

Inestabilidad en silos cilíndricos bajo descarga de granos

G. Gutiérrez

Departamento de Física, Universidad del Simón Bolívar, Apartado 89000, Caracas 1080-A, Venezuela. Correo-e: gustav@usb.ve

P. Boltenhagen, J. Lanuza, E. Clément

Laboratoire de Physique et Mécanique des Milieux Hétérogènes UMR 7636/ESPCI, France.

Resumen

Presentamos un estudio experimental del colapso bajo descarga de granos de silos cilíndricos con paredes delgadas. Se investiga la altura umbral de colapso variando el tamaño y la densidad de los granos, el diámetro del orificio de descarga y la altura del lecho granular. Se obtiene el escalamiento del umbral de colapso con la densidad del lecho granular. Se comparan los resultados experimentales con la teoría.

Abstract

We report an experimental study of the collapse, under granular discharge, of cylindrical silos with thin walls. The collapse height threshold is studied by varying the size and density of the grains, the diameter of the discharge hole and the height of the granular bed. We investigate the scaling of the collapse threshold with the density of the granular bed. The experimental results are compared with the theory.

Introducción

Los silos se utilizan para almacenar semillas, cereales, azúcar, fertilizantes, medicamentos, minerales, etc. En la cadena de producción, acopio, transporte y distribución de alimentos, es importante poder soportar las grandes fluctuaciones que pueden afectar la producción como por ejemplo los cambios climáticos súbitos, incendios, guerras, inundaciones, las plagas o las variaciones regulares debido a los cambios de estaciones, por lo que es necesario el uso de silos para guardar grandes cantidades de granos para su eventual utilización, sin que se produzcan

interrupciones en este proceso tan complicado y vital para la sociedad. La disponibilidad de materiales resistentes, como el acero, ha facilitado la fabricación de conchas cilíndricas delgadas, las cuales son frecuentemente utilizadas como elementos estructurales para la fabricación de silos, aviones, cohetes, chimeneas, tanques, etc. Estas estructuras son inestables ante compresión axial y con frecuencia se deforman o colapsan durante operaciones comunes como la descarga de granos por gravedad, con consecuencias fatales. El desarrollo de teorías que sirvan para describir las inestabilidades que originan la deformación y el colapso de conchas cilíndricas delgadas ayudaría en el diseño de estructuras más estables y se evitarían accidentes. El desarrollo de experimentos controlados a escala de laboratorios puede contribuir al desarrollo de modelos y teorías que permitan que los resultados sean útiles para predecir comportamientos a escala de silos reales. Por otra parte la física de los granos es importante no sólo por la presencia de éstos en numerosos procesos industriales sino también por que representa un sistema complejo con características interesantes tan propias que ha sido denominado el quinto estado de la materia (Heinrich et al, 1996). Presentamos resultados experimentales sobre el colapso de cilindros abiertos, llenos de granos que se descargan por la base a través de un orificio central. Comparamos los resultados con la teoría.

Arreglo Experimental

En la figura 1 se muestra una foto de un silo para producir de manera controlada la descarga de granos y a la derecha se indican los parámetros relevantes. Los silos se fabrican con papel de seda de $20\text{gr}/\text{m}^2$ (marca Canson), diámetro $D=4\text{cm}$, y largo variable. Este se fija con cinta adhesiva a una base cilíndrica de aluminio que tiene un orificio en el centro, de diámetro a cerrado con un tapón de goma. El envase se llena parcialmente con granos de tamaño d . Se utilizaron esferas de vidrio, granos de mostaza, esferas de acero y esferas de plomo. El proceso de descarga y colapso se graba con una cámara digital.

Aspectos teóricos

En el año 1895 el ingeniero Janssen (Janssen, 1895), haciendo un experimento sobre la presión que ejerce el maíz almacenado en un silo, propuso un modelo sencillo para calcular la presión efectiva en función de la profundidad del lecho granular. La suposición principal es que las paredes sostienen parte del peso del lecho granular debido a que los esfuerzos verticales σ_{zz} se convierten en esfuerzos horizontales σ_{rr} , a través de la relación $\sigma_{rr} = K\sigma_{zz}$. En donde K es una constante. Este esfuerzo horizontal resultante actúa sobre las paredes del recipiente y origina una fuerza de fricción f que hace que la pared ejerza fuerza hacia arriba sobre el lecho granular y disminuye la presión efectiva sobre el fondo del recipiente. Un elemento de superficie $dS = \pi D dz$, a una profundidad z , para un silo de diámetro D , contribuye con una fricción $df = \mu(K\sigma_{zz})\pi D dz$, en donde μ es el coeficiente de fricción. Aún cuando todavía no hay una teoría definitiva el argumento de Janssen se considera correcto y sirve como referencia para el diseño de los silos reales y es de interés para investigadores que estudian la propagación de esfuerzos en medios granulares (Vanel et al, 2000).

Resultados y análisis

Variando la altura L del lecho granular hasta que el silo colapsa, se determinó la altura crítica L_c por encima de la cual éste colapsa, en función de la razón a/d , donde a es el diámetro del orificio de la base y d es el diámetro de los granos. El gráfico de L_c/D en función del inverso de la raíz cuadrada de la densidad ρ del lecho granular se muestran en la figura 2. Los resultados de la medida de la altura umbral L_c , del lecho granular se graficaron en función de $\rho^{-0.5}$ ya que de la teoría clásica, derivada de la propuesta de Janssen, se deduce que la altura crítica para que el silo colapse muestra esta dependencia. Nuestros datos experimentales dan como resultado una dependencia distinta a la que predice la teoría. Considerando que en un sistema real la concha

cilíndrica tiene defectos y está sometida a esfuerzos no contemplados en la teoría, consideramos una altura mayor agregándole un ΔL constante de manera que el ajuste de los datos experimentales pase por cero para una densidad ρ que tiende a infinito. En la figura 3 se puede ver que considerando un umbral efectivo $L_c + \Delta L$, se puede obtener una concordancia entre las medidas y la teoría clásica derivada de la propuesta de Janssen. Se requieren más medidas para determinar si para los silos medidos se puede aplicar la teoría clásica. Actualmente estamos determinando el escalamiento del umbral de colapso con el espesor y el diámetro de los silos.

Conclusión

Hemos encontrado que si consideramos un umbral de colapso efectivo $L_c + \Delta L$, en función de la densidad del lecho granular obtenemos resultados consistentes con la teoría clásica. El umbral efectivo medido escala como el inverso de la raíz cuadrada de la densidad del lecho granular.

Agradecimiento

Se agradece al Fonacyt y al DID de la Universidad Simón Bolívar por el apoyo financiero.

Referencias

Heinrich JM, Nagel SR y Behringer RP (1996), *Granular solids, liquids and gases*, Rev. of Mod. Physics, 68, 1259-1273.

Janssen HA (1895), *Versuche uber Getreidedruck in Silozellen*, Vereines deutscher ingenieure, 39, 1045-1049.

Vanel L, Claudin Ph, Bouchaud J-Ph, Cates ME, Clément E y Wittmer JP (2000), *Stresses in Silos: Comparison Between Theoretical Models and New Experiments*, Phys. Rev. Lett. 84, 1439-1442.

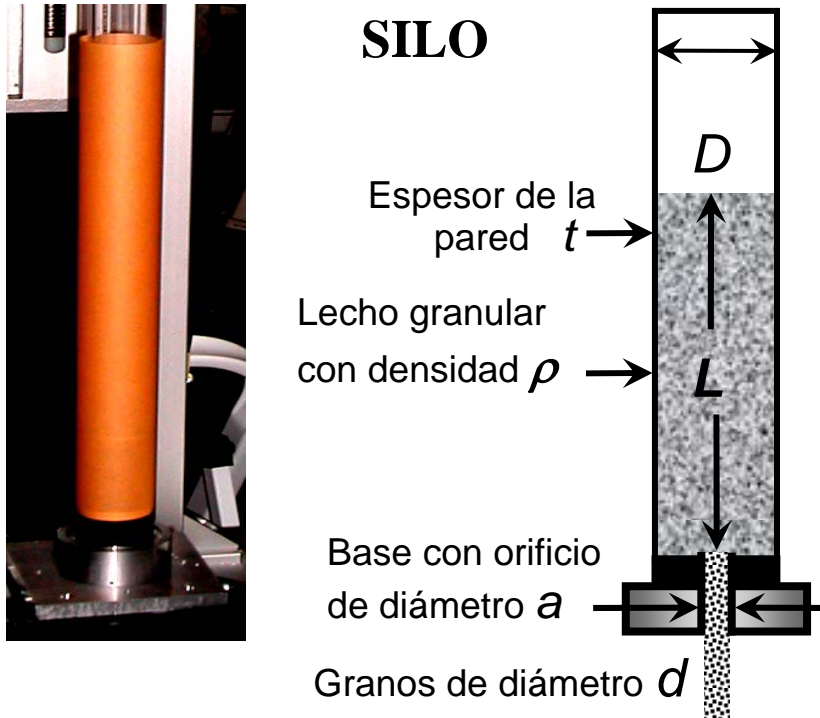


Fig. 1.- Silo colocado en una base para hacer la descarga por gravedad (izquierda) y los parámetros relevantes (derecha).

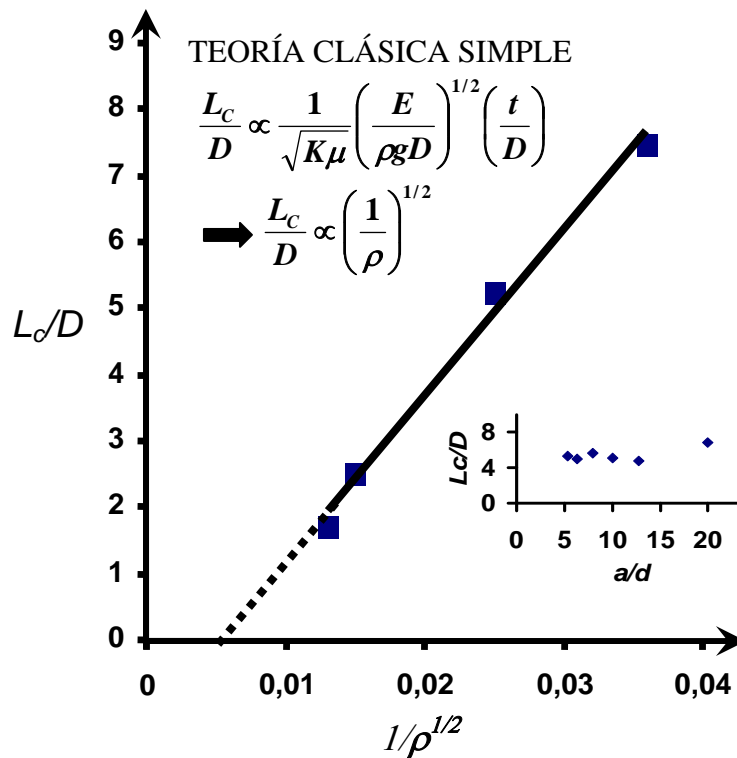


Fig.2.- Comportamiento del umbral L_c con la densidad ρ y con la variación del flujo granular (gráfico insertado). E es el módulo de Young del material que forma el silo.

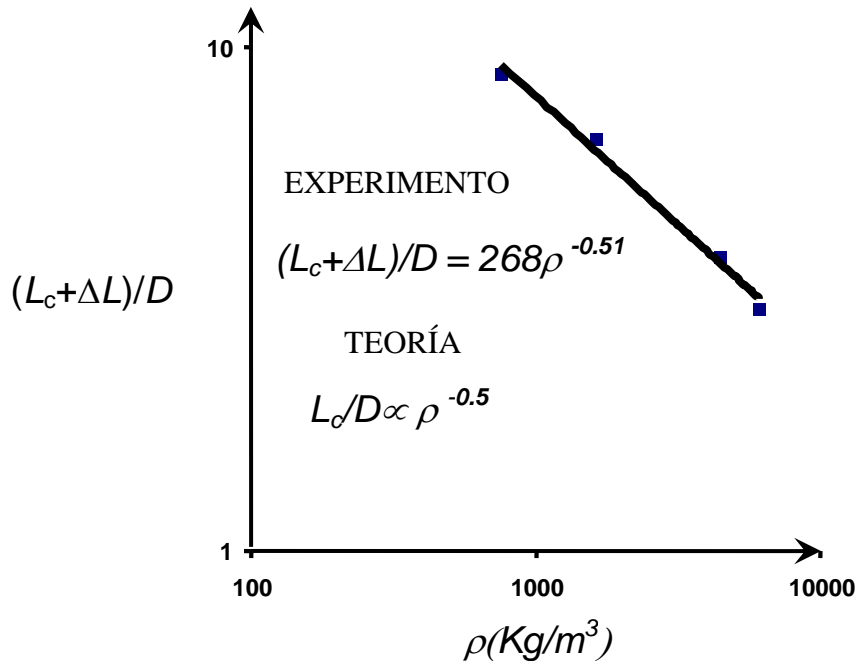


Fig 3.- Escalamiento experimental del umbral de colapso efectivo con la densidad del lecho granular.

Gustavo Gutiérrez: es Profesor del Departamento de Física y miembro del Grupo de Sistemas Complejos y de la Materia Condensada de la Universidad Simón Bolívar. Se doctoró en Física en la Universidad Central de Venezuela. Ha publicado sobre fluctuaciones, superconductividad, fluido en medios porosos desordenados, caos en sistemas electrónicos y medios granulares. <http://caos.fs.usb.ve/>; correo- e:gustav@usb.ve.

Philippe Boltenhagen: Investigador del CNRS, se doctoró en Física en la Universidad de Orsay, París. Miembro del Laboratorio Mecánica de los Medios Heterogéneos de la Escuela Superior de Física y Química Industriales, en París. Ha publicado sobre transiciones de fases en espumas y en micelas, medios granulares, cristales líquidos y emulsiones. <http://www.pmmh.espci.fr/~boltenhagen/>; Correo-e: boltenhagen@pmmh.espci.fr

José Lanuza: es Ingeniero graduado de la Universidad Pierre y Marie Curie de París. Ha trabajado en los laboratorios: Luminiscencia, Óptica de la Materia Condensada, en la Universidad de París VI; Medios Desordenados y Heterogéneos en la Universidad Pierre y Marie Curie. Miembro del Laboratorio Mecánica de los Medios Heterogéneos de la Escuela Superior de Física y Química Industriales, en París. Correo-e: Jose.Lanuza@espci.fr

Eric Clément: Profesor de Física de la Universidad Pierre y Marie Curie. Investigador del Laboratorio Mecánica de los Medios Heterogéneos de la Escuela Superior de Física y Química Industriales, en París. Ha publicado sobre transporte sedimentario y erosión, suspensiones densas, cinética química de medios confinados, medios porosos y sobre física de medios granulares. <http://www.pmmh.espci.fr/>; Correo-e: eric.clement@upmc.fr