

DISMINUCIÓN DE LA PROBABILIDAD DE ATASCOS POR LA PRESENCIA DE UN OBSTÁCULO CERCA DE LA SALIDA

Celia Lozano, Álvaro Janda, Diego Maza, Angel Garcimartín, Iker Zuriguel

Los medios granulados –materia inerte compuesta por sólidos divididos– al pasar por una abertura que sea sólo un poco mayor al tamaño de las partículas se pueden atascar. Se ha estudiado como disminuye la probabilidad de que este sistema se atasque gracias a la colocación de un obstáculo delante de la salida. El resultado obtenido demuestra que se disminuye la probabilidad de atasco dependiendo dónde esté colocado el obstáculo, siendo una posición óptima donde la distancia entre el obstáculo y la salida es similar al tamaño de la abertura. Estos resultados pueden ser interesantes para el diseño óptimo de una salida de evacuación.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad no está definido cuál es el diseño óptimo de una salida de emergencia. Éstas son particularmente importantes en lugares que van a albergar a un gran número de personas como estadios deportivos, aeropuertos o recintos donde se celebren conciertos. En los últimos 100 años, las estampidas humanas han causado alrededor de 4.000 fallecimientos y un número de heridos graves 10 veces mayor¹. Por todo ello un gran número de investigadores se han dedicado recientemente a realizar estudios para conocer mejor la dinámica de estos procesos y encontrar un diseño que evite estas trágicas situaciones. Debido a que los estudios sistemáticos de evacuación de humanos en situación de pánico no son aconsejables por razones de seguridad, a menudo se recurre a realizar simulaciones con animales o a realizar aproximaciones mediante simulaciones con ordenador. Saloma *et al.*² estudiaron el comportamiento de ratas en estado de pánico evaluando el número de individuos evacuados en función del tamaño de la salida. También se han realizado simulaciones con ordenador de la dinámica de estampidas humanas³ donde algunos trabajos han puesto en evidencia la importancia de la presencia de un obstáculo delante de la salida⁴. En todos estos trabajos se introducen conceptos importantes como el de “*faster is slower*” –cuanto más rápido se trate de escapar, más lento se saldrá– y “*clever is not always better*” –tomar atajos con el fin de llegar lo antes posible a la salida, no es siempre la mejor opción. De hecho, los viandantes suelen preferir ir a través de una multitud si es el camino más corto, en lugar de tomar una ruta más larga pero menos concurrida. Nirajan *et al.*^{5,6} estudian como varía el tiempo de evacuación de hormigas en pánico en presencia o ausencia de un obstáculo antes de la salida. La presencia de la columna reduce en promedio un 41% el tiempo de evacuación en comparación con el caso sin obstáculo. En Japón se realizó un experimento con seres humanos en ausencia de pánico⁷, en el que se medía como era el flujo de las personas (número de personas por unidad de tiempo) al salir de una habitación por una puerta. Se estudiaron tres situaciones distintas: (a) la gente salía en fila india, (b) en condiciones normales y (c) se colocaba un obstáculo delante de la salida. Resulta interesante que el mejor flujo se obtiene cuando las personas van una detrás de otra de modo que se evitan conflictos (colisiones de personas). Por la misma razón se sugiere que flujo mejora con la presencia del obstáculo respecto al caso sin obstáculo. Todos estos estudios son preliminares, ya que el número de experimentos es escaso y las hipótesis empleadas no

están completamente corroboradas. Además, como se ha explicado anteriormente, resulta muy complicado realizar experimentos en situaciones reales de pánico.

Hagamos notar que los seres vivos no son los únicos que se pueden atascar al pasar por un estrechamiento. Un ejemplo cotidiano de esto es el *salero*, donde los granos de sal se atascan a pesar de que son más pequeños que el orificio de salida. Para romper este atasco lo agitamos. La materia inerte compuesta por un conjunto de sólidos divididos –como la sal, el azúcar o las rocas– es lo que se denomina *medio granular*. Una de las principales características de los medios granulados es su propensión a atascarse cuando el tamaño de la abertura por donde pasan las partículas es sólo un poco mayor al de éstas. En el Laboratorio de Medios Granulares de la Universidad de Navarra se utiliza la materia inerte, prestando especial atención a los atascos que se producen en silos. Con el objetivo de encontrar algo que disminuya la formación de atascos, hemos decidido estudiar cómo afecta la presencia de un obstáculo delante de la salida. En un artículo reciente⁸, hemos demostrado que la presencia de un obstáculo delante de la salida puede reducir significativamente la posibilidad de que ocurra un atasco dependiendo de la posición del mismo.

SISTEMA EXPERIMENTAL

Se ha evaluado experimentalmente la importancia de la colocación de una columna delante de la salida en un medio granular. El material granular que utilizamos son bolas de acero de 1 mm que fluyen dentro de un silo bidimensional por acción de la gravedad. Esta geometría permite tener acceso visual al movimiento de las partículas en el interior del silo.

El sistema experimental consiste en un silo bidimensional rectangular. Para formar la base, y delimitar el orificio de salida del silo, se utilizan dos galgas biseladas. Esta forma permite que las partículas sólo puedan atascarse por encima del orificio. Como se puede ver en la Figura 1, R es el tamaño del orificio, que se fija en $R=4.20$ mm. El obstáculo es una pieza circular de 10 veces el diámetro de las partículas. A pesar de que se ha visto que el tamaño del obstáculo afecta significativamente a la probabilidad de que se formen atascos⁹, en este trabajo se ha mantenido fijo su tamaño. El parámetro que se ha variado aquí es la distancia desde el extremo inferior del obstáculo al orificio de la salida, h .

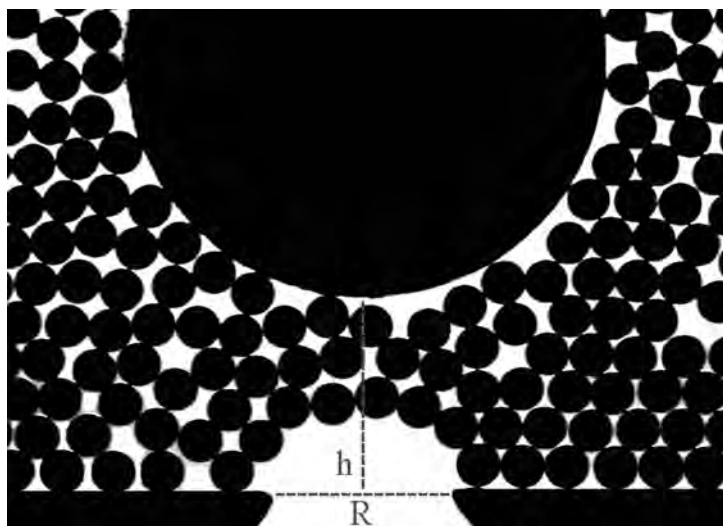


Fig. 1. Una fotografía de un atasco debido a la formación de un arco, indicando R (tamaño del orificio) y h (distancia entre el orificio y el obstáculo).

Las bolas que salen caen en una caja que se encuentra sobre una balanza, así cuantificamos el número de partículas. Como la abertura del orificio es sólo un poco mayor que el tamaño de las partículas, el flujo se interrumpe debido a la formación de un arco, provocando un *atasco*. Cuando se produce un atasco con bolitas, éste es estable y para restablecer el flujo se aplica un chorro de aire comprimido dirigido hacia la abertura de salida que rompe el arco. Sin embargo, los seres vivos cuando se atascan pueden moverse y desatascarse ellos solos. A pesar de ello, resulta de vital importancia la reducción de estos atascos en salidas de emergencia ya que además de ralentizar el flujo de salida pueden provocar producir víctimas.

RESULTADOS

La principal medición que se ha realizado es la cantidad de partículas que salen del silo entre dos atascos consecutivos, lo que se denomina *avalancha*. El tamaño de avalancha medio está relacionado con el tamaño del orificio. Sin embargo, al colocar un obstáculo encima del orificio el número de partículas que salen del silo en cada avalancha es mayor, es decir, el sistema se atasca menos.

Uno de los parámetros en los que nos vamos a fijar es la *probabilidad* de atasco, J_N , que se define como la probabilidad de que se produzca un atasco antes de que salgan N partículas. Estudiamos cómo se modifica la probabilidad de que se produzca un atasco dependiendo de la distancia que hay entre el obstáculo y la salida del silo, h , antes de que salgan $N=500$, 1.000 ó 5.000 bolitas (Fig. 2). Fijémonos en la curva de $N=1.000$ bolitas. En el caso de que el obstáculo se encuentre muy lejos la probabilidad de atasco es similar al caso sin obstáculo (representado con la línea de puntos). A medida que disminuye h la probabilidad de atasco comienza a reducirse llegando a ser prácticamente nula en $h=4.20$ mm. No obstante, a partir de esta posición, al acercarse más el obstáculo a la salida, la probabilidad de atasco empieza a aumentar. Esto es debido a que se forman arcos entre el obstáculo y la parte baja del silo (Fig. 3, izquierda). El parámetro que gobierna este fenómeno en esta región no es el tamaño del orificio, sino la distancia entre el obstáculo y la salida. Nótese que este tipo de arcos ya han sido observados previamente en simulaciones con ordenador de flujos de personas⁴.

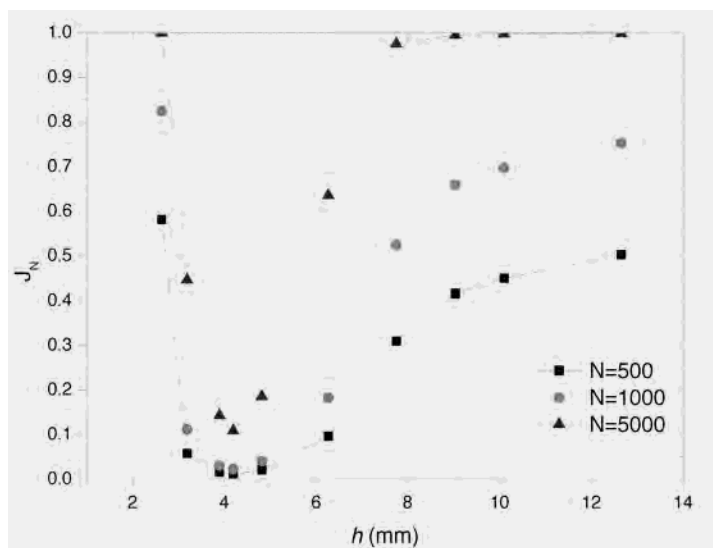


Fig. 2. J_N es la probabilidad de que se produzca un atasco antes de que caigan N granos. Las líneas punteadas indican el valor de J_N cuando $h \rightarrow \infty$ para $N=500$, 1.000 y 5.000.

Este resultado es similar en las demás curvas. Hay que tener en cuenta que a medida que aumenta N la probabilidad de que se atasque es mayor, ya que hay más elementos en el sistema. Pero incluso en $N=5.000$ bolitas se observa un mínimo de la probabilidad de atasco cuando h es similar al tamaño del orificio.

Con el fin de intentar encontrar una explicación a esta drástica reducción de la probabilidad de atasco se estudiaron algunas propiedades del medio. Es lógico plantearse que si la presencia del obstáculo favorece que el sistema se atasque menos, esto puede ser debido a que se varía el número de partículas que salen del silo por unidad de tiempo, lo que se denomina flujo q . Por ello, se ha filmado con una cámara rápida el movimiento de las partículas cerca de la salida. Mediante el posterior tratamiento de las imágenes obtenidas se ha medido el flujo.

En la Figura 4, se muestran los valores del flujo promedio, $\langle q \rangle$, medidos en el orificio. Todos los comentarios que vienen a continuación se refieren a posiciones del obstáculo superiores a 4 mm. Los valores que se han obtenido del flujo medio para las diferentes posiciones del obstáculo son prácticamente iguales a los de un silo sin obstáculo. Incluso para algunas posiciones del obstáculo el flujo mejora ligeramente. En resumen, podemos concluir que el flujo no se ve modificado significativamente por la presencia de un obstáculo y por ello la causa de la reducción del número de atascos debe ser otra.

Comparando la dinámica de las partículas en un silo sin obstáculo y otro con él, se ha visto que cuando se introduce el obstáculo hay partículas que se mueven hacia arriba (Fig. 5), es decir en contra de la dirección de descarga. Una analogía al paso de la gente por una puerta, sería el hecho de que por educación nos echamos para atrás para que otro pase. Estos movimientos son posibles gracias a que la presencia del obstáculo permite que haya un hueco libre donde las partículas pueden moverse libremente.

CONCLUSIÓN

El resultado más relevante de este trabajo es que poner un obstáculo enfrente de la salida disminuye la probabilidad de que el sistema se atasque, siendo la posición con menor probabilidad

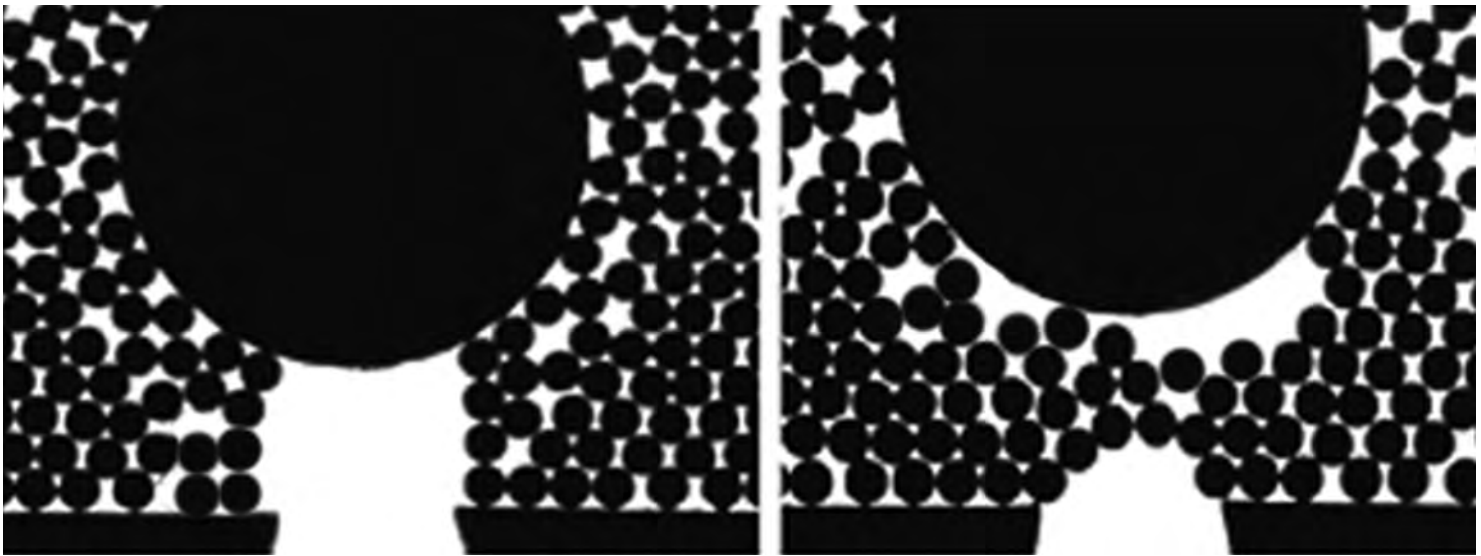


Fig. 3. Fotografías de los dos tipos de arcos que se han obtenido durante el experimento: arcos formados entre el obstáculo y la base del silo (izquierda) y arcos formados encima del orificio (derecha).

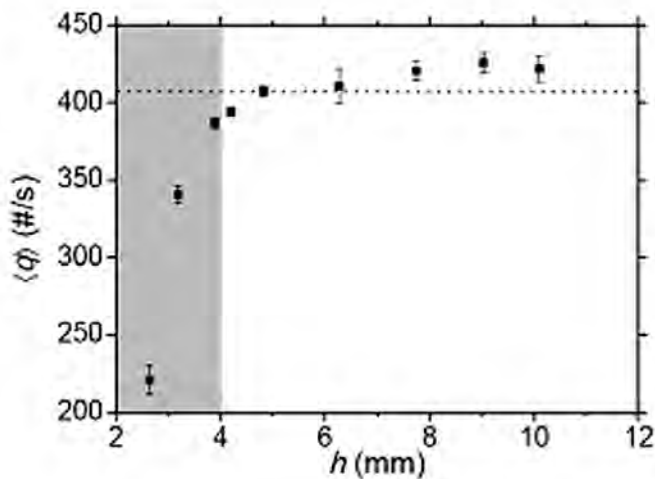


Fig. 4. Flujo medio $\langle q \rangle$ para diferentes alturas del obstáculo (h). La región $h < 4$ mm está sombreada ya que la dinámica es diferente como consecuencia de las interrupciones parciales de flujo por los atascos laterales. La recta de trazos indica el valor de $\langle q \rangle$ cuando $h \rightarrow \infty$.

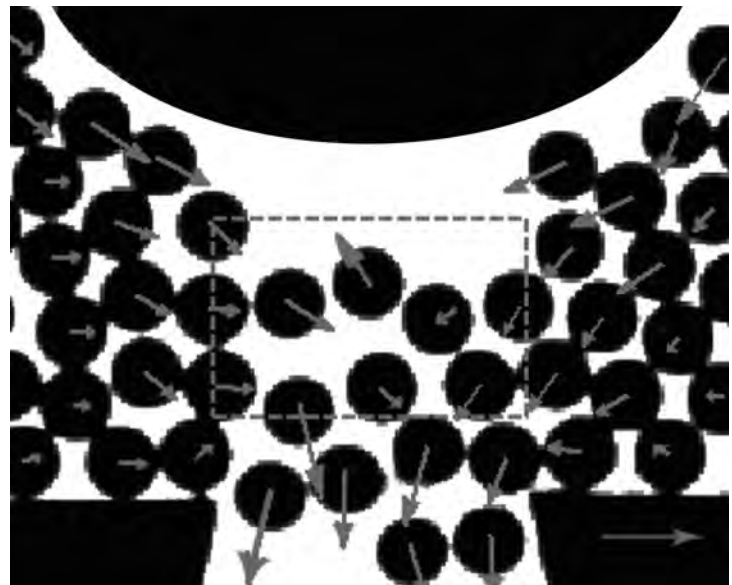


Fig. 5. Fotografía de las partículas fluyendo a través del silo con un obstáculo situado a $h=4.20$ mm. Los vectores de velocidad se representan con flechas grises. En la parte superior del recuadro se ve una partícula que se mueve verticalmente hacia arriba. En la base derecha del silo se indica la escala que corresponde a 100 mm/s.

cuando el obstáculo se encuentra a una distancia similar a la del tamaño de la salida. Este efecto no se observa si el obstáculo está muy lejos del orificio, siendo similar a una situación sin obstáculo. Por otro lado, si el obstáculo está demasiado cerca del orificio la probabilidad de atasco aumenta de nuevo porque se forman arcos entre el obstáculo y el orificio. Con el fin de buscar una explicación a la drástica reducción de la probabilidad de atasco, se han estudiado algunas propiedades del medio granular en las inmediaciones del orificio, como el flujo. Sin embargo, no encontramos que este parámetro explique el cambio en la probabilidad de atasco.

Ya que las bolitas pueden desplazarse con mayor libertad cuando hay un obstáculo (Fig. 5) e inspirados en los estudios de Helbing *et al*³, proponemos que el mecanismo que puede prevenir la formación de atascos puede ser que la presencia del obstáculo reduzca la presión en la región de la formación del arco.

Señalamos de nuevo que no se puede establecer un paralelismo total entre los medios granulares que nosotros estudiamos y los seres vivos. Por tanto no podemos extrapolar directamente estos resultados a seres vivos. Sin embargo, todo hace pensar que, con los ajustes y modificaciones necesarios, esta idea podría utilizarse para el diseño de salidas de evacuación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Dirk Helbing, Lubos Buzna, Anders Johansson, Torsten Werner, "Self-Organized Pedestrian Crowd Dynamics: Experiments, Simulations, and Design Solutions", *Transportation Science*, 2005, vol. 39, n. 1, pp. 1-24.
2. Caesar Saloma, Gay Jane Perez, Giovanni Tapang, May Lim, Cynthia Palmes-Saloma, "Self-organized queuing and scale-free behavior in real escape panic", *PNAS*, 2003, vol. 100, n. 21, pp. 11947-11952.
3. Dirk Helbing, Illés Farkas, Tamás Vicsek, "Simulating dynamical features of escape panic", *NATURE*, 2000, vol. 407, pp. 487-490.
4. G.A. Frank, C.O. Dorso, "Room evacuation in the presence of an obstacle", *Physica A*, 2011, 390, pp. 2135-2145.
5. N. Shiwakoti, M. Sarvi, G. Rose, M. Burd, "Enhancing the Safety of Pedestrians During Emergency Egress", *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2009, 2137, pp. 31-37.
6. M. Burd, N. Shiwakoti, M. Sarvi, G. Rose, "Nest Architecture and Traffic Flow: large potential effects from small structural features", *Ecological Entomology*, 2010, 35, pp. 464-468.
7. D. Yanagisawa, A. Kimura, A. Tomoeda, R. Nishi, Y. Suma, K. Ohtsuka, K. Nishinari. "Introduction of Frictional and Turning friction for Pedestrian Outflow with an Obstacle", *Physical Review E*, 2009, 80, p. 036110.
8. I. Zuriguel, A. Janda, A. Garcimartín, C. Lozano, R. Arévalo, D. Maza, "Silo Clogging Reduction by the Presence of an Obstacle", *Physical Review Letters*, 2011, 107, p. 278001.
9. C. Lozano, A. Janda, A. Garcimartín, D. Maza I., Zuriguel, "Flow and Clogging in a Silo with an Obstacle above the Orifice", *Physical Review E*, 2012, 86, p. 031306.

Celia Lozano Grijalba, Licenciada en Ciencias Químicas en UNAV (2010), en la actualidad está realizando el doctorado en el Departamento de Física y Matemática Aplicada en el Laboratorio de Medios Granulares. Está trabajando en distintos proyectos: estudiar como se disminuye la formación de atascos en un medio granular debido a la presencia de un obstáculo antes de la salida; comprobar de que depende estabilidad de los arcos que se forman en un medio granular. Además, trabaja junto al equipo de la Unidad del Sueño (CUN) estudiando el movimiento durante la noche en pacientes con algún trastorno del sueño. En sus dos años de realización de la tesis ha publicado dos artículos en una de las revistas más importantes de física, *Physical Review Letters*, y otro artículo en una revista del primer cuartil, *Physical Review E*.

Álvaro Janda Galán, Doctor en Física por la Universidad de Navarra, ha trabajado en diversos proyectos de investigación básica y aplicada sobre el comportamiento de Medios Granulares. Ha publicado diversos estudios en revistas científicas de prestigio internacional sobre el flujo de partículas y aparición de atascos en estrechamientos. Actualmente es investigador postdoctoral en la Universidad de Navarra

Diego Maza Ozcoidi, Lic. en Física por la UNSL (Argentina, 1992), doctor en ciencias (UNAV, 1995). Imparte docencia en la Facultad de Farmacia y la Facultad de Ciencias de la UNAV. Ha trabajado en diversos proyectos de investigación relacionados con la formación de estructuras espaciales, dinámica no lineal y medios granulares entre otros. Dirige también varios proyectos aplicados a la industria. Actualmente es Director del Instituto de Física de la Universidad de Navarra.

Angel Garcimartín Montero, Físico graduado en la Universidad de Barcelona. Profesor titular de Física de la Materia Condensada. Director del Departamento de Física y Matemática Aplicada (Facultad de Ciencias). Imparte Física II y Cálculo Numérico en el grado en Química. Ha investigado sobre la fractura de materiales frágiles, las transiciones de fase y los sistemas caóticos. Su interés actual son los medios granulares, y en particular las estructuras que se forman cuando fluyen, como los arcos y los atascos.

Iker Zuriguel Ballaz, Licenciado en Químicas (2000) y Doctor en Física (2005) por la Universidad de Navarra. Durante el doctorado realizó una estancia de 6 meses en la Universidad de Burdeos (Francia). Posteriormente, realizó una estancia Postdoctoral de 18 meses en la Universidad de Manchester (UK). En el curso 2006/2007 se incorporó al Departamento de Física como Profesor Ayudante. En 2010 fue acreditado por la ANECA como Profesor Titular. Hasta el curso 2011/2012 impartió la asignatura de Matemáticas en la ETSA. En la actualidad imparte la asignatura de Física 1 en el Grado de Química.

