

Materiales granulares

# El estilo arquitectónico *del azar*

por Luis Ariel Pugnali

*¿Qué tienen en común el café, la arena y el canto rodado? Estos productos tan disímiles, algunos de ellos minerales y otros vegetales, coinciden en que conforman granos de diferente tamaño. Luis Ariel Pugnali —físico del Instituto de Física de Líquidos y Sistemas Biológicos del CONICET; actualmente en la Universidad de Leeds, en el Reino Unido— explica el secreto de estos materiales y para qué sirve estudiarlos. Sus investigaciones están financiadas por la Fundación Antorchas y el British Council*



Los materiales granulares son parte importante de nuestra vida cotidiana. Por ejemplo, algunos productos comestibles como el café, el azúcar y la sal son granulares. También lo son las semillas como el trigo y el maíz; ciertos artículos de limpieza como polvos abrasivos y jabones; y los materiales de construcción: arena, canto rodado, cemento, cal.

Así como los átomos son los entes elementales que forman sólidos, líquidos y gases, los granos son los constituyentes básicos de los materiales granulares. A pesar de que son claramente perceptibles, el comportamiento de los granos es menos conocido que el de entes más abstractos como los electrones. Los materiales granulares son sumamente peculiares y muy distintos de los sólidos, líquidos y gases. La razón es muy simple: los granos no interactúan a través de fuerzas conservativas como sucede con los átomos.

Pero, ¿qué son las fuerzas conservativas? Cuando dos átomos chocan entre sí, se conserva la energía del conjunto, salvo que choquen tan fuerte que se hagan añicos en electrones, protones y neutrones. Pero cuando dos granos chocan, no hay fuerzas conservativas, es decir, se gasta mucha energía en fricción y deformación. Por ejemplo, si chocan dos pedazos de masilla, casi toda la energía del movimiento se consume en abollar las partes.

### Granos que forman arcos

Debemos tener en cuenta que cada grano en sí mismo es un sólido que puede, en forma aislada, ser estudiado como cualquier sólido. Cuando muchos granos se juntan, suceden cosas interesantes. Entre ellos existe rozamiento, lo que les permite apoyarse unos sobre otros y formar estructuras que se conocen como arcos o puentes. Estas estructuras determinan muchos de los fenómenos característicos de estos sistemas. Por ejemplo, la presión ejercida sobre el fondo de un silo es constante, sin importar la altura de la columna de trigo. Mirando de cerca la estructura de estos arcos podemos comprender mejor el comportamiento de los materiales granulares. Experimentos simples y simulaciones por computadora nos revelan el estilo arquitectónico con que el azar construye arcos en el interior de un silo lleno de grano.

En la escuela hemos aprendido que la materia se presenta básicamente en tres estados: sólido, líquido y gaseoso. Las principales características de estos estados son bastante conocidas: los sólidos son difíciles de comprimir y deformar, los líquidos también son difíciles de comprimir pero se deforman fácilmente ajustándose a su recipiente. Los gases, por su parte, se comprimen y deforman con facilidad, y se expanden tanto que llenan todo el espacio disponible.

Las propiedades de estos sistemas fueron estudiadas durante décadas haciendo uso del concepto atomístico: “todos los objetos están constituidos por átomos que se mueven e interactúan entre sí”. De este modo, con el uso de la teoría mecánica estadística, se puede predecir el comportamiento de un conjunto infinito de átomos que siguen las leyes de la mecánica

cuántica. Tengamos en cuenta que “infinito” es una buena aproximación, por ejemplo, para un litro de agua, que contiene más de  $3 \times 10^{25}$  (un tres seguido por 25 ceros) átomos de oxígeno y el doble de átomos de hidrógeno.

A menudo, como otra buena aproximación, los átomos son considerados como objetos que siguen las leyes de la mecánica de Newton. Para esto se usan fuerzas de interacción ficticias que simulan el carácter cuántico de los átomos. En todo caso hay algo central en estos sistemas: las fuerzas de interacción son conservativas. Esto significa que no existe rozamiento entre los átomos.

### Materiales muy peculiares

En los materiales granulares es posible hallar muchas peculiaridades. En ciertos aspectos se comportan como sólidos y, en otros, como líquidos. Por ejemplo, se puede construir una montaña de maíz sin que se desparrame, como sucede con el agua; pero también se puede hacer fluir maíz por un embudo.

Una propiedad única de los materiales granulares es la forma en que fluyen por un agujero. Cuando un silo se vacía por una boquilla, la velocidad de salida del grano no depende de lo lleno que esté el silo (excepto que ya quede muy poco grano). Gracias a esta propiedad funcionan los relojes de arena ya que el ritmo con que fluye la arena es casi constante. Esto es muy diferente en el caso del agua que sale por una canilla, que fluye más rápido cuanto más lleno está el tanque. Además, los granos se pueden atascar al intentar salir por un agujero. Esto sucede, por ejemplo, cuando queremos usar un salero en un día húmedo. Este problema de obstrucción del flujo de material es central en muchas industrias en las que tales productos son manipulados y envasados. Los ejemplos

abundan en la industria farmacéutica, la producción agrícola y las industrias alimenticias.

Estas características fueron asociadas por los científicos a la formación de arcos en el interior de los materiales granulares. Desde la época de los sumerios, este estilo de construcción fue usado para los dinteles. De este modo se puede salvar el espacio entre los lados de una puerta o ventana. Cada ladrillo es esencial para la estabilidad del arco: cada uno sostiene al ladrillo adyacente y, a su vez, es sostenido por él. Pero, para construir un arco no es cuestión de arrojar al aire unos cuantos ladrillos; es necesario acomodarlos cuidadosamente. ¿Cómo es posible entonces encontrar arcos en un montón de granos?

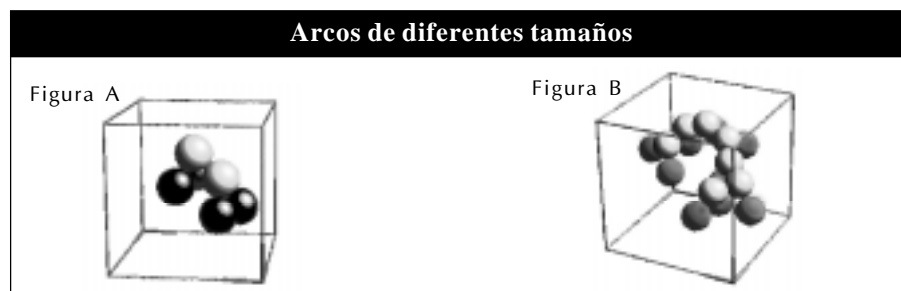
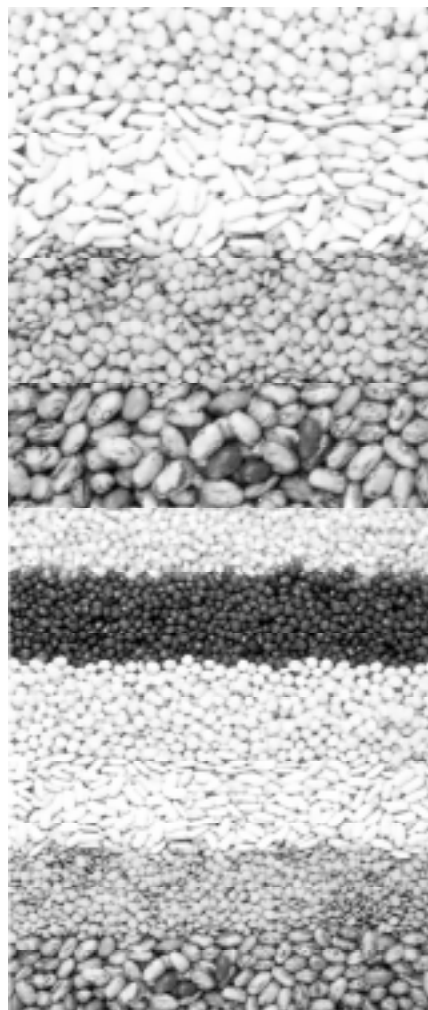
Los granos, gracias al rozamiento mutuo, pueden acomodarse para construir arcos. Pero no es necesario ser muy cuidadosos con los granos. Al llenar o batir un recipiente con granos, es muy probable que algunos se acomoden formando arcos en el interior del recipiente, simplemente por azar.

Un arco tiene la propiedad de transmitir el peso de todo lo que se encuentra sobre él hacia los lados del mismo modo en que, sobre una puerta, el peso de los ladrillos superiores se transmite hacia las paredes laterales. Esta característica hace que buena parte del peso del cereal dentro de un silo se trasmite a las paredes y no al fondo del silo. El resultado es una gran presión sobre las paredes del silo y una presión constante en el fondo, independientemente de lo lleno que esté el silo. De ahí que la velocidad de salida de grano por una boquilla en el fondo de un silo sea constante.

Por otro lado, si un arco se forma a la salida de un agujero por el que fluye grano, el agujero se bloquea y el flujo se detiene. Esto

explica por qué los saleros se tapan: cuando hay mucha humedad los granos de sal se pegan fácilmente unos a otros y esto facilita la formación de arcos. Claro está que es más probable que se formen arcos pequeños que arcos grandes, y es por ello que un agujero grande difícilmente se obstruya.

Recientemente, el doctor Kiwing To y sus colaboradores de la Academia Sínica (Taipei, Taiwan) midieron la probabilidad de atasco de una tolva bidimensional. El experimento consiste en hacer fluir por un embudo plano unos 200 discos de acero inoxidable. La frac-



ción de veces que el embudo se atasca es lo que se conoce como la probabilidad de atasco. Esta probabilidad depende esencialmente del tamaño de la salida del embudo, pero al mismo tiempo del ángulo que forman sus paredes. Todo esto lo conocen bastante bien los productores agrícolas. Lo que no es tan conocido es que la forma del “arco tapón” que obstruye la salida puede describirse con un modelo estadístico muy simple. De hecho, la línea quebrada que une los centros de los discos del “arco tapón” sigue un camino aleatorio con restricciones. Esto es, un camino azaroso tal que la concavidad y extensión del arco le permitan ser estable y al mismo tiempo tapar la salida.

El problema de estudiar la formación de arcos en un sistema tridimensional es mucho más complejo. Para empezar, no es posible ver claramente estos arcos con sólo fotografiarlos a la salida de un embudo ya que es difícil determinar qué granos están en contacto. Es aquí donde las simulaciones por computadora pueden prestar una gran ayuda. El autor de este artículo, en colaboración con el doctor Gary Barker del Institute of Food Research (Norwich, Inglaterra) y la profesora Anita Mehta, del S. N. Bose National Centre (Calcuta, India), obtuvo la primera evidencia en simulación por computadora de la forma y característica de los arcos que se forman en el interior de un silo lleno de granos. La simulación corresponde a un conjunto de 2200 esferas (los granos más simples imaginables) que son depositadas en un recipiente y reacomodadas mediante sacudidas verticales. En la figura pueden verse arcos de distintos tamaños donde se han borrado todas las esferas que los rodean para descubrirlos en el interior del recipiente virtual. Cada esfera en el

recipiente es soportada por otras tres. Las esferas claras son “mutuamente estables” y corresponden a los granos que forman el arco en sí. De manera similar a lo que sucede con los ladrillos de un dintel, cada esfera clara sostiene al menos otra esfera clara y es, a su vez, sostenida por ella. Las esferas oscuras en cambio, son granos “independientemente estables” sostenidos por otras esferas que han sido borradas de la figura para mayor claridad. Esto es, las esferas oscuras sostienen al “arco claro”, como las paredes laterales de una puerta sostienen un dintel, pero no son sostenidas por ninguna esfera del arco. En otras palabras, si eliminamos una esfera clara, todas las esferas claras se derrumbarían mientras que las esferas oscuras permanecerían en su lugar.

Lo sorprendente de este estudio es que la gran mayoría de los arcos tiene forma de gusano. El arco es una especie de cadena de esferas sostenida por patas a los lados.

Gracias a estas simulaciones sería posible estimar la probabilidad de atasco de una boquilla y la propagación de fuerzas hacia las paredes de un recipiente. De este modo se presentan nuevas herramientas para el diseño de silos y dosificadores de materiales granulares. Por ejemplo, se podría calcular la presión que el cereal ejerce sobre las paredes de un silo a partir de la estructura simulada por computadora de los arcos que forman sus granos. De este modo se construirían silos con paredes muy delgadas, para ahorrar materiales, pero suficientemente fuertes para soportar la presión a la que estarían sometidos.

Como vemos, el azar puede construir arcos. De hecho los construye, y su estilo arquitectónico es muy peculiar. ■