

# **Efecto de la verticalidad de la oscilación sobre la inestabilidad granular en un tubo en U vibrado**

N. Eduartes<sup>1</sup>, M. García Prieto<sup>1</sup>, R.J. Torres<sup>1</sup>, I. Sánchez<sup>2</sup>

*<sup>1</sup>Laboratorio de Materia Condensada, Universidad Simón Bolívar, AP 89000, Caracas  
1080-A, Venezuela*

*<sup>2</sup>Centro de Física, Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas, AP 21827,  
Caracas 1020-A, Venezuela*

## **Resumen:**

Se estudió el comportamiento de un medio granular en un tubo en U sometido a vibraciones verticales. Específicamente, se investigó el efecto de pequeñas componentes horizontales del movimiento oscilatorio en la evolución temporal de la diferencia de altura del nivel de granos en los brazos del tubo en U. El medio granular usado fueron esferas de vidrio con diámetro entre 200 y 250 micras. Se diseñó un sistema de compensación automatizado del centro de masa del sistema de vibración, para introducir oscilaciones laterales pequeñas. La diferencia de altura del nivel de granos en los brazos del tubo en U se ajusta bien por la suma de una exponencial con una línea recta. El coeficiente del término lineal del ajuste, crece con la amplitud la componente horizontal del movimiento

## **Abstract:**

We study the behavior of a granular material contained in a U-tube under vertical oscillations. We studied in detail the effect of small horizontal components of the oscillatory motion on the evolution of the height difference between the level of grains in each branch of the tube. We used glass spheres with diameter between 200 and 250

microns. We built an automated compensation mechanism for the center of mass of the system, in order to introduce small lateral oscillations. The height difference between the level of grains in the branches of the tube is well fitted by an exponential plus a straight line. The linear term's coefficient grows with the amplitude of the horizontal component of the motion.

---

Si se coloca un líquido en un tubo en forma de U con un desnivel inicial entre los lados del tubo, la diferencia de altura tiende a nivelarse debido a la gravedad. Si se coloca un medio granular y se fluidiza por medio de vibraciones verticales, no siempre esta diferencia de altura se nivelará. Para determinados valores de frecuencia, amplitud y tipo de grano, la diferencia de altura tiende a crecer, como se ve en la secuencia de imágenes de la figura 1. Este fenómeno, que se ha llamado “inestabilidad granular en un tubo en U”, ha sido estudiado para el caso vertical por varios autores (Gutman 1976, Akiyama et al 2001, Sánchez et al 2007). En este trabajo se estudió el efecto de una pequeña componente horizontal en el movimiento del recipiente, elemento clave en el desarrollo de los modelos para entender este fenómeno, que hasta los momentos no ha sido entendido en su totalidad. Persiste todavía una discusión entre el papel del aire intersticial, la fricción de las paredes y el efecto fluidizante de la agitación.

El montaje experimental consistió en un sistema de vibración, uno de medición y un sistema de compensación diseñado para controlar la relación entre las amplitudes  $a_x$  y  $a_y$  de las componentes horizontal y vertical de la vibración. Ambas componentes eran señales senoidales de  $(12.0 \pm 0.1)$  Hz de frecuencia. En este trabajo el valor de  $a_y$  se fijó en

( $10.0 \pm 0.2$ ) mm. El sistema de vibración (Fig 2) constó de un generador de funciones, un amplificador de potencia y un vibrador electromagnético sobre el que se fijó el tubo en U con el medio granular y el sistema de compensación.

El sistema de medición consistió en un estroboscopio conectado al generador de funciones, una pantalla blanca y una cámara de video. Antes de iniciar las mediciones, se verificó la verticalidad de la cámara usando un hilo con plomada. El estroboscopio se configuró a la frecuencia de oscilación para definir claramente la superficie del medio granular. El sistema de compensación (Fig 3) consistió en una base con un motor paso a paso que movía un soporte móvil del tubo. Esto permitía desplazar el centro de masa del sistema montado en el oscilador y alinearlo o desalinearlo con el eje de movimiento del vibrador electromagnético. Los videos obtenidos fueron procesados para obtener la diferencia de altura  $\Delta h$  entre los niveles de granos en cada brazo del tubo como función del tiempo. Con un acelerómetro se registraron los valores de  $a_x$  y  $a_y$ .

En la Fig 4 izquierda, se puede observar cómo la dependencia temporal de  $\Delta h$  se puede ajustar por la suma de un término exponencial más una línea recta. El término exponencial puede ser entendido con el modelo de fluidización cíclica propuesto por Sánchez et al 2007. También dentro del marco de pensamiento de ese modelo, el término lineal puede entenderse como relacionado a dos parámetros: la longitud de la parte inferior del tubo y la amplitud de la componente horizontal de la vibración. Sin embargo la dependencia funcional del coeficiente del término lineal (parámetro P4) no se ha determinado ya que es sensible a diversas aproximaciones del modelo. En la parte derecha de la Fig 3 se puede ver como el coeficiente del término lineal crece con la razón  $a_x/a_y$  para un valor fijo de  $a_y$ . En los casos en que  $a_x/a_y$  era cercano a cero, el crecimiento

de  $\Delta h$  ocurría para cualquiera de los dos lados del tubo. Cuando  $a_x/a_y$  era mayor a 0.02 el crecimiento ocurría siempre hacia el mismo lado. En todos los casos el coeficiente de la exponencial (el parámetro P2) se mantuvo igual a  $(2.5 \pm 0.2)s$ . Esta regularidad del coeficiente exponencial concuerda con el resultado de Sánchez et al. 2007, quienes mostraron que ese parámetro es función de la frecuencia y de la amplitud vertical del movimiento. Nuestros resultados muestran que el efecto de variar la componente horizontal de la vibración influye significativamente en el coeficiente del término lineal del ajuste, sin generar variaciones significativas en la dependencia exponencial.

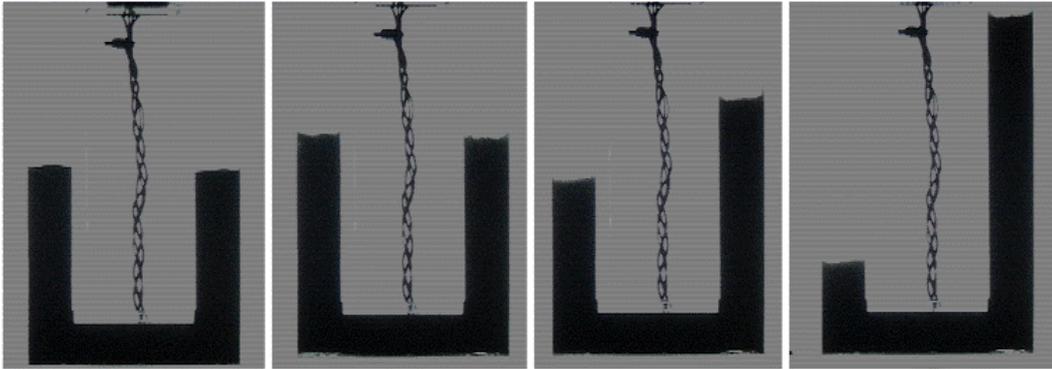
En conclusión se diseñó un sistema para introducir pequeñas componentes horizontales de amplitud controlada en el movimiento de un tubo en U sometido a vibraciones verticales. Se encontró que al variar la amplitud de la componente horizontal el coeficiente del término lineal en los ajustes de la diferencia de altura entre los niveles de granos en los brazos de la U se ve afectado significativamente (su valor crece con la amplitud horizontal) mientras que el coeficiente exponencial se mantiene prácticamente constante. Futuros trabajos se dirigirán a explorar la dependencia del término lineal con el desfase entre las componentes de la oscilación y con la longitud de la parte inferior del tubo en U.

#### Referencias:

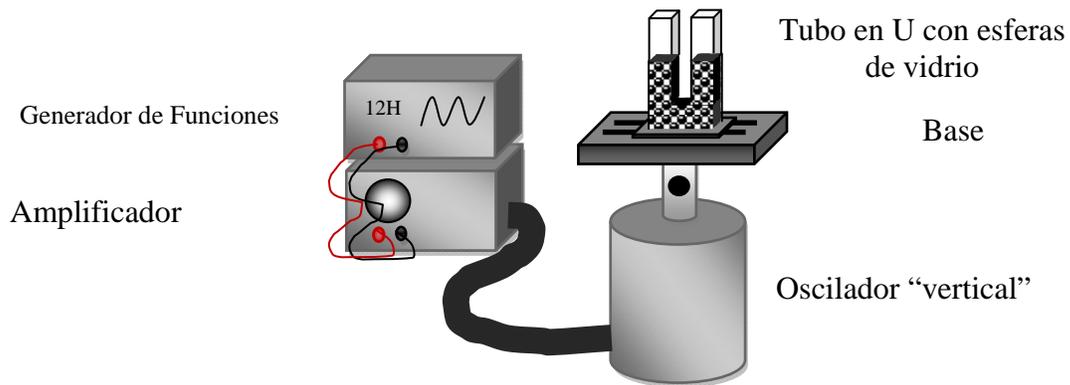
Akiyama T, Shinmura KS, Murakawa S, Aoki KM, (2001) A surface instability of granules under vibration in partitioned containers *Gran. Matt.* 3 177.

Gutman RG, (1976) Vibrated bed of powders I. *Trans. Instn. Chem. Engrs.* 54 174.

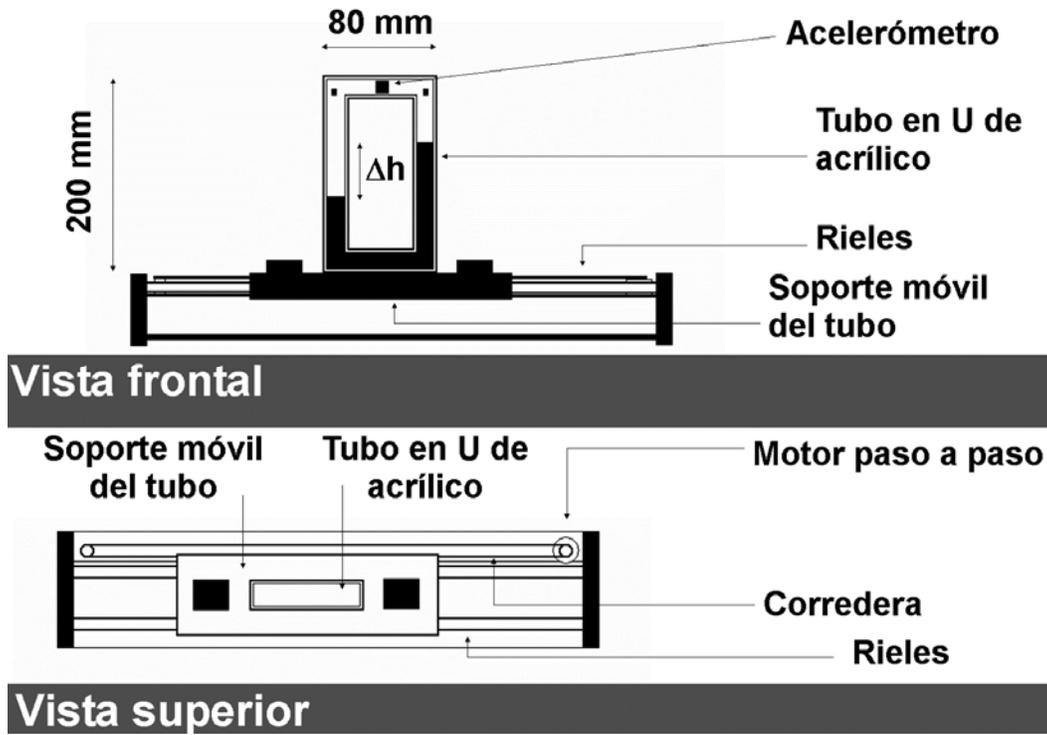
Sánchez I, Darias JR, Paredes R, Ott E, Gutiérrez G, (2007) Vertical granular transport in a vibrated U-tube. *Enviado a los Proceedings del Traffic and Granular Flow 07.*



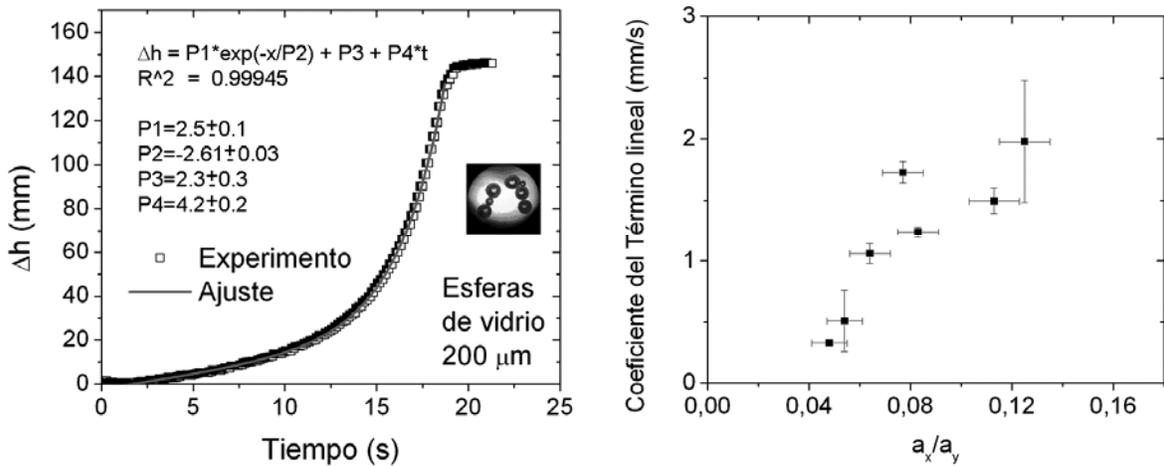
**Figura 1** Secuencia de imágenes de granos en un tubo en U vibrado. A medida que transcurre el tiempo, todos los granos migran hacia un lado del tubo. El cable de la zona central corresponde al acelerómetro.



**Figura 2** Esquema del sistema de vibración.



**Figura 3** Detalle de la base con el sistema de compensación, que se fija sobre el vibrador electromagnético. Un motor y un sistema mecánico permiten mover un soporte móvil de tubo en U. Al hacer esto el centro de masa de la base se puede alinear o desalinear controladamente del eje efectivo de movimiento del oscilador.



**Figure 4** *Izquierda:* Dependencia de  $\Delta h$  con el tiempo. Los puntos experimentales se ajustan muy bien por la suma de una exponencial más un término lineal en el tiempo. *Derecha:* Dependencia del coeficiente del término lineal de ajustes como el de la izquierda con  $a_x$  para un valor de  $a_y$  fijo.