
**ESTUDIO EXPERIMENTAL DE EMISIONES ACÚSTICAS
PRECEDENTES A AVALANCHAS GRANULARES**

Vincent Gibiat y Eric Plaza

RESUMEN

Las avalanchas en los medios granulares son principalmente caracterizadas por la observación y medida de los ángulos principales correspondientes a los primeros movimientos de un grupo de granos y seguido al movimiento total de gran parte de los granos. Esta característica no da información sobre los reordenamientos de los granos dentro de los estratos del medio granular. Como cualquier movimiento granular produce una deformación de la estructura, es de esperarse un sonido que se propagará en el medio. Este trabajo presenta un estu-

dio acústico experimental de las señales producidas por avalanchas granulares de esferas de vidrio. Las emisiones producidas por el movimiento del material son registradas a través de dos transductores piezoeléctricos localizados en la parte baja del estrato del material. Los resultados permitieron obtener información sobre los intervalos de ocurrencia para los precursores de avalanchas, reordenamientos y ángulo principal de avalancha bajo una nueva metodología.

Introducción

El principal interés del estudio de las avalanchas granulares está orientado hacia el entendimiento del fenómeno para una posterior prevención de desastres naturales. En Venezuela, las avalanchas producto del deslave de una montaña en el estado Vargas en 1999 cobraron más de 10000 vidas humanas. Adicionalmente, en los países donde anualmente se registran nevadas, las ava-

lanchas de nieve cobran la vida de decenas de personas, colocando al problema de prevención en un lugar importante para la sociedad. Diversos autores han estudiado las avalanchas granulares desde el punto de vista experimental, utilizando la técnica de caracterización a través de imágenes, ya sea en cajas que cambian su inclinación para inducir las avalanchas (Bretz *et al.*, 1992; Daerr y Douady, 1999; Durán, 2003; Nerone *et al.*,

2003; Aguirre *et al.*, 2006; Scheller *et al.*, 2006) o en tambores rotativos (Jaeger *et al.*, 1989, 1996; Tegzes *et al.*, 2003; Dorbolo, 2005; Fischer *et al.*, 2008). Sin embargo, hasta donde conocemos solo los trabajos de Zaitsev *et al.* (2008) y de Enrique *et al.* (1997) han utilizado una metodología acústica para la caracterización del fenómeno. Los trabajos experimentales de Nerone *et al.* (2003) y de Nagel (1992) definen una avalancha

como un fenómeno que presenta características de un sistema en equilibrio cercano a una transición de fase de primer orden. Cuando una avalancha es desencadenada en un medio granular por la inclinación de la pila (respecto a la horizontal) hasta el borde de inestabilidad, la superficie libre de la pila define un ángulo crítico, habitualmente llamado máximo ángulo de estabilidad (θ_m). Durante el deslizamiento del material decrece la inclina-

PALABRAS CLAVE / Avalanchas / Emisiones acústicas / Medios Granulares /

Recibido: 09/10/2009. Modificado: 29/09/2010. Aceptado: 06/10/2010.

Vincent Gibiat. Doctorado en Ciencias Físicas, Université de Maine, Francia. Doctorado de Ingeniería en Acústica Aplicada. Profesor y Director del Laborato-

rio PHASE, Université Paul Sabatier, Francia. e-mail: gibiat@cict.fr
Eric Plaza. Licenciado en Física, Universidad del Zulia, Venezue-

la. Investigador, Fundación Instituto Zuliano de Investigaciones Tecnológicas (INZIT), Venezuela. Dirección: Km 15 Carretera vía La Cañada, Sector Palmare-

jo Viejo. Edificio INZIT. La Cañada de Urdaneta, Edo Zulia, Venezuela. Código Postal 4001. e-mail: eplaza@inzit.gob.ve

EXPERIMENTAL STUDY OF ACOUSTIC EMISSIONS PRECEEDING GRANULAR AVALANCHES

Vincent Gibiat and Eric Plaza

SUMMARY

Avalanches of granular media are mainly characterized by the observation and measurement of the main angles corresponding to the initial the movement of a group beads, followed by the bulk movement of a large part of the grains. These characteristics do not give any information about the rearrangements of the grains within the layers of granular beads. As any movement of a grain produces a deformation of the structure, a sound that prop-

agates in the granular medium is to be expected. This work presents an acoustical experimental study of the precursor sounds in avalanches of spherical granular glass beads. The acoustic emissions were recorded with two piezoelectric transducers placed on the lower part of the layer of beads. The results provide information about the avalanche precursor's occurrence interval, rearrangements and trigger angle with a new methodology.

ESTUDO EXPERIMENTAL DE EMISSÕES ACÚSTICAS PRECEDENTES A AVALANCHES GRANULARES

Vincent Gibiat e Eric Plaza

RESUMO

As avalanches nos meios granulares são principalmente caracterizadas pela observação e medida dos ângulos principais correspondentes aos primeiros movimentos de um grupo de grãos e seguido ao movimento total de grande parte dos grãos. Esta característica não dá informação sobre os reordenamentos dos grãos dentro dos estratos do meio granular. Como qualquer movimento granular produz uma deformação da estrutura, é de se esperar um som que se propagará no meio. Este trabalho

apresenta um estudo acústico experimental dos sinais produzidos por avalanches granulares de esferas de vidro. As emissões produzidas pelo movimento do material são registradas através de dois transdutores piezoelétricos localizados na parte baixa do estrato do material. Os resultados permitiram obter informação sobre os intervalos de ocorrência para as avalanches, reordenamentos e ângulo principal de avalanche sob uma nova metodologia.

ción de la superficie libre, y en este punto la superficie libre define un segundo ángulo crítico llamado ángulo de reposo (θ_r). Así, una avalancha ocurre cuando el ángulo crítico del material apilado es pasado por su propia inclinación y la pila, "tratando de organizarse a sí misma" desliza material para conservar el ángulo de reposo θ_r . Según Jaeger *et al.* (1989) mientras el empaquetamiento es inclinado se pueden observar pequeños reordenamientos para ángulos anteriores a θ_m . Durante este proceso de reordenamiento se han identificado otros fenómenos descritos por los trabajos de Nerone *et al.* (2003), Aguirre *et al.* (2006), Scheller *et al.* (2006) y Zaitsev *et al.* (2008). Algunos de estos eventos pueden ser interpretados como precursores de avalanchas por ocurrir en posiciones angulares distintas a intervalos angulares regulares durante el proceso de avalancha, abriendo así la posibilidad de predecir las mismas.

En este sentido, Nerone *et al.* (2003) estudian las avalan-

chas en un montaje en miniatura a través de un sistema óptico que graba imágenes de esferas de vidrio moviéndose dentro de una caja transparente, al hacer cambiar el ángulo de inclinación. El sistema cuenta el número de esferas en movimiento cuando se cambia el ángulo de inclinación de la caja en un eje, grabando e identificando precursores. Este trabajo define los eventos que ocurren durante una avalancha como a) Pequeños reordenamientos: eventos que forman pequeños conglomerados de esferas localizados dondequiera sobre la superficie libre de la pila; cuando los pequeños reordenamientos comienzan, las esferas se mueven hacia lugares cercanos, desestabilizando a otras esferas y creciendo el número de esferas desestabilizadas en los sucesivos pasos. Estos eventos ocurren sobre toda la superficie de la pila. b) Precursores: eventos que implican al 7% de todas las esferas en la superficie. Es notorio que las esferas implicadas en el movi-

miento se distribuyen uniformemente sobre la superficie libre debido a que los precursores no son eventos localizados. Para este caso, todas las esferas se mueven en un intervalo angular corto; ocurren para ángulos $\theta > 17^\circ$ en posiciones angulares diferentes con una separación angular de intervalos de $\theta > 1,8^\circ$. c) Avalanchas: eventos que comienzan como pequeñas perturbaciones en la superficie libre de la pila con un rápido aumento del número de esferas en movimiento, propagándose en algunos estratos de la pila. Las avalanchas comienzan en $\theta = 27^\circ$. En dicho trabajo las características experimentales permiten solo la observación del movimiento de la parte superficial de la pila, suponiendo a través de argumentos basados en el estudio de diferentes números de estratos que el interior del material granular se comporta de la misma manera.

Por otro lado, Zaitsev *et al.* (2008) estudian los pequeños reordenamientos mediante una

metodología de acústica no lineal sensible al estado de debilidad inter-contacto entre los granos. Para este experimento se emitió una señal a través de un transductor acústico. La señal viajó a través de la pila de esferas en el proceso de movimiento de la caja, para obtener las señales resultantes con la información del sistema mezclado. Las medidas fueron tratadas numéricamente para separar las señales provenientes de las esferas y del ruido de fondo. Bajo esta metodología se obtuvieron señales de los pequeños reordenamientos e información del estado de contacto débil de las esferas. El trabajo de Zaitsev *et al.* (2008) muestra las señales de los reordenamientos, pero no da información de los fenómenos de mayor amplitud como los precursores y las mismas avalanchas.

El presente trabajo propone una metodología distinta a la de Nerone *et al.* (2003) y Zaitsev *et al.* (2008), al utilizar un sistema acústico que

permite obtener información de todos los movimientos dentro del material granular de manera más simple. Para esto se diseñó un mecanismo formado por una caja transparente que contiene el material granular; en la cara inferior de dicha caja, 2 transductores hacen el registro de la señal proveniente del movimiento mismo del material. Los transductores fueron colocados en el fondo de la caja para estar en contacto directo con las esferas y recibir la mayor cantidad de señal proveniente del movimiento de las mismas. Para inducir las avalanchas se cambia suavemente el ángulo de inclinación de la caja respecto a la horizontal. Así, cualquier variación mecánica o reordenamiento en las condiciones iniciales impondrá perturbaciones y estas perturbaciones poseerán una firma acústica que puede ser detectada.

Esta metodología permite estudiar la dinámica de las pre-avalanchas en un medio granular encerrado en una caja. El estudio se centró en el comportamiento de los eventos que preceden a las avalanchas y en condiciones de bajo ruido de fondo, para obtener información del movimiento interno de las esferas y no solo del movimiento superficial. Se realizó adicionalmente el análisis de frecuencias de las señales. El montaje permitió obtener información estadística de los reordenamientos, determinación de ángulo de comienzo de precursores, espaciado angular para los precursores, y la determinación de ángulo de grandes avalanchas.

Montaje Experimental

Los experimentos se realizaron con esferas de vidrio de $3 \pm 0,1\text{mm}$ de diámetro. La señal obtenida es producida por el contacto y fricción entre las esferas de vidrio que se mueven dentro del material. El estudio se realiza en condiciones de medición que eviten el ruido externo y el producido por el movimiento

mecánico del montaje. Para ello se colocó el sistema sobre pequeñas bases de espuma, con el objeto de minimizar la transferencia de perturbaciones del edificio al montaje. Los experimentos se llevaron a cabo en horas de la noche para evitar el ruido de vehículos

en las proximidades del edificio. El ensamblaje está constituido por una caja plástica transparente de 4cm de profundidad, 40cm de largo y 40cm de ancho (Figura 1). La caja cambia su inclinación respecto a la horizontal usando un mecanismo mecánico articulado en su parte superior; la parte inferior es móvil, permitiendo la rotación de toda la caja sobre este eje. La rotación del montaje es controlada a través del desinflado de un balón plástico. El balón toca la caja a través de la punta de una vara metálica para establecer un punto de contacto fijo. Este mecanismo fue diseñado para minimizar el ruido que pudiera producir el contacto del balón con otra superficie u otra perturbación mecánica. Así, cuando el balón deja salir el aire a través de la válvula, la caja gira suavemente, producto del cambio de altura del balón. La posición y la velocidad pueden ser controladas a través de la regulación de la cantidad de aire que sale a través de la válvula. La caja es suavemente inclinada para evitar perturbaciones del ruido producido por el propio sistema hasta el límite de estabilidad en el que la avalancha se desencadena. El sistema permite un rango de variación angular entre 14° y 40° . La altura de los estratos de material fue de 3cm, que corresponden a ~ 10 estratos de esferas. Esto se eligió debido a que las avalanchas ocurren predominantemente en los estratos superiores del material (Nerone *et al.* 2003). La toma de datos se

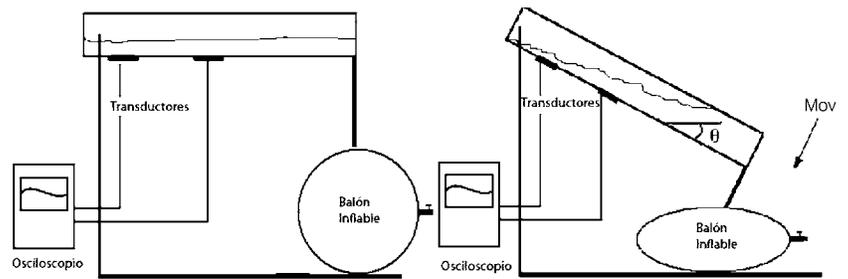


Figura 1. Esquema del experimento de avalanchas granulares. El ángulo θ de la caja varía suavemente cuando el balón es desinflado. El balón toca la caja a través de una barra de metal para evitar el ruido mecánico producido por el contacto entre la caja y el balón. La velocidad de descenso es controlada a través de la válvula de salida del aire.

realizó midiendo el ángulo de inicio y el ángulo final de la caja respecto a la horizontal y el tiempo de movimiento por ese intervalo angular. Se correlacionó el tiempo de duración de cada experimento y el intervalo total de desplazamiento angular, para tener la información de la posición angular en cada instante de tiempo. Se realizaron diez experimentos, cada uno bajo las mismas condiciones.

En la cara inferior de la caja, dos transductores piezoeléctricos de celdas resonantes (frecuencia de resonancia en $\sim 3\text{kHz}$) hacen la adquisición, uno ubicado en la parte superior y otro en la parte media. Las señales de ambos transductores fueron grabadas a través de un osciloscopio de precisión de 12Bits en un tiempo de adquisición de 200seg. Debido a que los fenómenos a observar se encuentran en un dominio de frecuencias relativamente bajo ($0\text{-}300\text{Hz}$) se asumió una fre-

cuencia de adquisición de 1KHz . En este caso se despreció la contribución de la humedad ($\sim 70\%$ en el recinto del laboratorio) al movimiento de las esferas, por ser suficientemente grandes y pesadas para que las fuerzas de cohesión producto de la humedad no afecten el comportamiento de las avalanchas.

Resultados

El gráfico de la Figura 2 representa la medida del ruido de fondo en el sistema experimental. La señal proviene de las perturbaciones mecánicas y ambientales del movimiento de la caja sin material. Las señales obtenidas para el sistema sin material se ubicaron alrededor de $0,0007\text{mV}$ (pico-pico), mientras que las señales más pequeñas obtenidas para los reordenamientos en los experimentos con material presentaron una amplitud $>0,001\text{mV}$ (p-p), dejando el error experimental en aproxi-

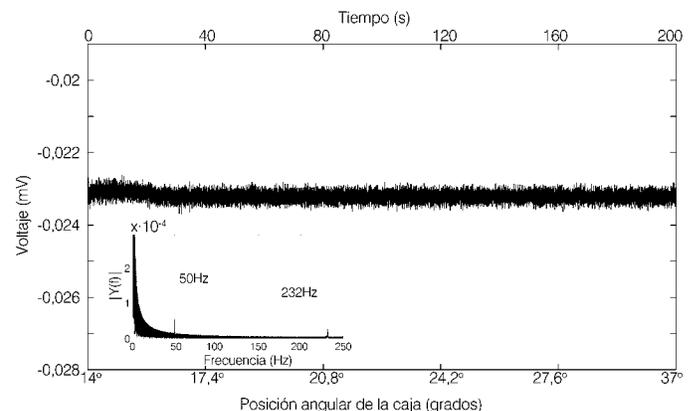


Figura 2. Sistema experimental descendiendo sin material. Transductor ubicado en la cara inferior de la caja (ubicación media). Frecuencia de muestreo 500Hz (10K puntos de adquisición en 200seg) y su FFT.

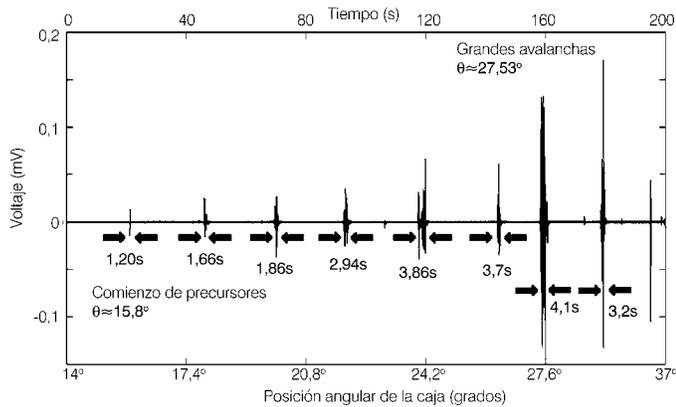


Figura 3. Gráfica de las señales producidas por esferas de vidrio de 3mm. Transductor ubicado en la cara inferior de la caja (ubicación superior). Frecuencia de muestreo 1KHz (200K puntos de adquisición en 200seg).

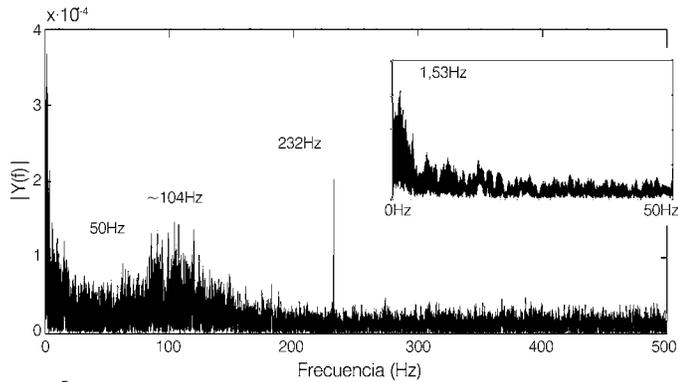


Figura 5. Espectro de frecuencias obtenido a través de la Transformada de Fourier de la señal ubicada en la Figura 4. Transductor ubicado en la cara inferior de la caja (ubicación media). La gráfica pequeña representa una ampliación en la escala en el intervalo 0-50Hz.

madamente un orden de magnitud entre las medidas con material y sin material. En la gráfica para la FFT (*fast Fourier transform*) se observan dos frecuencias específicas centradas en 50 y 232Hz. Estas frecuencias están presentes en todos los experimentos realizados y corresponden a interferencias del tendido eléctrico sobre el osciloscopio con el cual se midieron las señales (50Hz) y al ruido producido por el aire al salir por la válvula del balón (232Hz).

En las Figuras 3 y 4 se muestran las señales obtenidas en el transductor localizado en la parte superior y en el localizado en la parte media de la caja plástica, respectivamente. Las señales observadas corresponden al movimiento de las esferas de vidrio dentro de la caja. La amplitud de la señal está asociada a la cantidad de

esferas que se mueven; si más esferas se mueven simultáneamente se producirá una señal de mayor amplitud, con un incremento en la duración de la misma. Esto es claramente observable en la Figura 3, donde se aprecia el aumento de la duración de las señales en la medida en que se desarrolla la avalancha. Así, las señales menos intensas y de menor duración son asociadas a los precusores y las de mayor amplitud y mayor duración a las grandes avalanchas. La amplitud de los reordenamientos se ubicó en $\sim 0,0028\text{mV}$, los precusores en

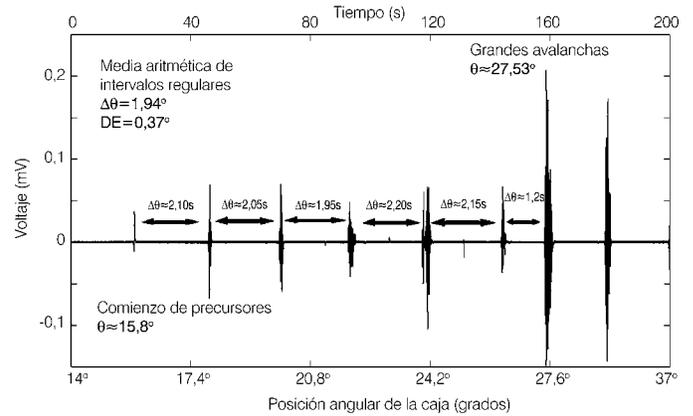


Figura 4. Gráfica de las señales producidas por esferas de vidrio de 3mm. Transductor ubicado en la cara inferior de la caja (ubicación media). Frecuencia de muestreo 1KHz (200K puntos de adquisición en 200seg).

0,04mV y las avalanchas 0,31mV (p-p). Así, el valor de la amplitud de la señal obtenida para las grandes avalanchas es aproximadamente un orden de magnitud superior a la amplitud de los precusores, lo que permite diferenciar cada fenómeno. Las señales obtenidas en cada transductor son representadas en las Figuras 3 y 4, respectivamente. Estas figuras muestran que ambos receptores reciben la misma señal en el mismo intervalo angular, siendo la diferencia del tiempo de viaje de las señales entre uno y otro receptor imperceptible. A través de la información de la Figura 4 es posible calcular la media aritmética de los intervalos angulares producidas por los precusores como $\Delta\theta = 1,94^\circ$. El cálculo de la desviación

estándar (DE) de estos valores proporciona una medida de la dispersión de los datos y de la proximidad en la regularidad entre eventos. Eventos más similares producirán pequeños valores de DE. En este experimento $DE = 0,37^\circ$. Los precusores comienzan para un ángulo de $\theta = 15,8^\circ$ y las grandes avalanchas en $\theta = 27,5^\circ$.

Para los restantes 10 experimentos se presentan la Figura 5 y la Tabla I, con la media aritmética de cada valor del conjunto de experimentos: ángulo de inicio de precusores, ángulo de inicio de grandes avalanchas, número de precusores y media de intervalos de precusores. Estos valores presentan tendencias para el comienzo de los precusores en $\theta = 17,04^\circ$ con $DE = 0,96^\circ$ y para el comienzo de grandes

avalanchas en $\theta = 28,41 \pm 2,10^\circ$. El tamaño de la media para el intervalo de los precusores $\Delta\theta_n = 1,91 \pm 0,57^\circ$. Estos valores están en concordancia con los obtenidos por el trabajo de Nerone *et al.* (2003), donde los valores para el comienzo de precusores se establecieron en $\theta > 17^\circ$, grandes avalanchas en $\theta = 27,3^\circ$ y el intervalo de regularidad de los precusores en $\Delta\theta = 1,8^\circ$. Las pequeñas diferencias son asociadas al hecho que las avalanchas no

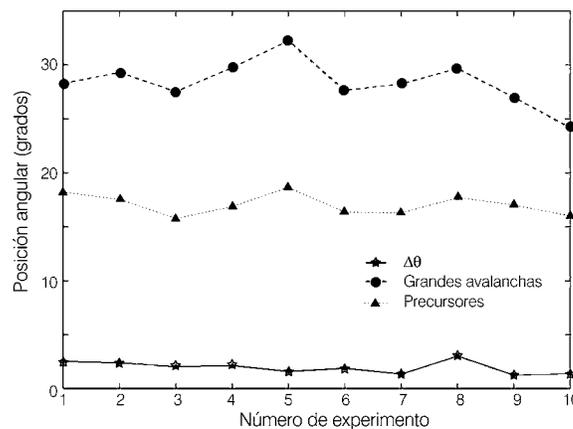


Figura 6. Experimentos en esferas de vidrio y sus resultados. Transductor ubicado en la cara inferior de la caja (ubicación media). 1KHz (200K puntos de adquisición en 200 segundos). Punto de partida de los precusores, Ángulo de avalanchas y valores de $\Delta\theta_n$ para 10 experimentos.

TABLA I
INFORMACIÓN PARA CADA EXPERIMENTO EN ESFERAS DE VIDRIO

Experimento	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Media*	DE
Comienzo de precursores	18,3°	17,5°	15,8°	16,9°	18,6°	16,3°	16,3°	17,7°	17,0°	16,0°	17,04°	0,96°
Grandes avalanchas	28,3°	29,3°	27,5°	29,8°	32,3°	27,7°	28,2°	29,7°	27°	24,3°	28,41°	2,10°
Número de precursores	4	5	5	6	8	6	9	4	8	6	6,10	1,72
$\Delta\bar{\theta}_n$	2,5°	2,3°	2,0°	1,9°	1,6°	1,9°	1,3°	3,0°	1,2°	1,4°	1,91°	0,57°

* Media aritmética. DE: Desviación estándar.

son un fenómeno lineal y entran dentro del intervalo de dispersión calculado.

La transformada de Fourier da información de los eventos repetitivos dentro de la señal. Si imaginamos una esfera bajando en un estrato de esferas fijas, ésta al descender chocará contra las otras que componen el suelo, produciendo un sonido periódico que puede ser registrado como una señal. El periodo estará asociado al tiempo entre colisiones, y la frecuencia de repetición de estos choques sería posible observarla a través de una transformada de Fourier de la señal. Para el presente caso tendremos un gran conjunto de esferas moviéndose al inclinar la caja y el espectro de Fourier dará información de los eventos estadísticos repetitivos dentro del conjunto de esferas en movimiento. En la Figura 5 se muestra la transformada rápida de Fourier (FFT) de la señal presentada en la Figura 4. Se reportan frecuencias centradas en ~1,53 y 104Hz, las cuales tienen un periodo asociado de 0,65 y 0,096seg, respectivamente. Estos periodos son considerados una medida estadística del tiempo de colisión para el conglomerado de esferas cuando la caja cam-

bia su ángulo de inclinación. Las señales corresponden a las definidas por el trabajo de Nerone *et al.* (2003) bajo el sistema óptico como pequeños reordenamientos, mostrando bajo el presente método experimental dos tipos de movimientos: uno asociado a un periodo de tiempo muy corto y otro a un periodo más largo.

Conclusión

El sistema de avalanchas en miniatura de bajo ruido de fondo desarrollado en el presente trabajo permitió estudiar las señales que ocurren al inclinar un contenedor con pequeñas esferas de vidrio hasta pasar el límite de estabilidad, obteniendo información sobre el periodo de colisiones para los reordenamientos granulares, el ángulo de inicio de precursores y el ángulo de desencadenamiento de avalanchas. Se comprobaron los resultados existentes en la literatura utilizando un sistema acústico más sencillo y que provee información más detallada, mostrando los resultados de diez experimentos. Las señales fueron procesadas a través de una FFT para obtener el espectro

de frecuencias, el cual mostró resultados asociados al movimiento del material, no observables a través de técnicas de imagen. Se observaron dos frecuencias, centradas en 1,5 y 104Hz. La primera corresponde a fenómenos con amplitudes relativamente grandes, similares a los intervalos angulares de los precursores, cuyo periodo es ~10seg. En el segundo caso, para los 104Hz, la frecuencia corresponde a la medida estadística del periodo de colisiones para todo el conjunto de esferas en movimiento en los reordenamientos, de ~0,096seg. Finalmente, el sistema demostró ser efectivo para la caracterización del fenómeno de avalanchas en medios granulares, suministrando información de los fenómenos que ocurren durante el proceso y constituyendo un método escalable para el estudio de avalanchas en escenarios reales.

REFERENCIAS

- Aguirre M, Calvo A, Ippolito I, Medus A, Mancuso M (2006) Rearrangements in a two-dimensional packing of disks. *Phys. Rev. E73*: 041307. 8 pp.
- Bretz M, Cunningham J, Kurezynski P, Nori F (1992) Ima-

ging of avalanches in granular materials. *Phys. Rev. Lett.* 69: 2431-2434.

- Daerr A, Douady S (1999) Two types of avalanche behaviour in granular media. *Nature* 399: 241-243.
- Dorbolo S (2005) Stability limit of a granular monolayer. *Eur. Phys. J. E17*: 77-81.
- Durán J (2003) *Sable, Poudres et Grains*. Eyrolles Sciences. París, Francia. pp. 181-185.
- Fischer R, Gondret P, Perrin B, Rabaud M (2008) Dynamics of dry granular avalanches. *Phys. Rev. E78*: 021302.
- Henrique C, Aguirre M, Calvo A, Ippolito I, Bideau D (1997) Experimental acoustic technique in granular flows. *Powder Technol.* 94: 85-89.
- Jaeger H, Liu C, Naguel S (1989) Relaxation at the angle of repose. *Phys. Rev. Lett.* 62: 40-43.
- Jaeger H, Nagel S, Behringer B (1996) Granular solids, liquids, and gases. *Rev. Mod. Phys.* 68: 1259-1273.
- Nagel S (1992) Instabilities in a sand pile. *Rev. Mod. Phys.* 64: 321-325.
- Nerone N, Aguirre M, Calvo A, Bideau D, Ippolito I (2003) Instabilities in slowly driven granular packing. *Phys. Rev. E67*: 011302. 9 pp.
- Scheller T, Huss C, Lumay G, Vandewalle N, Dorbolo S (2006) Precursors to avalanches in a granular monolayer. *Phys. Rev. E74*: 031311. 5 pp.
- Tegzes P, Vicsek T, Schiffer P (2003) Development of correlations in the dynamics of wet granular avalanches. *Phys. Rev. E67*: 051303. 17 pp.
- Zaitsev VYu, Richard P, Delannay R, Tournat V, Gusev V (2008) Pre-avalanche structural rearrangements in the bulk of granular medium: Experimental evidence. *Eur. Phys. Lett.* 83: 64003. 6 pp.