

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXIII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**ROL DE LA COMPACTACIÓN/EXPANSIÓN INICIAL EN EL COLAPSO DE UNA
COLUMNA DE PARTÍCULAS FINAS Y SECAS.**

DIEGO VILLEGAS D.¹
SANTIAGO MONTSERRAT²
MATÍAS CORNEJO F.³

RESUMEN

Los flujos granulares han sido el foco de muchos estudios recientes. El ángulo de fricción interna puede ser significativamente reducido o incrementado respecto al ángulo de reposo del mismo material debido a las condiciones iniciales del lecho. Este trabajo se enfoca en el efecto que tiene la densidad aparente inicial de lecho en un flujo granular seco, para lo cual se estudió el alcance de flujos granulares secos y las variaciones en la presión de poros en condiciones de presión atmosférica y vacío de lechos inicialmente compactados y sueltos. Se realizaron experimentos tipo rompimiento de presa utilizando lechos de partículas finas (~83 μm). Los resultados de los experimentos a presión atmosférica indican que el comienzo del flujo está fuertemente controlado por la densidad aparente inicial del lecho. En lechos inicialmente sueltos se observaron grandes alcances del flujo y presiones de poros por sobre la atmosférica en la base del recipiente. En lechos altamente compactados, el alcance se ve disminuido notablemente y se observaron presiones de poros bajo la atmosférica. Los experimentos realizados en vacío muestran que el mecanismo de retroalimentación de la presión de poros es el responsable de los comportamientos contrapuestos en lechos inicialmente sueltos y compactados.

¹ Alumno de Magister, Departamento de Recursos Hídricos y Medio Ambiente, Universidad de Chile – diego.villegas@ing.uchile.cl

² Investigador asociado, Centro Avanzado de Tecnología para la Minería (AMTC), Universidad de Chile – smontser@ing.uchile.cl

³ Alumno de Magister, Departamento de Recursos Hídricos y Medio Ambiente, Universidad de Chile – matias.cornejo@ing.uchile.cl

1. INTRODUCCIÓN

Los flujos granulares corresponden a una mezcla bifásica compuesta por sólidos y un fluido intersticial, conducidos por efectos gravitacionales y que se propagan sobre una topografía determinada (Delannay et al., 2017). El estudio de estos fenómenos resulta de interés para poder evaluar zonas de riesgos (Roche et al., 2004). Ejemplos de estos flujos pueden ser encontrados comúnmente en la superficie terrestre como avalanchas de nieve, flujos piroclásticos, aluviones y deslizamientos de tierra en las laderas de cerros (Iverson, 2004; Montserrat, 2016).

Durante los últimos años se han llevado a cabo variados estudios experimentales enfocados en la dinámica de flujos granulares secos donde la fase gaseosa, típicamente aire, juega un rol importante en el desarrollo del flujo. Gran parte de estos estudios se enmarcan en el experimento tipo rompimiento de presa, en el cual una pila de partículas es liberada a un canal de lecho horizontal a través de la apertura súbita de una compuerta que divide el recipiente donde se encuentra la pila y el canal (Roche et al., 2004; 2008; 2010; 2014 Chedeville & Roche, 2014; Montserrat et al., 2016). Los resultados en las experiencias de laboratorio no son fácilmente escalables (Iverson, 2004). Sin embargo, estos resultados ayudan a comprender los mecanismos físicos involucrados en el movimiento de los flujos granulares (Rondon et al., 2011) y verificar resultados obtenidos mediante simulaciones numéricas (Delannay et al., 2017).

La presión de poros puede jugar un rol importante en el desarrollo del flujo debido a que ésta modula la fricción entre partículas de acuerdo a la ley de Coulomb (Montserrat et al., 2016):

$$\tau = (\sigma - p) \tan(\psi) + c \quad (1)$$

donde τ es el esfuerzo cortante entre granos, σ es el esfuerzo normal debido al peso del suelo, p es la presión de poros, ψ es el ángulo de fricción interna del material y c es la cohesión del material. De la ecuación (1) se observa que el aumento de la presión de poros reduce el esfuerzo de corte entre granos (Iverson, 1997).

Roche et al. (2004;2008;2010) y Montserrat et al. (2016) determinaron que la fluidización inicial de un lecho de partículas en experimentos tipo rompimiento de presa otorga mayor movilidad al flujo cuando la fase sólida se compone de partículas finas. La fluidización se logra al introducir un flujo vertical de aire a través de la columna de partículas, lo que aumenta la presión de poros al interior de la columna.

La porosidad inicial del lecho también juega un papel importante en el desarrollo de los flujos granulares (Iverson, 2000; Rondon et al., 2011, Montserrat et al., 2016). Se ha evidenciado en terreno que los deslizamientos originados por lechos inicialmente compactados (menor porosidad) tienen menor movilidad que los originados por los que están más sueltos (mayor porosidad) para condiciones similares de pendiente (Gabet & Mudd, 2005; Henderson 2016).

El rol de la porosidad inicial en el desarrollo del flujo resulta de interés debido al mecanismo de retroalimentación de la presión de poros (Iverson, 2000). Este mecanismo se basa en la hipótesis propuesta por Casagrande en 1936 (Gabet & Mudd, 2006), quien encontró que si un suelo

drenado es continuamente deformado, éste eventualmente adquirirá un estado crítico de porosidad. Cuando el lecho tiene una mayor porosidad que la crítica, al deformarse tenderá a contraerse disminuyendo el tamaño de los poros, lo que se traduce en un aumento de la presión y una disminución del esfuerzo Culombico. Por otro lado, cuando la porosidad del lecho es menor que la crítica, el flujo tenderá a dilatarse aumentando el tamaño de poros, obteniéndose presiones de poros por debajo de la presión hidrostática y un aumento de los esfuerzos Culombicos (Iverson, 2000; Rondon et al., 2011)

El objetivo de este trabajo es determinar el rol que tiene la compactación/expansión inicial en lechos de partículas finas, donde los efectos del aire intersticial toman relevancia, en el alcance de los flujos granulares. Se realizaron experimentos tipo rompimiento de presa a presión atmosférica y cercanos al vacío (~4% de la presión atmosférica) con diferentes grados de compactación y expansión inicial del lecho.

2. MONTAJE EXPERIMENTAL.

El montaje de los experimentos a presión atmosférica corresponde a un canal horizontal (ver Figura 1.a) de 2,5 m de largo y 20 cm de ancho de fondo liso de aluminio y paredes de acrílico de 50 cm de alto. Una compuerta vertical ubicada a 20 cm de uno de sus extremos delimita un contenedor donde las partículas son colocadas inicialmente. La compuerta se abre repentinamente ($<0,1$ s) utilizando un sistema de poleas y un contrapeso. En el sector del contenedor, el lecho de partículas puede ser aireado al introducir un flujo vertical del aire desde el fondo. Se dice que el lecho se encuentra fluidizado cuando el arrastre ejercido por el flujo de aire soporta el 100% del peso de las partículas, desapareciendo la fricción entre éstas. La fluidización se interrumpe mediante una electro válvula que corta el flujo de aire al abrirse la compuerta.

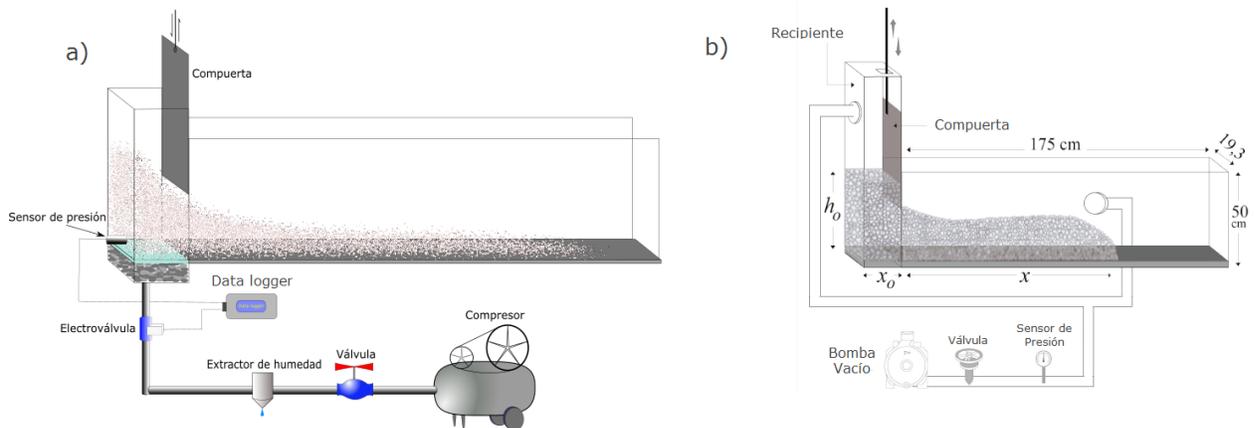


Figura 1. (a) Esquema montaje experimental para experimentos a presión atmosférica. (b) Esquema montaje experimental para experimentos realizados en vacío.

En la base del recipiente se colocó un sensor de presión el cual es capaz de medir el exceso (o déficit) de la presión de poros respecto de la presión atmosférica a una frecuencia de 200 Hz. El sensor fue cubierto con una delgada placa porosa para aislar la presión de poros de la presión litostática ejercida por las partículas. Además, se obtuvieron perfiles longitudinales del flujo mediante el uso de cámaras de video.

Para los experimentos en vacío se utilizó un canal similar (ver Figura 1.b) de 1,8 m de largo y 19 cm de ancho y una compuerta ubicada a 19 cm de uno de sus extremos. Este canal se encuentra completamente sellado y conectado a una bomba de vacío. Para medir la presión al interior del canal se utilizó un sensor capaz de medir presiones de hasta 0.01 veces la presión atmosférica.

Las partículas utilizadas corresponden a micro esferas de vidrio de diámetro d_{50} igual a $83 \mu\text{m}$ y densidad 2.5 g/ml . Las partículas corresponden al tipo A según la clasificación de Geldart (1973). Esta clasificación se basa en las propiedades de los lechos cuando son fluidizados. Al introducir un flujo vertical de aire en una columna de partículas Tipo A la presión de poros aumenta en función del flujo de aire hasta lograr su fluidización. A partir de ahí, el lecho presenta una fase de expansión lineal en la cual la densidad aparente disminuye a medida que aumenta el grado de fluidización. Esta fase continúa hasta que aparecen burbujas y la fluidización se vuelve heterogénea (Geldart, 1973). Resultados experimentales muestran que para el caso de estas partículas la expansión del lecho se inicia poco antes de que ocurra la fluidización del lecho (93-95% de fluidización, Figura 2, Montserrat et al., 2012; 2016).

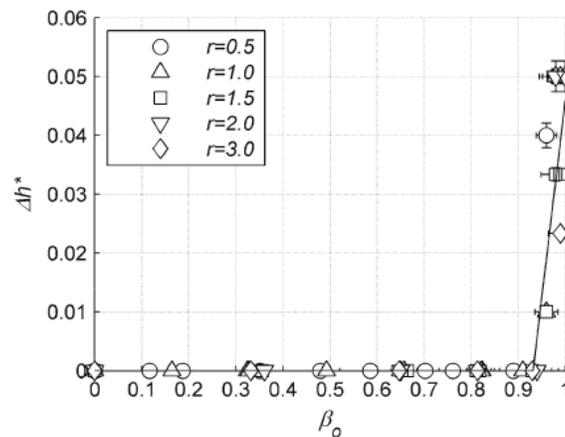


Figura 2. Expansión del lecho de acuerdo al parámetro $\beta_0 = P/P_L$ para diferentes razones de aspecto de la columna $r = h_0/x_0$ donde P es la presión de poros, P_L la presión litostática, h_0 es la altura del lecho inicial sin expandir y x_0 es el ancho del recipiente que contiene el lecho, $\Delta h^* = (h_e - h_0)/h_0$, donde h_e es la altura expandida. La línea continua corresponde al mejor ajuste para los datos de expansión (Montserrat et al., 2016).

Para los experimentos en el canal a presión atmosférica se utilizaron 23 kg de material particulado, mientras que para los experimentos en el canal al vacío se utilizaron 19,6 kg. De esta forma se conserva la densidad y la razón de aspecto de referencia en ambos recipientes. Se definió la densidad de referencia como aquella obtenida luego de fluidizar el lecho de partículas y detener el flujo de aire. Se obtuvo una densidad de referencia de 1417 kgm^{-3} y una razón de aspecto igual a 2,02. La densidad fue variada respecto de la densidad de referencia mediante

compactación o fluidización de la columna. De esta manera no es posible estudiar flujos inicialmente expandidos en condiciones de vacío. Se realizaron un total de 59 experimentos a presión atmosférica, cubriendo densidades aparentes relativas desde 0,938 hasta 1,075. Además, se realizaron 6 experimentos en condiciones de vacío con densidades relativas entre 0,939 hasta 0,978 veces la densidad de referencia.

Se siguió un estricto protocolo para asegurar la repetibilidad de los experimentos. Este protocolo consideró: 1) secado de partículas en horno y aireado de las partículas previo a cada experimento para prevenir los efectos de la humedad, 2) limpieza periódica de las paredes del canal con líquido antiestático y 3) en el caso de lecho compactado se dejó reposar 20 min la columna con el fin de que se disipará la posible presión de poros generada en el proceso.

3. RESULTADOS.

Para determinar el efecto que tiene la densidad aparente inicial del lecho se define la densidad aparente relativa como:

$$\rho_r = \rho_i / \rho \quad (2)$$

Donde ρ_i corresponde a la densidad aparente de referencia, la cual se obtiene fluidizando la columna de partículas en el recipiente y luego cerrando lentamente la válvula del aire, y ρ corresponde a la densidad inicial del lecho que puede ser menor, igual o mayor que la densidad de referencia, para los casos de lechos inicialmente expandidos, aireados y compactados respectivamente. Dado que la masa se conserva dentro de la pila, la densidad de referencia viene simplemente dada por:

$$\rho_r = h/h_0 \quad (3)$$

Donde h es la altura del lecho al momento de iniciar el experimento y h_0 es la altura que tiene la columna cuando su densidad es la de referencia ρ_i . Se obtuvo que $h_0=40,16$ cm en el caso del canal abierto y h_0 38,32 cm en canal de vacío, debido a la diferencia en el área basal de los recipientes de ambos canales.

De acuerdo a las ecuaciones (2) y (3), si la densidad aparente relativa es menor que 1, el lecho se encuentra compactado y si es mayor que 1 el lecho se encuentra expandido. Los resultados se muestran en dos subsecciones, la primera relacionada al efecto que tiene la densidad inicial del lecho en el alcance y la movilidad del flujo, y la segunda el rol que tiene la compactación en la presión de poros en la base del recipiente que contiene la pila.

Rol de la densidad inicial en el alcance del flujo

La Figura 3 muestra el alcance del flujo en función la densidad relativa (ρ_i/ρ) que presenta el lecho al inicio del experimento. El alcance del flujo, x , fue adimensionalizado por la altura de

referencia h_0 . Para los experimentos realizados bajo condiciones de presión atmosférica, se observa un aumento en el alcance del flujo en función de ρ_i/ρ . Esto es, mientras menor es la densidad inicial de la columna, mayor es el alcance del flujo. Esto concuerda con resultados previos obtenidos para $\rho_i/\rho > 1$ (Roche et al., 2004; 2008; 2010; Montserrat et al., 2016). El aumento en el alcance del flujo observado para un valor $\rho_i/\rho = 1$, se debe a un aumento de la presión de poros en la columna debido a la aireación de la columna previo a su fase de expansión (Montserrat et al., 2016).

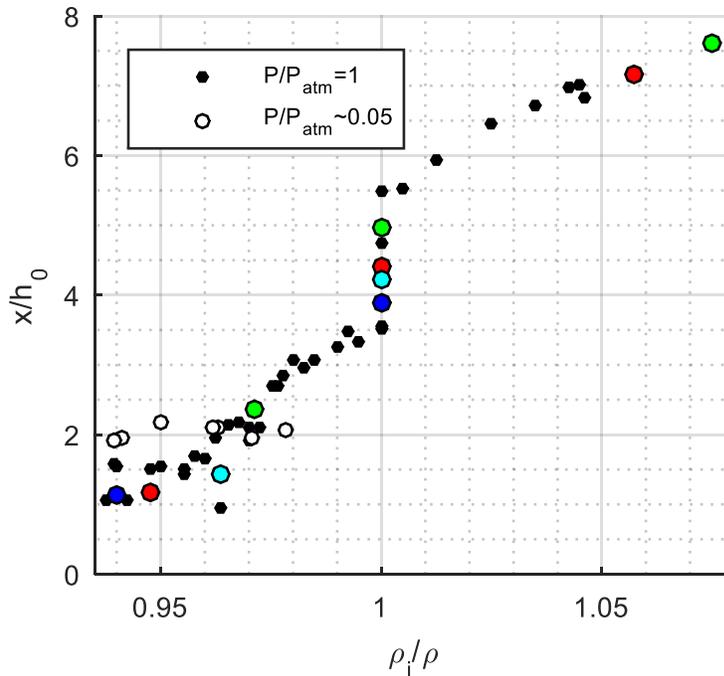


Figura 3. Alcance adimensional del flujo, x/h_0 en función de la densidad relativa inicial de la columna, ρ_i/ρ . Los puntos de colores son indicativos de los experimentos graficados en las Figuras 6, 7, y 8.

De los experimentos realizados al vacío, los resultados muestran que no existe una variación evidente en el alcance del flujo en función de ρ_i/ρ .

En la Figura 4 se presentan secuencias de imágenes de tres experimentos realizados en el canal al vacío. Se observa que, en lechos compactados con densidades similares, el frente se mueve con mayor rapidez y la deformación del lecho es más suave cuando la presión del medio es un 5% de la presión atmosférica, obteniendo un mayor alcance que en condiciones de presión atmosférica. Esto se ve con más claridad al comparar la posición del frente del flujo en el tiempo (Figura 5). Los experimentos realizados en el vacío muestran que la posición del frente es similar para las densidades aparentes relativas 0,96 y 0,94, es decir flujos compactados en condiciones de vacío tendrían la misma movilidad independiente de la compactación inicial del lecho. Los flujos al vacío muestran una mayor velocidad del frente comparado con los flujos en condiciones atmosféricas con la misma densidad inicial. La movilidad de flujos expandidos, en condiciones atmosféricas, es considerablemente mayor, obteniendo alcances hasta de 3 veces mayor que la de

flujos compactados. Sin embargo, en este caso se combina el efecto de la expansión y grado de fluidización inicial del lecho.

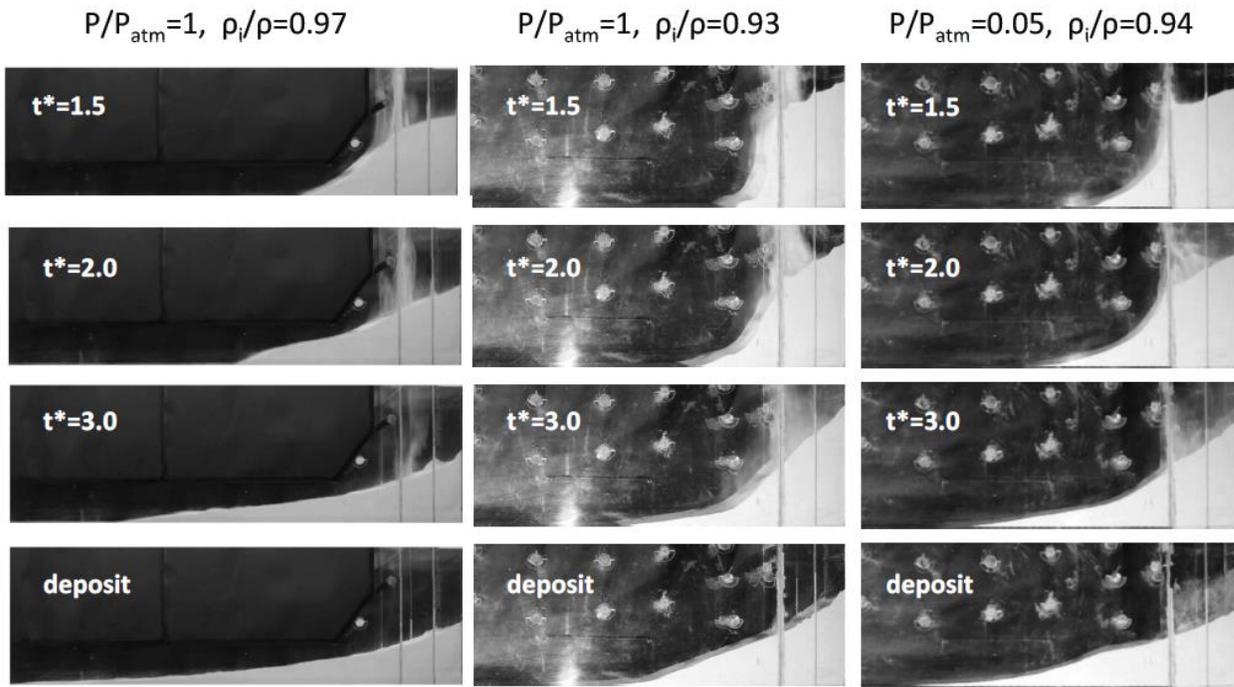


Figura 4. Fotos en diferentes tiempos para tres experimentos realizados en el canal al vacío con diferentes densidades aparentes relativas y presión ambiente. $t^* = t/(h_0/g)^{0.5}$ donde h_0 es la altura del lecho obtenida con la densidad de referencia.

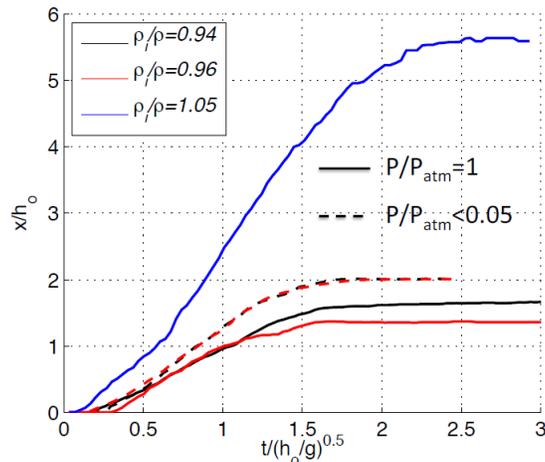


Figura 5. Posiciones del frente del flujo en función de ρ_i/ρ y para diferentes presiones ambientes.

Rol de la densidad en la presión de poros.

La movilidad del flujo está estrechamente relacionada a la densidad aparente relativa del lecho siempre y cuando los efectos de la presión de poros estén presentes. Este resultado da indicios de

la existencia del mecanismo de retroalimentación de la presión de poros explicado anteriormente (Iverson et al., 2000; Schaeffer & Iverson, 2008).

En la Figura 6.a se muestran las señales de la presión de poros, adimensionalizada por la presión litostática (P_L) en la base de la columna, en función del tiempo para el caso de experimentos en condiciones atmosféricas. Las señales de presión corresponden a experimentos compactados denotados con colores azul, rojo y verde mostrados en la Figura 3. Se observa que las señales presentan un máximo y/o un mínimo en la señal de presión, dependiendo de los valores de ρ_i/ρ . Para lechos menos compactados, la señal de presión tiene un máximo debido a que la columna tiende a compactarse cuando se inicial el experimento (Iverson et al., 2000). Para el caso $\rho_i/\rho = 0,971$ la presión de poros alcanza un máximo equivalente al 13% de la presión litostática. Por otro lado, para lechos con alta compactación $\rho_i/\rho = 0,940$, la señal de presión disminuye hasta alcanzar un mínimo de presión por debajo de la presión atmosférica. Esto se debe a que el lecho de partículas debe dilatarse antes de iniciar el movimiento. Para lechos con mediana compactación (caso $\rho_i/\rho = 0,948$) se puede observar un comportamiento contractivo y dilatante.

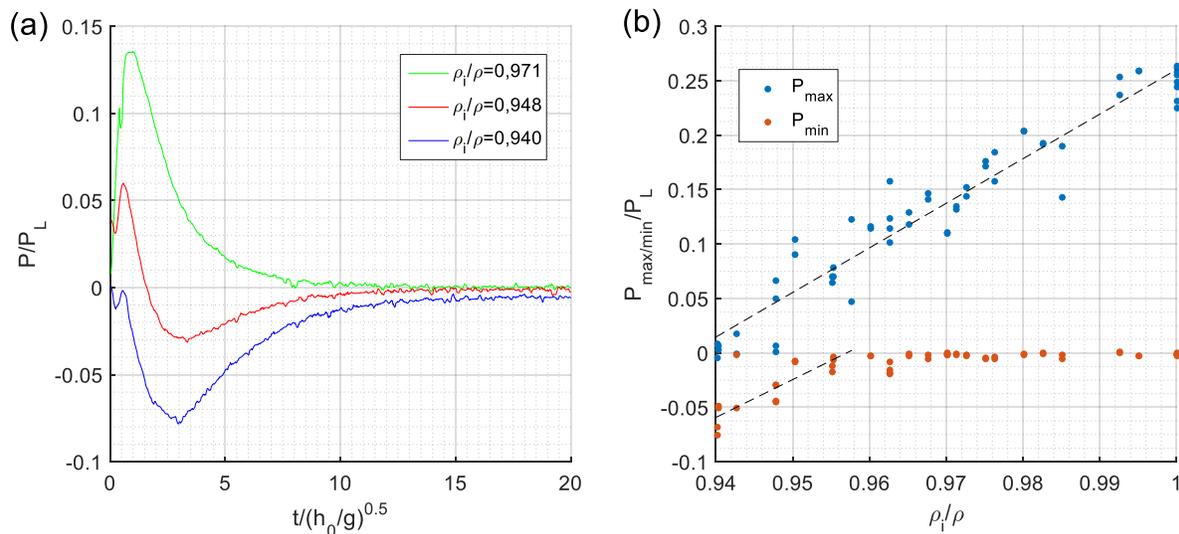


Figura 6. (a) Señal de presión en la base del recipiente que contiene la pila de partículas para los experimentos de lecho inicialmente compactados. (b) Máximos y mínimos de la señal de presión mostradas en (a).

La Figura 6.b muestra los máximos y mínimos de presión de poros en la base de la columna, obtenidos en función de ρ_i/ρ . Se observa que los máximos de presión varían desde $P/P_L = 0$ para $\rho_i/\rho = 0.94$ hasta $P/P_L = 0,25$ para $\rho_i/\rho = 1$. Los mínimos de presión varían desde $P/P_L = 0.07$ para $\rho_i/\rho = 0.94$ y $P/P_L = 0$ para $\rho_i/\rho = 0.96$. Para valores mayores de ρ_i/ρ no se registran mínimos de presión. De esta manera se obtiene que para condiciones iniciales de $\rho_i/\rho > 0.96$ la columna tiende a compactarse al iniciar el movimiento, aumentando la presión de poros. Para $\rho_i/\rho < 0.94$ la columna de partículas se dilata al iniciar el movimiento, disminuyendo la presión de poros. Para valores de $0.94 < \rho_i/\rho < 0.96$, se observa un comportamiento mixto de compactación/dilatación de la columna, evidenciado por un aumento inicial de la presión de poros y una disminución posterior por debajo 0.

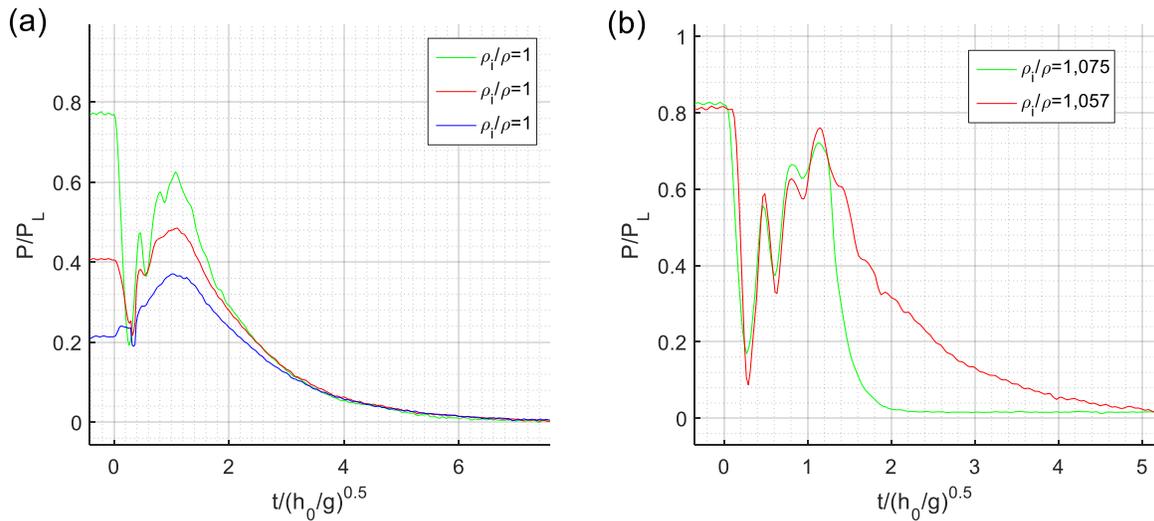


Figura 7. Señales de presión en los experimentos aireados y fluidizados mostrados en colores azul, rojo y verde en la Figura 3. (a) Experimentos aireados. (b) Experimentos fluidizados.

En la Figura 7 se muestra la señal de presión en la base la columna para los experimentos aireados y fluidizados, según los puntos con colores azul, rojo y verde mostrados en la Figura 3. Se observa que las señales de presión de los experimentos aireados presentan comportamientos similares, se advierte además que los experimentos con grado de aireación igual a 0,2 y 0,4 aproximadamente denotados por el color azul y rojo respectivamente, presentan un máximo mayor que el grado de aireación inicial inducido. Tal mecanismo de auto-fluidización (Roche et al., 2010) viene dado por la compresión del lecho al momento de deformarse. Por otro lado, el experimento con grado de aireación cercano a 0,8 presenta un máximo, pero menor que el grado de aireación inicial inducido. Otro aspecto a mencionar, es que la disipación de presión producto la difusión del aire ocurre en tiempos similares sin importar el grado de aireación inicial.

4. CONCLUSIONES

Se han llevado a cabo experimentos del tipo rompimiento de presa de una mezcla aire-partículas finas. Los resultados muestran que la compactación/expansión inicial del lecho juega un rol importante en el desarrollo del flujo. En general, lechos compactados tienen menores alcances que lechos sin compactar. Este alcance se ve notoriamente aumentado con la fluidización inducida inicialmente sobre la columna de partículas. Esto se debe a que los efectos de la presión de poros no son despreciables en este tipo de lechos, diferente a lechos compuestos por partículas más gruesas donde la presión de poros no es relevante dada su alta permeabilidad (Roche et al., 2010; Rondon et al., 2011).

Las mediciones de la presión de poros en la base de la columna mostró presiones bajo la atmosférica en lechos inicialmente compactados, y presiones por sobre la atmosféricas en lechos no compactados, aireados y fluidizados.

Lechos con densidad aparente relativa inicial iguales o menores a 0,94 sufren una dilatación inicial, lo cual se traduce en una subpresión de poros, mientras que lechos con densidades relativas aparentes iguales o mayores a 0,96 se contraen para poder deformarse lo que induce una sobrepresión de poros. Lechos cuya densidad aparente relativa se encuentre entre ambos valores presentaron comportamientos mixtos de dilatación y contracción al deformarse. Comportamientos similares fueron hallados por Iverson et al. (2000).

Finalmente, los experimentos realizados a un grado de vacío de 5% muestran que la movilidad no se ve alterada significativamente por la compactación inicial del lecho. Se observó en lechos inicialmente compactados y en condiciones de presión atmosférica que la columna se desploma abruptamente con una baja velocidad del frente, por otro lado, experimentos con similares características de compactación inicial en condiciones de vacío muestran que el flujo se deforma suavemente y con velocidades del frente mayores. De acuerdo a estos resultados se concluye que el mecanismo de retroalimentación de la presión de poros es el responsable de los comportamientos contrapuestos en lechos inicialmente sueltos y compactados.

REFERENCIAS

- Chedeville, C., & Roche, O. (2014). Autofluidization of pyroclastic flows propagating on rough substrates as shown by laboratory experiments. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119(3), 1764-1776.
- Delannay, R., Valance, A., Mangeney, A., Roche, O., & Richard, P. (2017). Granular and particle-laden flows: from laboratory experiments to field observations. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 50(5), 053001.
- Gabet, E. J., & Mudd, S. M. (2006). The mobilization of debris flows from shallow landslides. *Geomorphology*, 74(1), 207-218.
- Geldart, D. (1973). Types of gas fluidization. *Powder technology*, 7(5), 285-292.
- Henderson, S. W. (2016). The effect of bulk density on debris flow mobilization, Marin County, CA (Doctoral dissertation, San Francisco State University).
- Iverson, R. M. (1997). The physics of debris flows. *Reviews of geophysics*, 35(3), 245-296.
- Iverson, R. M., Reid, M. E., Iverson, N. R., LaHusen, R. G., Logan, M., Mann, J. E., & Brien, D. L. (2000). Acute sensitivity of landslide rates to initial soil porosity. *science*, 290(5491), 513-516.
- Iverson, R. M., Logan, M., & Denlinger, R. P. (2004). Granular avalanches across irregular three-dimensional terrain: 2. Experimental tests. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 109(F1).
- Montserrat, S., Tamburrino, A., Roche, O., Niño, Y., & Ihle, C. F. (2016). Enhanced run-out of dam-break granular flows caused by initial fluidization and initial material expansion. *Granular Matter*, 18(1), 11.
- Montserrat, S., Tamburrino, A., Roche, O., & Niño, Y. (2012). Pore fluid pressure diffusion in defluidizing granular columns. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 117(F2).
- Roche, O., Gilbertson, M. A., Phillips, J. C., & Sparks, R. S. J. (2004). Experimental study of gas-fluidized granular flows with implications for pyroclastic flow emplacement. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 109(B10).

Roche, O., Montserrat, S., Niño, Y., & Tamburrino, A. (2008). Experimental observations of water-like behavior of initially fluidized, dam break granular flows and their relevance for the propagation of ash-rich pyroclastic flows. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 113(B12).

Roche, O., Montserrat, S., Niño, Y., & Tamburrino, A. (2010). Pore fluid pressure and internal kinematics of gravitational laboratory air-particle flows: Insights into the emplacement dynamics of pyroclastic flows. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 115(B9).

Rondon, L., Pouliquen, O., & Aussillous, P. (2011). Granular collapse in a fluid: role of the initial volume fraction. *Physics of Fluids*, 23(7), 073301.