: entre esferas, por exemplo, a força elástica de repulsão ( $F_n$ ) cresce com a deformação  $\delta$ : a primeira é proporcional a uma potência da segunda ( $F_n \propto \delta^{3/2}$ ), de acordo com a chamada lei de Hertz. Isso acontece porque, na compressão, a superfície de contato em cada grão cresce à medida que ele é deformado. Essa força de repulsão também pode

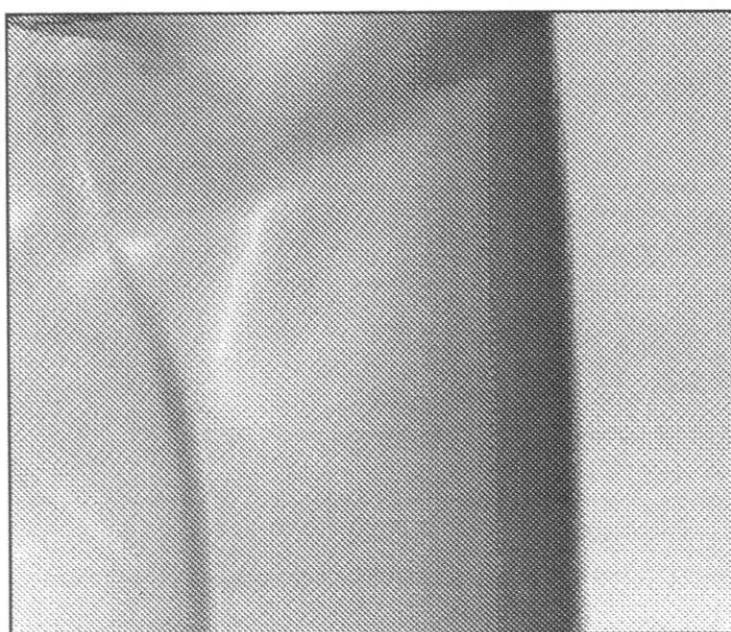
ser calculada para grãos não-esféricos, de formas mais complicadas, mas nesse caso o expoente da equação será outro.

Já a força de fricção entre corpos rígidos (que não se deformam) atua tangencialmente à superfície de contato entre os grãos. Caso dois grãos em contato movam-se um em relação ao outro, surge uma força de atrito dinâmico. Se não há esse movimento relativo, ocorre apenas uma força de atrito estático, em geral bem mais forte que a de atrito dinâmico.

Um 'empacotamento' de muitas partículas (um monte de areia, por exemplo) amplifica o comportamento não-linear dos contatos individuais entre elas. Isso ocorre porque, em função da desordem do sistema, há muitos 'contatos abertos' (espaços vazios) entre partículas vizinhas. Tais contatos tendem a se 'fechar' se o material for pressionado. A força necessária para fechar todos os contatos abertos (eliminar os espaços) cresce com extrema rapidez à medida que é aplicada, de modo semelhante à citada força elástica de repulsão – a mesma equação pode ser usada, mudando-se apenas o expoente.

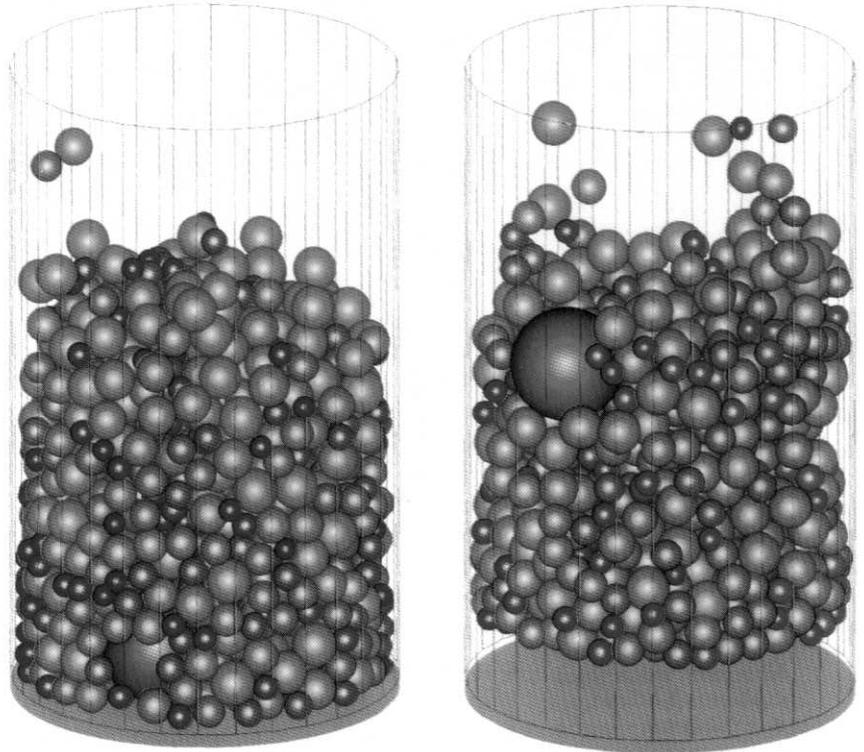
Sob a ação da gravidade, o peso das partículas situadas na parte superior do material é transmitido para baixo (atuando como força de compressão) através de uma malha de linhas de força definida pelos contatos entre as partículas. Se a força gravitacional diminui, a densidade dos contatos também se reduz e, em conseqüência, haverá menos linhas de força. Sobre cada linha, no entanto, atuará uma fração maior da força total que precisa ser transmitida para baixo. Quando a força gravitacional aproxima-se de zero, a rede de contatos (incluindo todas as linhas de força) pode apresentar configuração fractal – condição em que qualquer parte componente dessa configuração, tomada separadamente e ampliada, é semelhante à estrutura inteira.

As não-linearidades existentes em meios granulares produzem todo tipo de anomalias na frente de propagação de uma onda acústica (uma oscilação da pressão interna). Particularmente bem conhecido é o efeito *mirage*: em um meio granular, uma onda que começa a se propagar horizontalmente, com frentes de onda verticais, aos poucos altera a direção de propagação, de tal modo que o plano da frente de onda se curva cada vez mais para cima. Isso acontece porque



em tais meios a velocidade ( $v$ ) de propagação da onda acústica é proporcional à profundidade ( $d$ ): se esta última cresce, a primeira também aumenta.

Para uma pilha construída com esferas, a proporcionalidade entre a velocidade e a profundidade é dada pela equação  $v \propto d^{1/6}$ . Simulações tridimensionais em computador feitas na Associação para o Tratamento Matemático de Dados (GMD, na sigla original), em Sankt Augustin, perto de Bonn (Alemanha), em um meio com 64 mil esferas com o mesmo tamanho e no qual a força de repulsão é proporcional à densidade (segundo a equação  $F_n \propto \delta^{3/2}$ ), geraram padrões complicados (figura 3). Nesse caso a velocidade da onda acústica cresce fracamente com a profundidade. Após uma primeira frente de onda ocorre uma segunda, mais lenta. Simulações semelhantes, em modelo unidimensional, revelam a ocorrência de um número infinito de ondas, progressivamente mais fracas e mais lentas.



## 'Castanhas-do-pará' e 'baleias'

A natureza corpuscular dos meios granulares permite explorar todos os seus aspectos macroscópicos: por exemplo, misturas de grãos com diferentes tamanhos e formatos. Um fenômeno interessante é o processo de separação dos diversos tipos de grãos, que pode acontecer de várias formas: colocando-se a mistura em um plano inclinado, em um tambor que gira, sobre esteiras vibrantes ou ainda sobre placas vibrantes. O fenômeno também pode ser observado na natureza, como nos anéis de matéria existentes em torno de planetas e asteróides.

Efeito espetacular é a separação de misturas de grãos de diferentes tamanhos, conhecido como 'efeito castanha-do-pará' (em inglês, *Brazil nut effect*). Para observá-lo, misturam-se em um recipiente grãos pequenos e grandes, ambos com densidades aproximadamente iguais. Quando o recipiente é vibrado, os dois tipos separam-se aos poucos e as partículas de maior tamanho tendem a subir para a superfície (figura 4). As causas exatas desse efeito ainda são motivo de discussão entre os pesquisadores.

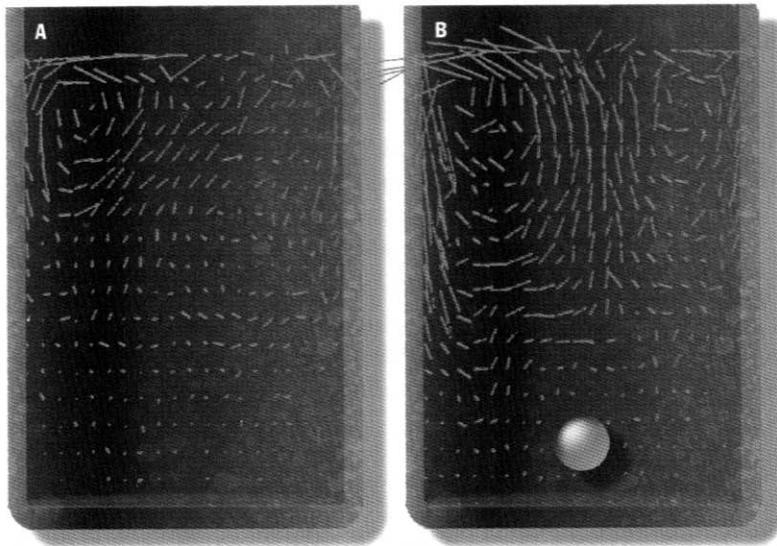
O efeito de segregação pelo tamanho foi simulado em computador de diversas manei-

ras, mas sempre utilizando uma mistura composta por discos bidimensionais, e não por partículas tridimensionais. Em 1996, porém, junto com Thorsten Pöschel e Stefan Sokolowski, os autores deste artigo usaram dinâmica molecular para simular o que acontece em uma mistura de partículas tridimensionais (*Journal of Statistical Physics*, vol. 82, p. 443). Resultado curioso, que finalmente foi reproduzido em uma simulação, é o 'efeito baleia', fácil de observar de forma experimental: uma partícula maior emerge e submerge periodicamente na superfície da mistura.

Esse é o grande desafio de tais simulações: enquanto os experimentos reais podem ser observados no laboratório durante horas, a determinação da evolução de modelos realísticos (que levam em conta 'todas' as forças que atuam entre os grãos e entre estes e as paredes), mesmo usando os melhores recursos computacionais disponíveis hoje no mundo, pode ser feita apenas durante uns poucos segundos.

O início da sinterização de nanoagregados (materiais microscópicos) de nitreto de silício foi simulado também em 1996 por K. Tsuruta e outros (*Europhysics Letters*, vol. 33, p. 441). Na sinterização, os materiais são aglomerados por

**Figura 4. O 'efeito castanha-do-pará': uma partícula de maior tamanho (em vermelho) colocada no fundo de um recipiente cilíndrico sobe para a superfície quando o conjunto é periodicamente vibrado. O tom verde-azulado das demais partículas está relacionado com a distribuição dos tamanhos dos grãos menores (quanto mais escuro o tom, menor o raio da esfera)**



**Figura 5. Dinâmica molecular (A) de um meio com 930 esferas (com raios entre 0,85cm e 1,15cm) distribuídas aleatoriamente em um recipiente que vibra com frequência de 2,8 oscilações por segundo e com amplitude de 2cm. Quando é acrescentada ao sistema (B) uma esfera quatro vezes maior, colocada no fundo, as células de convecção aparecem com maior intensidade**

meios térmicos. A simulação envolveu 100 mil partículas e permitiu observar a dinâmica do processo durante períodos de apenas 200 picossegundos (ou 0,2 bilionésimo de segundo). Embora pequena, essa fração de tempo foi suficiente para detectar assimetrias na sinterização, bem como diferenças na velocidade dos processos de difusão dos materiais envolvidos.

Um detalhe a ser destacado, nesse trabalho, é que a simulação numérica das propriedades de materiais nanoagregados – com grãos de diâmetro menor que 20 nanômetros (20 bilionésimos do metro) – envolve tipos especiais de forças, as chamadas forças capilares e forças de Van der Waals, não tão importantes para a geração dos demais efeitos discutidos neste artigo. A sinterização de nanoagregados, tecnologia hoje muito importante, foi usada em 1994 por Marcia Gallas, Gasper Piermarini e Alex Pechenik (*Journal of American Ceramical Society*, vol. 77, p. 2.107) para elaborar materiais novos, como cerâmicas transparentes, de grande potencial em áreas estratégicas como a aeroespacial, a eletrônica e outras.

Um mecanismo que talvez possa empurrar as partículas maiores para cima, ao serem vibradas, é a convecção, que pode ser definida, de modo simplificado, como a formação de ‘fluxos’ internos. Na areia submetida a vibração aparecem, após certo valor limite da frequência, ‘rolos’ de convecção semelhantes aos observados em um fluido submetido a diferenças de temperatura – um experimento clássico da física dos fluidos,

conhecido como Rayleigh-Bénard. Cálculos recentes indicam que uma partícula grande pode induzir sobre si mesma uma célula de convecção que a faz subir dentro da mistura. O campo de velocidades de esferas situadas em uma caixa que vibra altera-se – as células de convecção tornam-se mais pronunciadas – quando uma esfera maior é colocada no fundo da caixa (figura 5).

Experimento semelhante, usando um tambor que gira, permite encontrar regiões de separação de grãos onde se formam bandas de grãos, cada uma delas com grãos aproximadamente iguais em tamanho. Tais bandas são paralelas ao eixo no qual o tambor gira e, durante a queda livre do material dentro do cilindro, observa-se que os grãos são segregados por tamanho ao longo da trajetória que descrevem. O fenômeno da segregação de partículas por tamanho torna-se um problema tecnológico quando, por exemplo, se deseja misturar produtos como nozes ou cereais com uma fração certa de cada tipo de produto, ou separar industrialmente diamantes de tamanhos e formatos diferentes.

## Hipóteses teóricas

O comportamento dos meios granulares é determinado essencialmente por sua densidade. Nos últimos 30 anos, as teorias do contínuo desenvolvidas por engenheiros foram muito úteis para casos extremos: densidades altas e baixas. Os especialistas em mecânica dos solos, por exemplo, calculam as deformações de empacotamentos densos de meios granulares usando a teoria da plasticidade não-associativa, do químico alemão Karl Mohr (1806-1879) e do físico francês Charles-Augustin de Coulomb (1736-1806). Tal teoria baseia-se em equações diferenciais para os deslocamentos, junto com uma equação não-linear acessória, que fixa o ponto de fluidificação plástica (reversível). Tal ponto, em contraste com a plasticidade de metais, cresce na proporção direta da pressão externa aplicada.

Além disso, há geralmente uma alteração de volume, determinada pelo ‘ângulo de dilatância’, para permitir movimentos de translação. Se tentarmos, por exemplo, mover horizontalmente um plano de grãos formados por esferas idênticas que esteja apoiado sobre outro plano semelhan-

te, o volume total da camada ou aumentará ou diminuirá, dependendo da posição relativa dos dois planos (ou seja, dependendo de como as esferas estão apoiadas umas sobre as outras). É fácil imaginar que esferas compactadas através de vibrações estão mais 'encaixadas' (têm menos espaços vazios entre elas), e portanto será preciso que se afastem um pouco para se moverem no plano horizontal, o que implica aumentar a altura total do conjunto desses planos (ou seja, aumentar a dilatância).

A teoria da plasticidade não-associativa explica, entre outras coisas, como se formam as chamadas bandas de cisalhamento. Quando se deforma cuidadosamente a areia contida em uma caixa (movendo uma das paredes, por exemplo), uma série de linhas paralelas surge na superfície do material. Tais linhas são as partes visíveis dos planos de menor densidade existentes no interior da areia, ao longo dos quais ocorrem deslizamentos de planos mais densos (semelhantes aos deslocamentos diferentes de algumas camadas de rochas sobre outras nos terremotos).

A possibilidade de existência desses planos singulares também foi demonstrada teoricamente, através da análise da estabilidade das equações de plasticidade feita em 1994 por Alexei Polyakov e Hans Herrmann. Quando duas 'paredes' opostas de uma 'caixa' contendo material granular (simulada em computador) são 'empurradas' em direção ao centro da caixa, enquanto ao mesmo tempo e com a mesma velocidade as outras duas são 'puxadas', surge uma rede complexa de bandas de cisalhamento (figura 6). Quando se reduz a resolução ( $l$ ) da malha usada para o cálculo numérico, as linhas tornam-se mais finas e mais numerosas. O sistema novamente evolui por si mesmo para um estado crítico, pois a densidade ( $\rho$ ) das zonas plásticas locais tende a zero (segundo a lei  $\rho \sim l^{-5.8}$ ). Em outras palavras, a rede de bandas torna-se fractal.

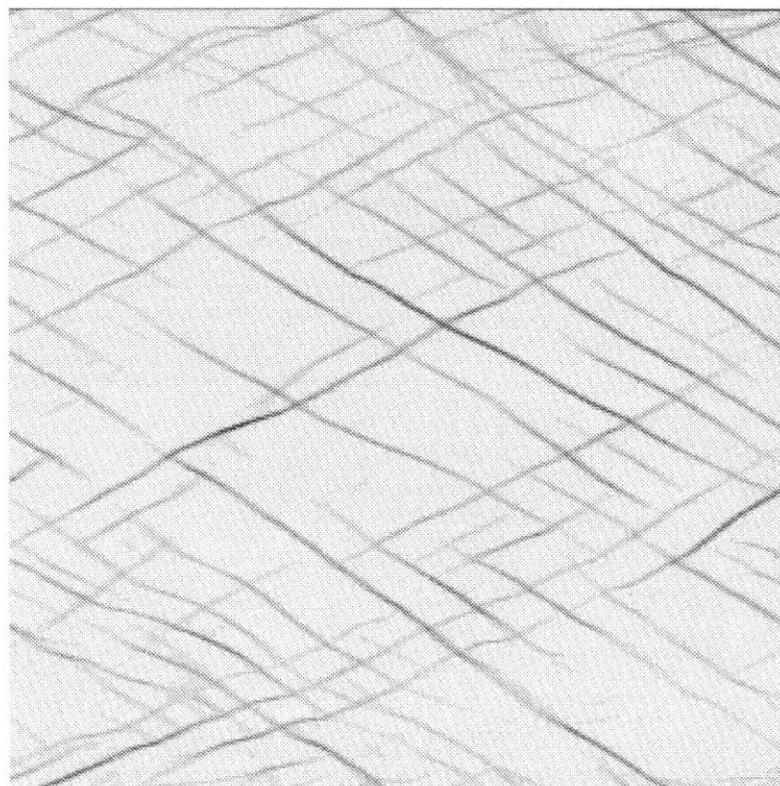
A teoria da plasticidade não-associativa só é válida se o meio granular estiver densamente empacotado. Quando se quer calcular zonas de estagnação em funis ou zonas de entupimento em canos, surgem desvios que não obedecem a essa lei.

Se a areia estiver sendo remexida de um modo que permita aos grãos manterem seus contatos, é

possível formular para esse meio uma teoria cinética de gases com dissipação, o que foi feito de modo independente por Peter K. Haff (1983), James T. Jenkins (1985) e Stuart J. Savage (1992). Essa teoria reproduz a viscosidade de Bagnold e fornece um perfil realístico de velocidades para uma massa de pó, mas ainda não é suficiente para explicar o processo de segregação nem para levar em conta a existência de um ângulo de repouso do material, como o que pode ser observado nos montes de grãos.

Fenômenos ainda mais curiosos ocorrem em áreas de densidades médias, onde nenhuma dessas teorias permanece válida. Um experimento interessante, que ilustra as dificuldades que surgem nesse caso, é o descrito por Reynolds em 1885: amarra-se um pequeno cano na boca de um balão de borracha cheio com areia e água, para que se possa verificar o nível de água. Se o balão é pressionado, o nível de água desce no cano – se ele contivesse apenas água, o nível subiria. A razão para a descida do nível é a seguinte: ao ser comprimida a areia precisa se expandir (e os espaços que abre nessa expansão são rapidamente ocupados pela água) até chegar à chamada densidade 'de Reynolds' ( $\rho^d$ ) antes que possa ser deformada.

**Figura 6. Resultado de simulação mostrando uma rede de bandas de cisalhamento em meio granular contido em malha quadrada de tamanho 300 x 300. A rede surge quando as 'paredes' da direita e da esquerda do modelo são comprimidas, enquanto, ao mesmo tempo e com a mesma velocidade, são puxadas as de cima e de baixo. Tons mais escuros correspondem a maiores velocidades locais de cisalhamento**



Para densidades abaixo de  $\rho^d$  a areia pode mover-se livremente. Nas praias, é possível observar tal fenômeno: se pisarmos com força a areia úmida, em torno do pé essa areia não irá afundar para então encher-se de água: ao contrário, ficará seca. A explicação novamente é simples: a pressão do pé faz o volume do material aumentar, abrindo entre os grãos 'poros' que se enchem de água (o que a faz desaparecer da superfície). Retirada a pressão, a água é novamente expelida para fora dos 'poros'.

A areia, quando vibrada ou ao sofrer cisalhamento, expande-se localmente para fluir, mas densifica-se (endurece) de imediato por conta da dissipação de energia. Esse jogo de vaivém provoca o travamento intermitente da dinâmica de avalanches (observado na superfície de montinhos de areia), os estranhos deslocamentos quando o material está sob tensão de cisalhamento constante (observados quando se inclina lentamente uma tábua com um pouco de areia) e também as flutuações de densidade verificadas em um cano ou um funil.

Um exemplo de 'deslocamento estranho' semelhante aos observados em meios granulares ocorre quando se descola uma fita adesiva puxando-a continuamente. No descolamento, a fita alterna, durante tempos irregulares e curtos, dois movimentos: o de desgruda contínua e o de desgruda aos saltos (alternância chamada, em inglês, de *stick-slip motion*). O comportamento genérico de sistemas com essas características (com dinâmica onde há um limiar crítico) foi pesquisado em modelos bastante simples por Per Bak, C. Tang e Kurt Wiesenfeld. Eles introduziram o conceito de 'criticalidade auto-organizada' para descrever tal dinâmica: quando o sistema cruza o limiar crítico ocorrem reações em cadeia com tamanhos arbitrariamente grandes (ver 'Avalanches no cérebro' em *Ciência Hoje* n° 135).

Do mesmo modo, quando um meio granular ultrapassa o limiar da dilatância de Reynolds, surgem eventualmente em seu interior zonas de fluidificação de tamanhos arbitrários. Em experimentos a mesma dinâmica é observada nas avalanches em pequenos montes de areia, na emissão acústica sob cisalhamento e nas flutuações de densidade e força em funis. Já avalanches em montes de areia maiores têm frequência e tamanho característicos porque os valores

de atrito estático e dinâmico são diferentes dos presentes nos pequenos montes.

Nos últimos anos, muitos físicos têm sugerido novas hipóteses, engenhosas e complexas, para descrever as propriedades observadas na vizinhança da dilatância de Reynolds, embora nem tudo seja satisfatoriamente explicado. Tais propriedades ainda precisam ser testadas, teórica e experimentalmente, mas é fácil antecipar que em breve surgirão explicações adicionais.

Os meios granulares ainda desafiam a ciência através de inúmeros fenômenos não-usuais. Para citar apenas um deles, até hoje os cientistas tentam explicar um experimento muito simples, descrito pela primeira vez em 1831 por Faraday: quando se vibra uma fina camada de areia sobre uma placa (com a ajuda de um alto-falante, por exemplo), surgem espontaneamente pequenos montes nos quais a areia se move. Nesses montículos, a areia sobe pela parte central e escorrega pelas superfícies laterais, como se fossem pequenos vulcões em erupção. Visualmente, a areia parece mesmo 'fervor' no topo dos 'vulcões'. Embora o fenômeno seja conhecido há 166 anos, suas causas ainda são ignoradas.

Como se pode perceber, a velha caixa de areia da infância ainda guarda fenômenos físicos básicos, esperando para serem desvendados. Um grande avanço, por exemplo, seria um critério confiável para definir sem ambigüidades um estado fluido ou um estado sólido em meios granulares. Os materiais que serão usados no futuro certamente exigirão, para seu desenvolvimento, uma compreensão melhor dos fenômenos de grande complexidade observados na matéria em estado granular. E, assim como o telescópio tem sido há muito tempo o instrumento básico para os avanços da astronomia, o computador paralelo moderno é a ferramenta essencial que permitirá descobertas fascinantes na área de novos materiais.



### Sugestões para leitura

JAEGER, H.M., NAGEL, S.R. & BEHRINGER, R.P. 'The physics of granular materials', *Physics Today*, vol. 49 (p. 32), 1994.

JAEGER, H.M., NAGEL, S.R. & BEHRINGER, R.P. 'Granular solids, liquids, and gases', *Reviews of Modern Physics*, vol. 68 (p. 1.259), 1996.

WOLF, D.E. & GRASSBERGER, P. (Eds.). *Workshop on friction, arching, contact dynamics*, World Scientific, Singapura, 1996.