



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS Y MATEMATICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA FLUIDIZACIÓN INDUCIDA POR LA PERCOLACIÓN DE  
PARTÍCULAS FINAS EN LECHOS DE PARTÍCULAS GRUESAS A DIFERENTES GRADOS  
DE VACIO

MEMORIA PARA OPTAR AL TITULO DE INGENIERO CIVIL

IGNACIO TOMAS TOLEDO SAAVEDRA

PROFESOR GUÍA:  
SANTIAGO MONTSERRAT MICHELINI

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
ALDO TAMBURRINO TAVANTZIS  
YARKO NIÑO CAMPOS

FINANCIADO POR PROYECTO FONDECYT 11130254

SANTIAGO DE CHILE

2017

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL  
POR: IGNACIO TOMÁS TOLEDO SAAVEDRA  
FECHA: 24/05/2017  
PROF. GUÍA: SANTIAGO MONTSERRAT MICHELINI

## ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA FLUIDIZACIÓN INDUCIDA POR LA PERCOLACIÓN DE PARTÍCULAS FINAS EN LECHOS DE PARTÍCULAS GRUESAS A DIFERENTES GRADOS DE VACÍO

Un flujo piroclástico es una mezcla densa de partículas y gas que se genera en erupciones volcánicas y cuyo colapso se destaca por tener alcances de decenas de kilómetros a velocidades de decenas de metros por segundo. Un ejemplo de esto fue lo ocurrido el 18 de mayo de 1980 en el monte St. Helen, en donde la actividad volcánica generó un flujo piroclástico que alcanzó velocidades de ~9-13 m/s, cubriendo una distancia de ~6-7 km en un terreno cuya pendiente es  $< 4^{\circ}$ - $6^{\circ}$ .

Estudios experimentales de rompimiento de presa representan estos flujos piroclásticos, en donde una columna de partículas finas, en representación del material piroclástico, colapsa generando un flujo granular que fluye a lo largo de un canal rectangular (Chedeville, 2014). En el fondo del canal, inicialmente liso, se agregó un lecho de esferas de distintos diámetros y se observó que la distancia de asentamiento de las partículas aumentó casi al doble que en el caso con fondo liso. A lo largo de la base del canal con lecho, sensores de presión registraron mayores aumentos de presión de poros al pasar el flujo granular, que es una causante de fluidización. Este aumento de presión se acredita en parte a partículas finas que van percolando en el lecho a medida que ocurre el flujo. Se entiende por fluidización al sostenimiento del peso de una partícula, o de un conjunto de estas, mediante un flujo de aire ascendente.

A raíz de esto, el objetivo general se centra en estudiar de forma aislada la percolación de partículas finas sobre un lecho de partículas gruesas, para medir las presiones de poro alcanzadas en el lecho y observar el asentamiento de las partículas finas en función del tiempo. En este caso no se tiene un canal, sino que se inician los ensayos desde una situación estática en donde una columna de partículas finas ya se encuentra sostenida por un lecho, para luego ser inducidas a percolar de forma controlada. En los presentes ensayos, el flujo de aire es generado por la diferencia de presión de aire entre la superficie y la base de la columna de partículas, en donde la presión de aire en la base corresponde a la presión de poros del lecho, producida por la percolación, y la presión en la superficie corresponde a la presión ambiente inicial. Las presiones ambiente iniciales corresponden al 100%, 50% y 5% de la presión atmosférica.

Como resultado de los ensayos se logra medir fluidizaciones entre el 6% y 28% de la presión litostática de las partículas finas a presión atmosférica. Se observa que la fluidización no se logra únicamente por percolación, sino también por compactación de la columna de partículas finas. Ambos efectos actúan simultáneamente. Dentro de los tamaños de lechos y de partículas finas utilizadas, columnas de partículas de diámetro medio 75  $\mu\text{m}$  logran mayores fluidizaciones que partículas diámetro medio 150  $\mu\text{m}$ . En los lechos más gruesos, de 2 y 3 mm de diámetro medio, se observó mayor percolación, junto a un mayor grado de fluidización en comparación a ensayos con lecho de esferas de 1 mm. Al colapsar la columna, a presión ambiente se observan una serie de pequeña compactaciones y expansiones antes de quedar estáticas, mientras que a 5% de la presión atmosférica ocurre solo compactación.

# Agradecimientos

*A mis padres y a mis hermanos, por su incondicional apoyo, consejo y paciencia en los momentos importantes de mi vida. Quiero estar siempre cerca de ustedes.*

*A mi esposa, por brindarme siempre mucho más apoyo del que espero. Me sorprendes cada día.*

*A mis amigos Anibal, Felipe, Gabriel, Jorge (Fuentes y Ayala), Max (Taivo y Barra), Nico, por ser personas constantes y cercanas en mi vida y por dejarme ser cercano a las suyas también. Que nuestra amistad nunca se acabe.*

*A todos con quienes he compartido y trabajado en mi paso por civil, a quienes no veo tan seguido, pero que me traen muy buenos recuerdos, sonrisas, anécdotas, y tantas otras cosas.*

*A mis amigos fuera de la universidad y a los amigos músicos, quienes me han acompañado a lo largo de los años y han mantenido mi vida expandida mi vida fuera de los libros.*

# Tabla de Contenido

Capítulo 1 Introducción .....	1
1.1. Motivación.....	1
1.2. Objetivos .....	2
1.2.1. Objetivo general.....	2
1.2.2. Objetivos específicos .....	2
Capítulo 2 Revisión de antecedentes bibliográficos.....	3
2.1. Material granular .....	3
2.2. Estudios sobre columnas de material granular.....	5
2.3. Fluidización de partículas y ensayos de ruptura de presa .....	7
Capítulo 3 Metodología experimental .....	10
3.1. Consideraciones generales .....	10
3.2. Montaje experimental .....	11
3.3. Percolación .....	12
3.4. Desarrollo de ensayos.....	13
3.5. Equipamiento.....	13
3.5.1. Contenedor de acrílico.....	13
3.5.2. Péndulo .....	15
3.5.3. Cámara de alta velocidad .....	15
3.5.4. Cuarto Oscuro.....	16
3.5.5. Bomba de vacío .....	16
3.5.6. Sensor de presión.....	17
3.5.7. Placa porosa .....	18
3.5.8. Data logger.....	18
3.5.9. Programas computacionales utilizados.....	19

3.6. Montaje de un experimento .....	19
3.6.1. Preparación del material granular .....	19
3.6.2. Colocación del material granular .....	20
3.6.3. Registro de datos .....	20
3.7. Análisis de datos.....	21
3.7.1. Análisis de imágenes .....	22
3.7.2. Análisis de las presiones .....	22
Capítulo 4 Análisis de resultados.....	23
4.1. Esquema de presiones y altura de columna.....	25
4.2. Ensayos sin lecho.....	27
4.2.1. Efecto de pared.....	27
4.2.2. Compactación .....	30
4.3. Datos de presión y altura.....	31
4.3.1. Análisis de alzas de presión .....	32
4.3.2. Análisis de variación de la altura de la columna de partículas finas. ....	36
4.3.3. Análisis de presiones máximas y altura de columna .....	39
4.3.4. Asentamiento de partículas finas tras un impacto a diferentes presiones ambiente .....	41
4.3.5. Interfaz lecho-columna.....	42
4.4. Estimación de presiones máximas.....	43
4.4.1. Método de volúmenes finitos .....	43
4.4.2. Adaptación del método numérico .....	47
4.4.3. Cálculo de presión debido a la percolación de partículas finas en el lecho .....	47
4.4.4. Cálculo de presión debido a compactación de las partículas finas .....	48
4.4.5. Coeficiente de difusión de presión en ensayos sin lecho .....	49
4.4.6. Análisis de resultados.....	50
Capítulo 5 Conclusiones .....	59
5.1. Montaje experimental .....	59
5.2. Percolación a distintos grados de vacío.....	59
5.3. Percolación y consolidación a presión atmosférica .....	60

5.4. Fluidización .....	60
Capítulo 6 Bibliografía .....	61
Anexo A Clasificación de Geldart .....	6-ii
Anexo B Condiciones para calcular coeficientes de difusión.....	6-iii

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Motivación

Predecir el alcance y la dinámica de flujos granulares que ocurren en la naturaleza, como flujos piroclásticos, avalanchas y aluviones, permite evaluar el impacto de dichos eventos sobre asentamientos humanos y zonas de operaciones industriales. Debido a esto, el estudio de flujos granulares es un problema mayor de ingeniería en la actualidad. Chile no es la excepción, debido a que en su geografía ocurren estos flujos granulares con una importante magnitud y frecuencia.

Para simular el depósito de un flujo granular, se han realizado experimentos del tipo de rompimiento de presa (Roche et al 2008, 2010; Chedeville 2014), en los cuales se ha estudiado el alcance de un conjunto de partículas finas que fluyen sobre canales rectangulares simulando el avance de un flujo granular, a distintas condiciones iniciales de fluidización<sup>1</sup> de las partículas y utilizando distintos tipos de fondos en el canal. Sobre un fondo liso, cuando las partículas son inicialmente fluidizadas su alcance es casi el doble que en el caso sin fluidizar y la presión medida en el fondo del canal aumenta considerablemente. Al colocarse rugosidad en el fondo del canal el alcance del flujo de partículas finas no disminuye, como se podría esperar, sino que aumenta casi al doble que en el caso con fondo liso. En ensayos con lecho rugoso en donde las partículas finas no son inicialmente fluidizadas se miden presiones en el fondo del canal similares a las observadas en el caso de tenerse partículas inicialmente fluidizadas sobre un fondo liso, indicando la presencia de un fenómeno que genera fluidización durante la ocurrencia del flujo. Este hecho apunta al aire intersticial del lecho como causante de este efecto de fluidización espontáneo.

En otro estudio experimental (Homan, 2014), se estudió la compactación de columnas de partículas finas (20 a 60 $\mu$ m) inicialmente fluidizadas frente a impactos controlados, a diferentes grados de vacío. Los impactos controlados fueron realizados por un péndulo sobre una de las paredes del contenedor de partículas. Los resultados muestran que a presión atmosférica la columna de partículas finas se compacta más que en el caso de tenerse muy bajas presiones ambiente (150mbar), lo que indica que la presencia del aire es importante en la dinámica de conjuntos de partículas.

Por lo anterior, ha surgido interés por entender mejor la interacción entre partículas finas, lecho y aire, con el fin de explicar los grados de fluidización vistos en experimentos de rompimiento de presa sobre lechos rugosos. Más específicamente, el presente experimento ha sido pensado

---

<sup>1</sup> La fluidización es la suspensión de una partícula, o de un conjunto de estas, producto de un flujo de aire ascendente. Un conjunto de partículas fluidizadas se caracteriza por tener un comportamiento similar al de un fluido.

para estudiar aisladamente el grado de fluidización que alcanza una columna de partículas finas al percolar en lechos granulares.

## 1.2. Objetivos

### 1.2.1. Objetivo general

El objetivo general es realizar un estudio experimental de la percolación de partículas finas sobre lechos de partículas gruesas, a distintas presiones ambientales, con el fin de observar la capacidad del aire intersticial de fluidizar las partículas finas.

### 1.2.2. Objetivos específicos

Específicamente, en este estudio se busca realizar ensayos en donde ocurra percolación de partículas finas en lechos de partículas gruesas en un montaje que permita reducir la presión en el espacio donde ocurre la percolación. Los ensayos deben considerar la combinación de distintos tamaños de partículas finas y partículas gruesas. En los ensayos a presión atmosférica el objetivo es registrar la variación de presión en el lecho durante la percolación, y en los ensayos a diferentes presiones ambiente el objetivo es grabar videos que permitan observar diferencias en la forma en que percolan las partículas.

El objetivo una vez terminados los ensayos es poder hacer un análisis y una clasificación de los resultados de acuerdo a las variables utilizadas.



# Capítulo 2

## Revisión de antecedentes bibliográficos

### 2.1. Material granular

Dentro de los experimentos realizados con flujos granulares, existen ciertos tamaños de partículas que fueron elegidos por ser representativos de fenómenos que ocurren a mayor escala, como los flujos piroclásticos. En el trabajo de Chedeville (Chedeville & Roche, 2014), se introduce el parámetro “*roughness number*”, o número de rugosidad  $R_0 = h/d_0$ , en donde  $h$  es la altura del flujo de partículas finas y  $d_0$  es la rugosidad del sustrato (Roche, 2012). De esta forma se utilizaron alturas de  $h \sim 3$  cm para representar la propagación de flujos piroclásticos de 1 o 10 m de espesor. En experimentos de Roche (Roche et al, 2012) se realizó un análisis dimensional detallado, el cual muestra la similitud entre flujos piroclásticos y los experimentos de ruptura de presa realizados. Además se sabe que las partículas finas del grupo A, según la clasificación de Geldart<sup>2</sup> (Geldart, 1973), son representativas de la matriz de cenizas encontrada en muchos flujos piroclásticos. De esta forma es como se llegó a utilizar principalmente partículas finas del grupo A, para estos experimentos. En este estudio se decide agregar otro tamaño de partículas finas perteneciente al grupo B, según la misma clasificación, para poder ampliar el muestreo ya realizado y observar de qué forma influye el tamaño de estas partículas en los experimentos a realizar.

En experimentos de ruptura de presa, la presencia de lechos rugosos, como se mencionó en el capítulo anterior, permite que el frente de partículas alcance distancias que casi duplican a aquellas alcanzadas en el caso de tenerse fondo liso (Chedeville & Roche, 2014; Roche et al., 2014). Los tamaños de partícula usados en el lecho del canal fueron de  $d_0 = 0.08, 0.2, 0.35, 0.5, 0.7, 1.5, 3, \text{ y } 6$  mm, en donde se encontró una relación positiva entre rugosidad y avance del frente, para rugosidades en el rango de 0.08 – 3 milímetros, como se muestra en la *Figura 2.1*.

Otro parámetro importante que involucra al conjunto de partículas finas, es el de coeficiente de difusión hidráulica “D” (Iverson, 1997). Su escala de tiempo característico  $\Delta t$  aumenta con  $H^2/D$ , es decir, aumenta al tenerse columnas más grandes, o al tenerse partículas más finas (menor valor de D). Este parámetro afecta principalmente a partículas del grupo A de Geldart ( $< 0.1$  mm), y gran parte del grupo B.

En este estudio se consideran tres materiales para ser usados como lecho: esferas de vidrio de 1mm y 2mm, y arena de 3 mm de diámetro medio (*Figura 2.2*).

---

<sup>2</sup> Revisar Anexo A sobre la clasificación de Geldart.

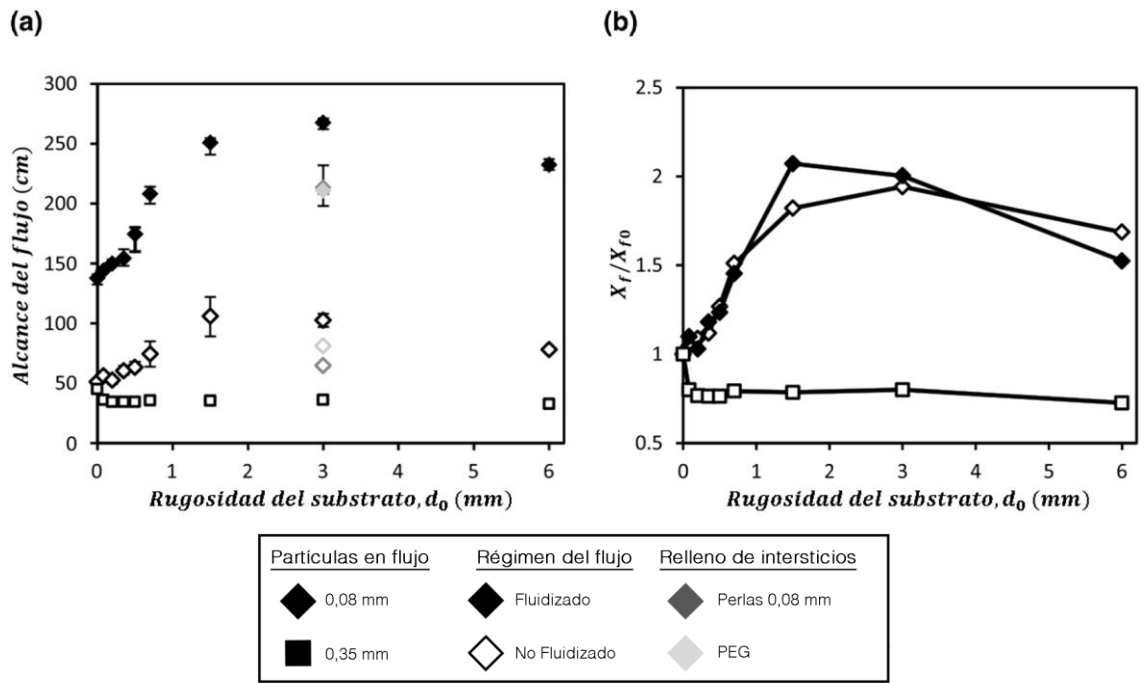


Figura 2.1. Relación entre la distancia del alcance del flujo y la rugosidad del lecho ( $d_0$ ). (a) Datos obtenidos. (b) Alcance del runout ( $x_f$ ) normalizado en relación al runout de flujos sobre sustrato suave ( $x_{f0}$ ). (Chedeville & Roche, 2014).

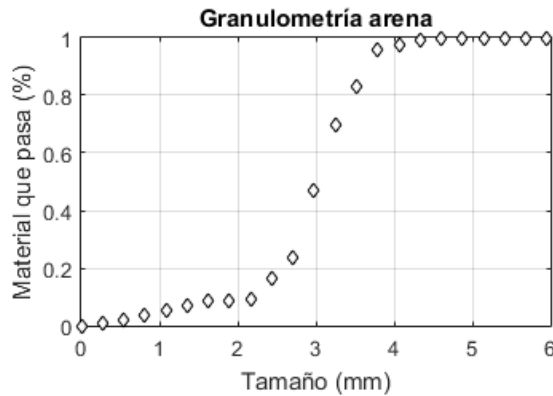


Figura 2.2. Granulometría de arena utilizada como lecho.

La columna de partículas finas estará compuesta de microesferas, y se utilizarán dos tamaños distintos:  $75 \mu\text{m}$  y  $150 \mu\text{m}$  de diámetro medio (Figura 2.3). Las microesferas de  $d_m = 75 \mu\text{m}$  serán denominadas "partículas A", y se encuentran dentro del grupo A según la clasificación de tamaños de Geldart [1973]. Por otra parte, las microesferas de  $d_m = 150 \mu\text{m}$  serán denominadas "partículas B", las cuales se encuentran en el grupo B de la misma clasificación.

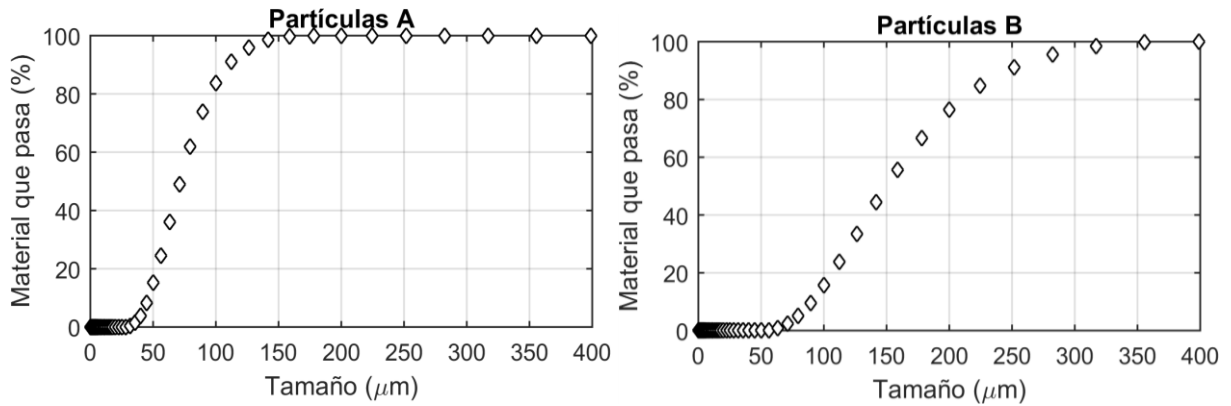


Figura 2.3. Granulometría de partículas A ( $d_m = 75 \mu\text{m}$ ) y partículas B ( $d_m = 150 \mu\text{m}$ ).

## 2.2. Estudios sobre columnas de material granular

En los experimentos de colapso de columnas de partículas finas realizados por Homan (2014), se ha utilizado un contenedor cuya sección interna mide  $14 \times 14 \text{ cm}^2$ , y alturas de columnas de partículas finas de  $40 \text{ cm}$  (Figura 2.4).

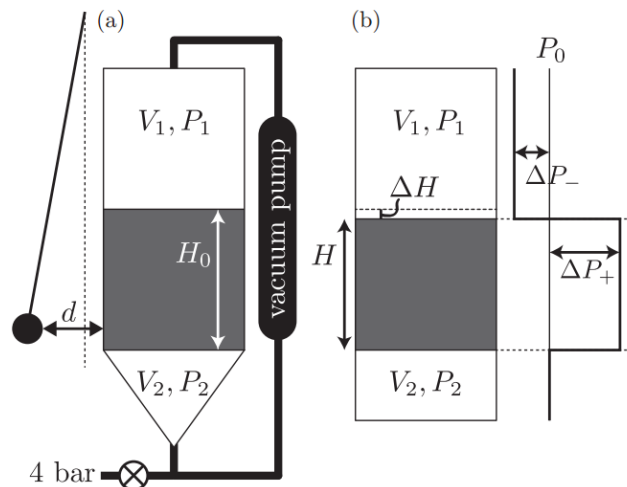
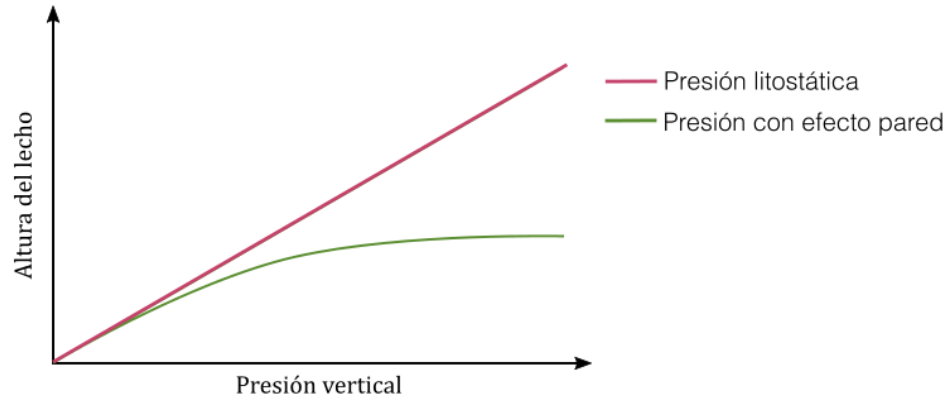


Figura 2.4. Montaje realizado por Homan (2014). (a) Esquema del montaje experimental, que corresponde a un contenedor con arena en su interior y un sistema de inyección de aire desde la base. El flujo de aire se detiene lentamente, formando una columna de altura  $H_0$ , y luego se impacta el contenedor con una bola de acero. (b) Nomenclatura de las variaciones de presión y altura de la columna que ocurren tras cada impacto.  $\Delta P_-$  es una baja de presión y  $\Delta P_+$  es un alza de presión, ambos con respecto a la presión inicial  $P_0$ .

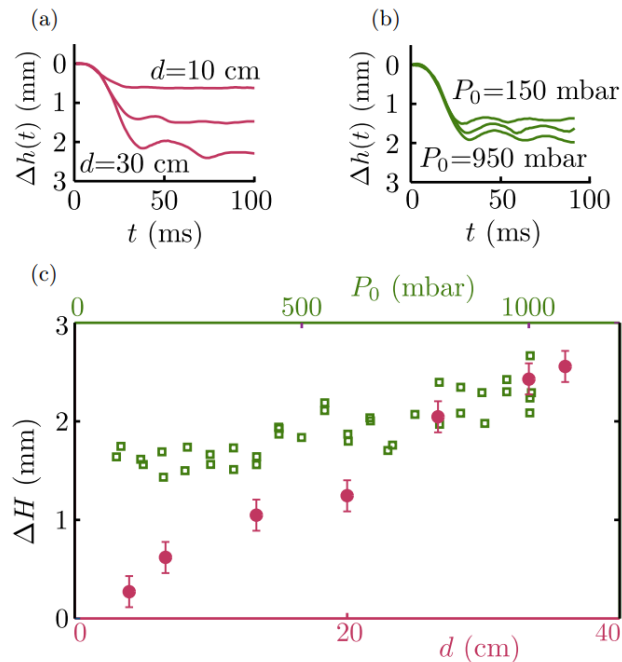
Esta altura fue escogida para poder conocer bien la presión vertical de la columna de arena bajo consideración de que existe efecto de roce entre las partículas y la pared. Este efecto es llamado efecto pared, o efecto Janssen (1895). La presión vertical real siempre es menor a la presión litostática, como se muestra en la Figura 2.5. Las presiones estimadas por Homan caen en el

tramo en que la presión vertical se vuelve prácticamente constante. Por este motivo se decide ocupar la misma altura para la columna de partículas finas en los presentes ensayos.



**Figura 2.5. Presión vertical de una columna de material granular, con y sin efecto de pared.**

Los resultados de los experimentos de Homan (2014), se muestran en la *Figura 2.6*. El resultado más relevante para el presente trabajo es el hecho de que la variación de altura por impacto,  $\Delta h$ , es menor al ser menor la presión del medio. Es decir, la presencia del aire permite un mejor acomodo de las partículas durante su colapso.

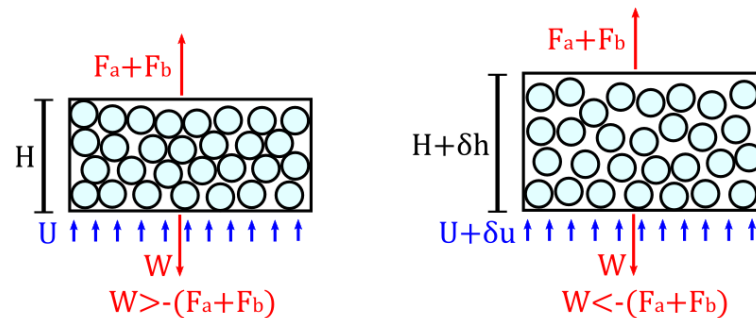


**Figura 2.6. (a) Descenso  $\Delta h(t)$  para distintas distancias de liberación del péndulo. (b) Descenso  $\Delta h(t)$  para varias presiones ambientales, y distancia de liberación de 30 cm. (c) Descenso total  $\Delta H$  aumenta linealmente con la distancia de liberación del péndulo (eje en rojo y círculos), mientras que la compactación del lecho es levemente menor para presiones ambiente  $P_0$  más bajas (eje verde, cuadrados abiertos).**

## 2.3. Fluidización de partículas y ensayos de ruptura de presa

Se entiende por fluidización al sostenimiento del peso de una partícula, o de un conjunto de éstas, mediante un flujo de aire ascendente. En el presente punto se explicará cómo se describe físicamente la fluidización, y cómo se relaciona con los ensayos experimentales de este trabajo.

Para establecer las ecuaciones que rigen a este fenómeno se considerarán las variables ilustradas en la Figura 2.7, en donde también se muestra la condición bajo la cual un lecho alcanza la fluidización.



**Figura 2.7. Equilibrio de fuerzas en torno a la velocidad mínima de fluidización,  $U_{mf}$ , en donde  $W$  es el peso del conjunto de partículas,  $U$  es la velocidad de aire ascendente,  $F_a$  es la fuerza hidrodinámica de arrastre,  $F_b$  es la fuerza boyante de las partículas inmersas en aire.**

$$F_t = F_g + F_a \quad 2.1$$

La fuerza total,  $F_t$ , corresponde a la suma de las fuerzas gravitacionales,  $F_g$ , con las fuerzas hidrodinámicas de arrastre,  $F_a$ . A su vez,  $F_a$  corresponde a la suma del peso del conjunto de partículas,  $W$ , con las fuerza boyante de las mismas,  $F_b$ .

$$F_g = W - F_b \quad 2.2$$

$$F_g = (\rho_p - \rho_f)gV_p \quad 2.3$$

En la ecuación 2.3,  $\rho_p$  corresponde a la densidad de las partículas,  $\rho_f$  es la densidad del fluido,  $g$  es la aceleración de gravedad, y  $V_p$  es el volumen de las partículas. El volumen de las partículas puede ser escrito en función de la porosidad como  $AH(1 - \phi)$ .

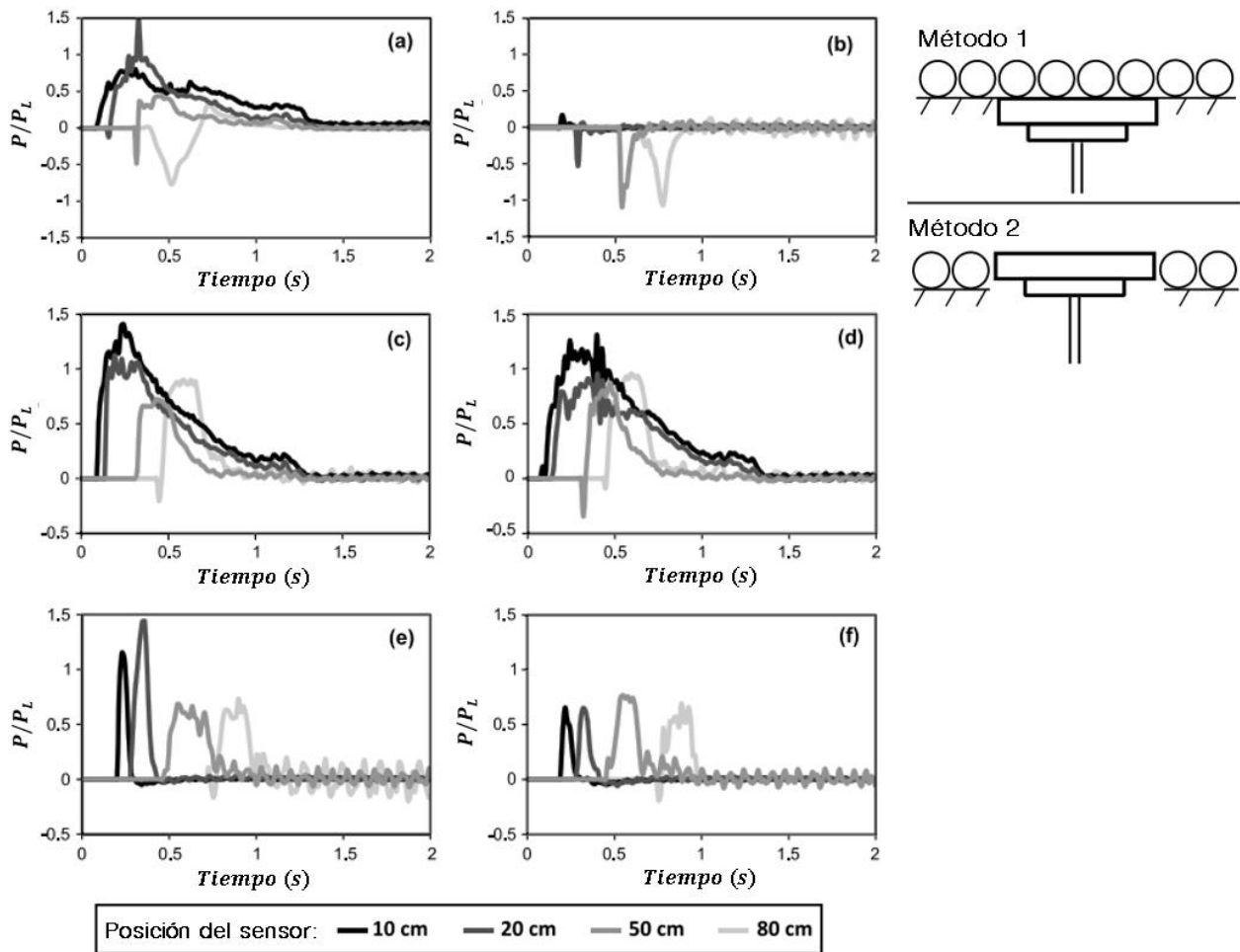
Las ecuaciones 2.4 y 2.5 definen las fuerzas de arrastre, en donde  $\Delta P$  es la variación de presión a través de un lecho de partículas, y  $\nabla P$  es la variación de presión local.

$$F_a = \Delta P A \quad 2.4$$

$$\Delta P = \int_0^H \nabla P(z) dz \quad 2.5$$

La fuerza de arrastre en los ensayos de este trabajo no será dada por un flujo de aire inyectado desde la base, sino que el mismo aire presente en los intersticios de la columna de partículas finas y en el lecho será comprimido generando un aumento de presión.

En los experimentos de ruptura de presa realizados por Cedeville y Roche (2014), se estudiaron las presiones de poro medidas en la base del lecho del canal durante el flujo de partículas finas, desde su liberación a través de la compuerta hasta que se asientan y vuelven a quedar estáticas.



**Figura 2.8.** Presión de poro basal,  $P$ , normalizada a la presión litostática,  $\rho_L = \rho_s \varepsilon_s g h$ , siendo  $\rho_s \varepsilon_s$  la densidad mixta del flujo ( $\sim 1450 \text{ kg/m}^3$ ),  $g$  la aceleración de gravedad, y  $h$  el espesor del flujo por sobre el sensor, en función del tiempo. El tiempo cero corresponde al inicio del flujo al abrirse la compuerta, y la presión de poros fue medida a distintas posiciones desde la compuerta. Los resultados mostrados corresponden a flujos sobre superficie lisa (a) inicialmente fluidizados e

(b) inicialmente no fluidizados, y a flujos sobre un substrato de esferas de 3 mm inicialmente fluidizados, utilizando (c) el método 1 y (d) el método 2, o inicialmente no fluidizados, utilizando (e) el método 1 y (f) el método 2. Notar que los valores negativos de la presión normalizados a la presión litostática no tienen sentido acá; estos valores solamente son preservados para mostrar que ocurren subpresiones en el frente del flujo (Chedeville & Roche, 2014).

Los resultados (Figura 2.8) muestran que un flujo de partículas inicialmente fluidizadas sobre un fondo liso genera sobrepresiones del orden de magnitud de la presión litostática, sobre todo en los primeros sensores. En el mismo caso, cuando no se realiza fluidización inicial no se ve un aumento de presión. La sobrepresión está directamente relacionada con el alcance final del flujo (Figura 2.9). Las sobrepresiones vuelven a ocurrir bajo fluidización inicial y rugosidad del substrato de distintos diámetros. El caso de mayor interés es el de ensayos sin fluidización inicial sobre substratos rugosos, ya que las presiones medidas muestran que existe fluidización del flujo, mostrando evidencia de mecanismos de auto fluidización.

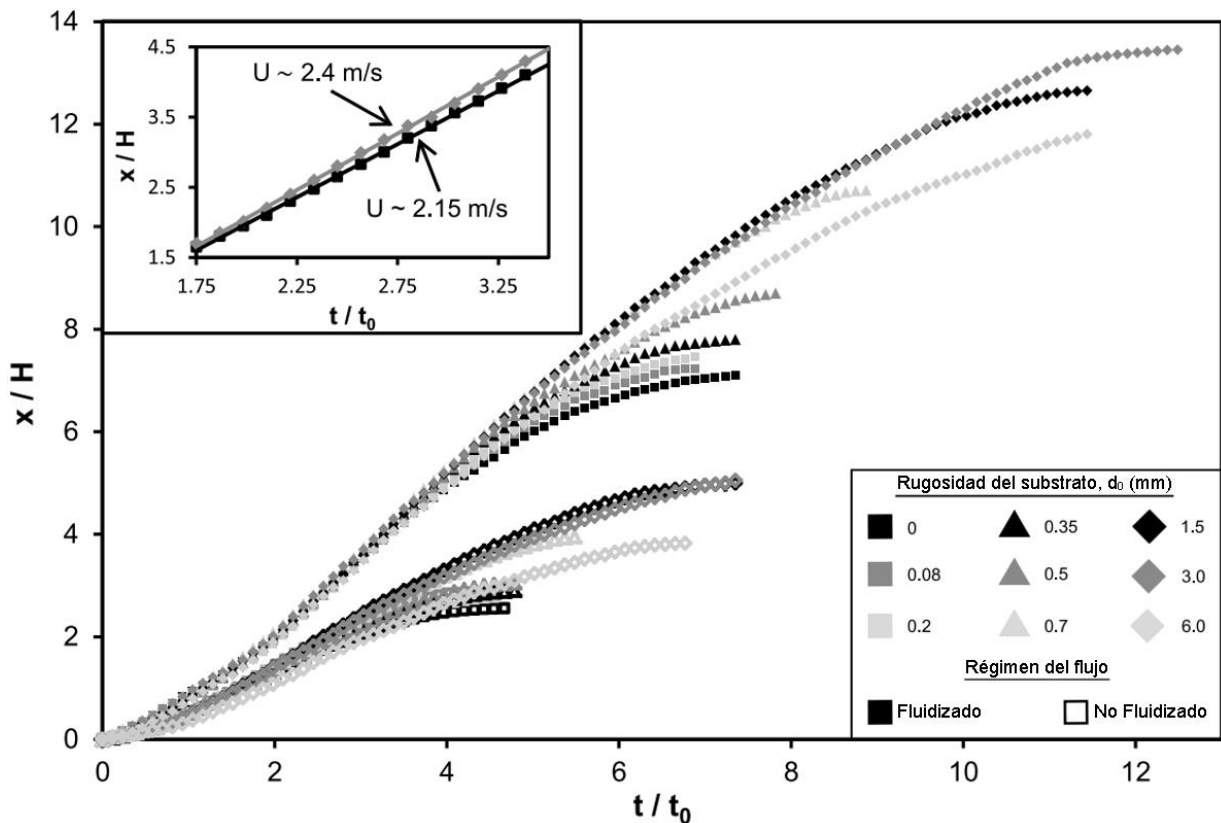


Figura 2.9. Datos del frente de los flujos de partículas ( $d_m = 80\mu m$ ) inicialmente fluidizadas (símbolos rellenos) e inicialmente no fluidizadas (símbolos abiertos) sobre substratos de distinta rugosidad. La posición del frente normalizado a la altura inicial de la columna ( $H$ ) es representado como función del tiempo normalizado a  $t_0 = (H/g)^{1/2}$ . El cuadro interior compara los casos bajo fluidización inicial de substrato liso y substrato rugoso de  $d = 3mm$ , durante el régimen de velocidad constante (Chedeville & Roche, 2014).

# Capítulo 3

## Metodología experimental

En el presente capítulo se detallan tanto el ensamble del montaje como la metodología de ejecución de los ensayos.

Estos ensayos fueron realizados en el laboratorio de hidráulica Francisco Javier Domínguez, ubicado en la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile.

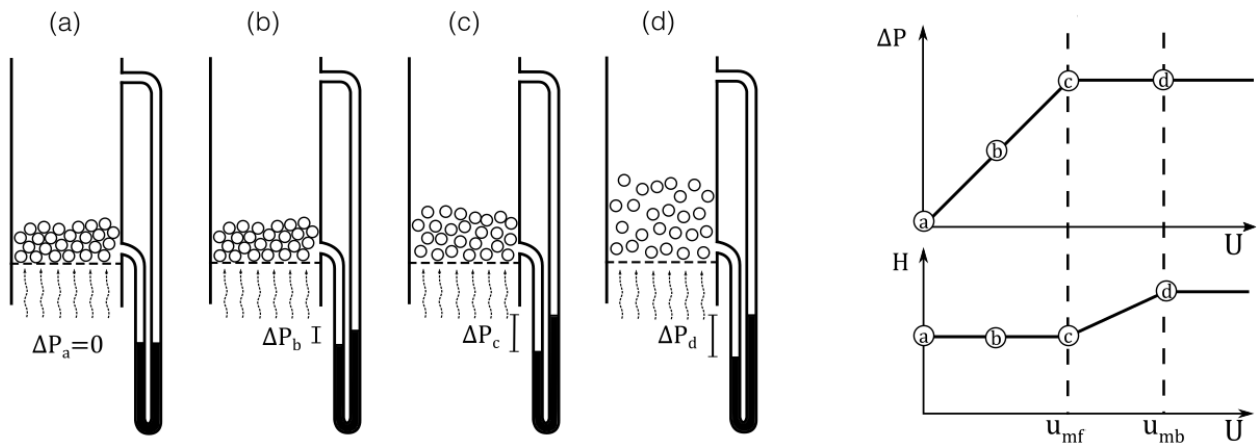
### 3.1. Consideraciones generales

Para poder diseñar un buen montaje experimental es necesario identificar los fenómenos presentes durante el desplazamiento de flujos granulares sobre lechos rugosos. Como se mencionó anteriormente, se ha decidido estudiar la percolación de partículas finas en un lecho de partículas cuyo diámetro es entre 7 y 40 veces mayor. Para esto, el montaje experimental debe permitir el aislamiento de ambos tipos de partículas y, a su vez, tener un mecanismo controlado que induzca percolación. Además se desea repetir los ensayos a presiones ambiente inferiores a la presión atmosférica.

La percolación producirá algunos fenómenos de interés que deben ser medidos. Por una parte, se generará un aumento de presión de poros en el lecho durante la percolación, el cual permitirá medir el nivel de fluidización que alcanzan las partículas finas en el proceso. Por otra parte, se espera que la forma y la rapidez con que ocurre la percolación varíe de acuerdo a la presión ambiente.

La fluidización es medida como la presión de poros del lecho dividida por la presión litostática de la columna de partículas finas, representando el porcentaje del peso de esta columna que es posible sostener mediante la diferencia de presión que existe entre el lecho y la atmósfera (*Figura 3.1*).





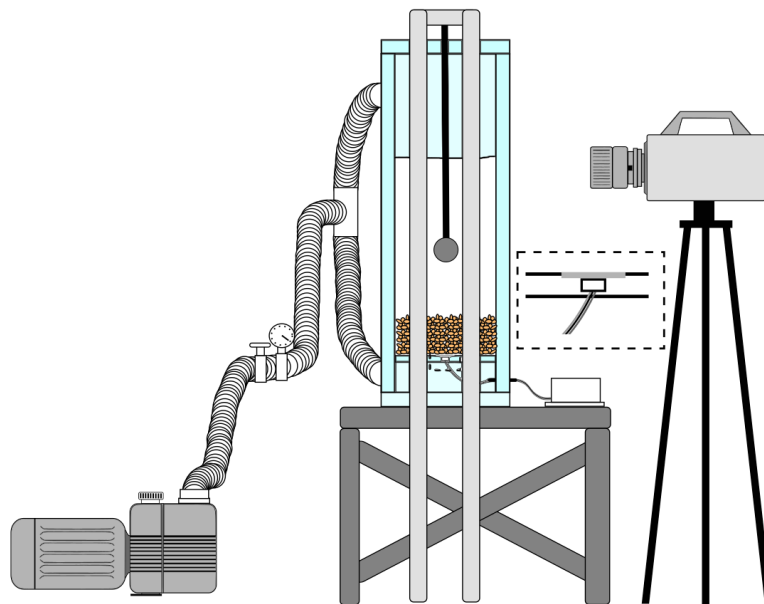
**Figura 3.1. Fluidización de un lecho de partículas del grupo “A” según la clasificación de Geldart (1973).  $U$  es la velocidad del flujo de aire inyectado desde la base,  $H$  es la altura del lecho y  $\Delta P$  es la variación de presión del aire entre el lecho y la atmósfera. Entre (a) y (c)  $\Delta P$  aumenta linealmente en función de  $U$ . Luego, entre (c) y (d)  $H$  aumenta linealmente en función de  $U$ . El valor  $u_{mf}$  es la velocidad mínima de fluidización, y  $u_{mb}$  es la velocidad mínima para que aparezcan burbujas y es en donde se alcanza la máxima altura posible del lecho.**

## 3.2. Montaje experimental

Se utiliza un contenedor de acrílico transparente de base cuadrada para colocar las partículas. Ya en otras experiencias en donde se ha trabajado con partículas en movimiento se ha utilizado acrílico como principal material para construir montajes (Roche et al., 2006, 2008, 2010, 2014; Lube et al., 2011; Girolami et al., 2008, 2010), ya que es una estructura firme y transparente, que soporta impactos y permite grabar videos. El contenedor puede sellarse al vacío, y está conectado a una bomba de alto vacío (Figura 3.2). Las paredes son lo suficientemente gruesas para no colapsar ante bajas presiones.

La base que sostiene al contenedor debe permanecer rígida, por lo cual su estructura es de metal y sus patas son ancladas al piso con pernos de expansión. El contenedor de acrílico es sujetado a la mesa mediante una jaula de metal.

Un sensor de presión es colocado en la base que sostiene al lecho, en un orificio hecho a su medida. La base es sellada herméticamente a las paredes, de modo que no existe flujo de aire a través de esta base. Sobre la base se colocan todas las partículas, bajo esta solamente se encuentra la parte trasera del sensor y su cableado. De esta forma, el sensor puede medir la diferencia de presión entre ambos lados de esta base, es decir, la diferencia entre la presión del aire en el lecho y la presión ambiente. Ambos espacios son conectados simultáneamente a la bomba de vacío. Entre el sensor y las partículas se coloca una placa porosa rígida que permite el paso del aire y no el de las partículas finas, para evitar que el sensor mida la presión que genera el peso de las partículas.



**Figura 3.2. Esquema del montaje experimental.**

El material granular es colocado sobre la base en donde se coloca el sensor de presión, colocándose primero las partículas gruesas y luego las partículas finas. La altura del lecho es de 9cm, mientras que la altura de la columna de partículas finas es de 40cm. La superficie de las partículas finas es grabada con una cámara de alta velocidad.

Para inducir la percolación de las partículas en el lecho se impacta lateralmente el contenedor con un péndulo. La ubicación del péndulo se muestra en la *Figura 3.2*.

Las variables utilizadas en este montaje son las siguientes:

- Columna compuesta de partículas finas de  $d_m = 75$  y  $150 \mu\text{m}$ .
- Lecho formado de esferas de 1 y 2 mm, y arena de  $d_m = 3\text{mm}$ .
- Presiones ambiente de 1 atm, 0,5 atm y 0,05 atm
- Dos tipos de impactos de péndulo a 1 atm, diferenciados según la distancia a la que es liberado el péndulo.

### 3.3. Percolación

En cuanto al mecanismo de vibración, se ha descartado la opción de generar vibraciones verticales, ya que es posible que se formen pilas, o montones, tanto en la columna como en el lecho, bajo ciertas condiciones de amplitud y frecuencia (Pak et al., 1994).

Para generar la percolación de partículas finas en el lecho se decidió utilizar un péndulo que impactara lateralmente al contenedor. Este impacto produce que las partículas en el interior del contenedor se suelten y penetren en el lecho. En experimentos realizados por Homan (2014), se hicieron ensayos de compactación de una columna de partículas finas a diferentes grados de vacío, para determinar el rol del aire en dicha compactación. Para compactar la columna se utilizó un péndulo para impactar el costado del contenedor de partículas. Se considera que este método de impacto es una forma sencilla y controlable de impactar al contenedor, ya que otras ideas con mayor nivel de automatización también requieren un mayor número de equipos y de un montaje más complejo.

## 3.4. Desarrollo de ensayos

En primer lugar se realizan pruebas aisladas de todos los equipos de medición y elementos mecánicos del montaje, para comprobar su correcto funcionamiento. Luego, se hacen más ensayos de prueba para crear una metodología o procedimiento general, considerando que en el proceso de montaje no debe ocurrir percolación de las partículas finas en el lecho antes de iniciado cada ensayo, y que exista un uso coordinado de los equipos de medición. Posterior a esto serán realizados los ensayos definitivos. Después de cada ensayo deben ser respaldados inmediatamente los datos.

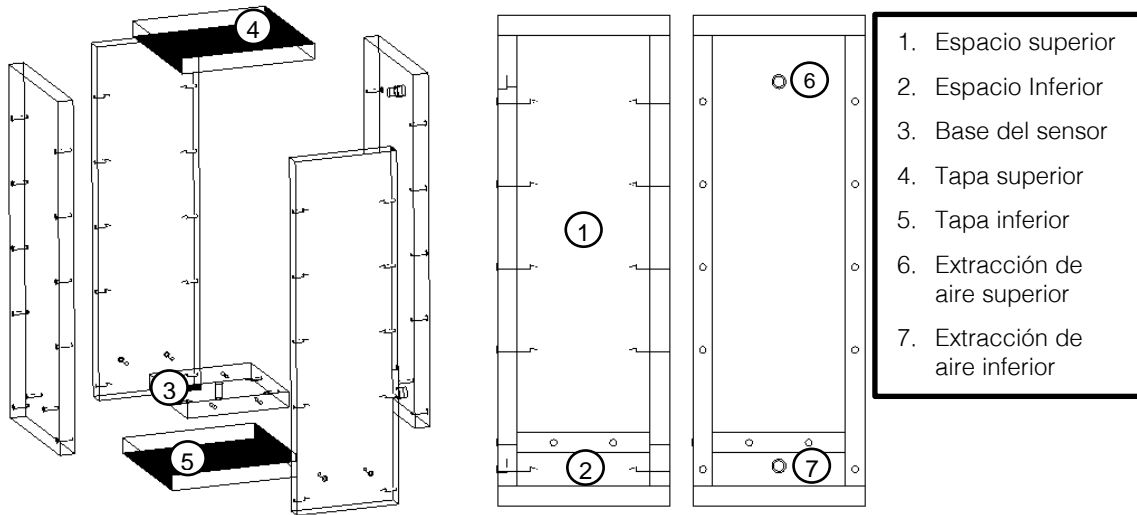
## 3.5. Equipamiento

### 3.5.1. Contenedor de acrílico

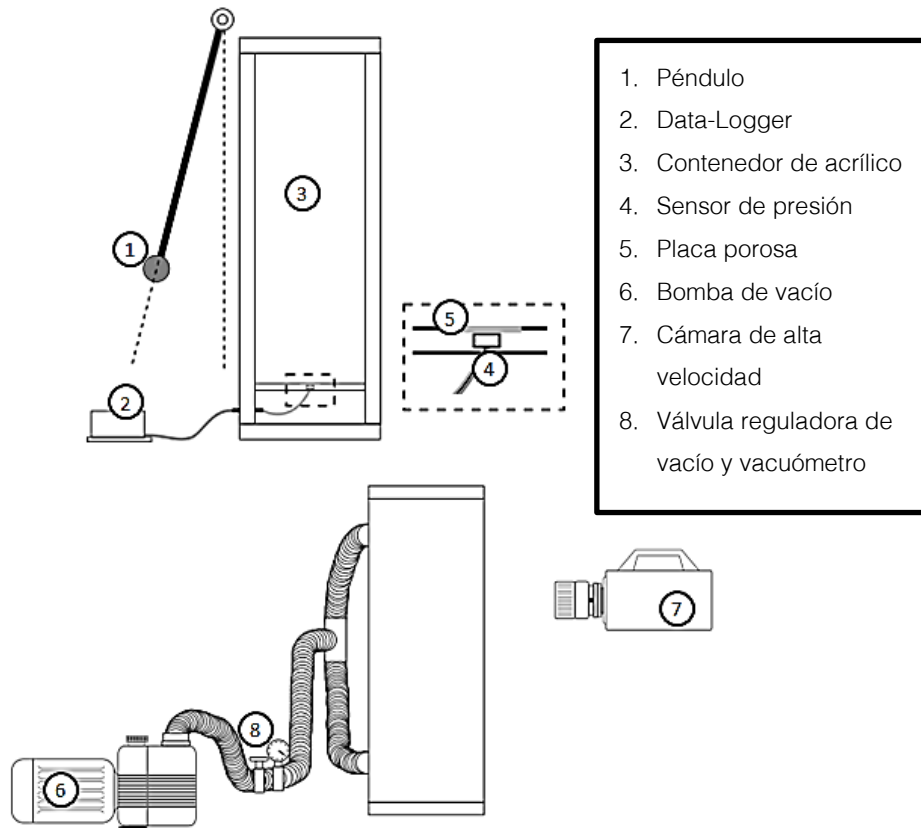
Se diseña un contenedor cuya área interna es de 14x14 cm (*Figura 3.3*). La altura máxima de llenado con partículas es de 60 cm. Para poder sellar el contenedor al vacío se han colocado o-rings tanto en las tapas como en los contactos entre muros, verificando que no queden espacios que puedan generar fugas de aire. Los o-rings de las tapas son lubricados para rellenar las porosidades, tanto del o-ring como del acrílico.

En el interior del contenedor de acrílico existen dos espacios separados entre sí, delimitados por una placa intermedia de acrílico de 1 cm de espesor. Esta placa es sellada herméticamente en su contacto con las paredes, de modo que no existe flujo de aire a través de esta placa. Un orificio atraviesa la placa intermedia en su centro, para colocar el sensor de presión, el cual cuenta con su propio o-ring para mantener el hermetismo de la placa (*Figura 3.4*). Sobre la placa se colocan las partículas finas y gruesas, mientras que bajo esta solamente se encuentra la parte trasera del sensor y su cableado. Entre el sensor y las partículas se coloca una placa porosa rígida que permite el paso del aire y no el de las partículas finas, para evitar que el sensor mida la presión que genera el peso de las partículas. Tanto el espacio que está sobre la placa como el que está bajo esta son conectados externamente por una manguera especial, y a su vez ambos espacios son conectados a una bomba de vacío (*Figura 3.4*). Esta manguera no colapsa ante el vacío.

La tapa inferior se encuentra siempre apernada, dejando encerrada la parte trasera del sensor de presión, que es de donde sale el cableado del mismo. Para transmitir los datos desde el interior cerrado hacia el exterior se han colocado metales conductores de corriente a través de la pared, colocándose entre los metales y el muro una pasta adherente de alta resistencia.



**Figura 3.3. Esquema de las piezas utilizadas para construir el contenedor de acrílico.**



**Figura 3.4. Esquema del montaje experimental. Perfil frontal y lateral.**

### 3.5.2. Péndulo

Este péndulo es empotrado al piso, sin contacto con la estructura que sostiene al contenedor, para evitar que la vibración del péndulo interfiera en las mediciones. El péndulo será soltado desde dos posiciones distintas (36,34 cm y 24,25 cm). En el caso de los ensayos a presión atmosférica se utilizan ambas posiciones. En el resto de los ensayos se utiliza únicamente la posición más distante (36,34 cm). Esto se debe a que en los ensayos de presión atmosférica se busca hacer un análisis más detallado de las sobrepresiones, mientras que en los ensayos a menor presión ambiente el análisis se centra en analizar las tasas de percolación por impacto. El golpe de péndulo desde la posición más distante (36,34 cm) es denominado “Impacto 1”, mientras que el golpe desde la posición más cercana (24,25 cm) es denominado “Impacto 2”.

La velocidad de impacto fue estimada de dos formas, mediante la ecuación de péndulo simple y mediante el rastreo del péndulo en una grabación a alta velocidad. Los valores obtenidos se muestran en la *Tabla 3.1*. La diferencia entre las velocidades máximas obtenidas se debe principalmente a la cercanía del lente al plano grabado, ya que los objetos que se encuentran a los bordes del cuadro de grabación están más lejos del foco que los objetos que se encuentran en el centro.

**Tabla 3.1. Especificaciones de los impactos de péndulo.**  $L$  es el radio de giro del péndulo,  $\alpha$  es el ángulo de liberación del péndulo,  $m$  es la masa del conjunto bola-barra,  $u$  es la velocidad de la bola,  $g$  es la aceleración de gravedad y  $h$  es la altura inicial de la bola desde el punto más bajo que recorre el péndulo.

Parámetro	Unidades	Valor Impacto 1	Valor Impacto 2	Ecuación
Distancia de impacto	cm	36,34	24,25	-
Radio péndulo	cm	46,5		-
Masa péndulo	kg	0,514		-
Masa barra	kg	0,220		-
Radio centro de masa	m	0,392		-
Velocidad máxima calculada	m/s	2,016	1,260	$\sqrt{2gL(1 - \cos(\alpha))}$
Velocidad máxima medida	m/s	2,027	1,474	-
Energía del sistema	J	1,491	0,816	$mgh = \frac{1}{2}mu^2$

### 3.5.3. Cámara de alta velocidad

Para registrar los fenómenos se utiliza una cámara de alta velocidad, capaz de grabar hasta 4000 fps, dependiendo de la resolución de la imagen.



**Figura 3.5. Cámara Photron Fastcam SA3.**

La cámara de alta velocidad se utiliza para grabar el descenso de la superficie de la columna de partículas finas. El modelo de la cámara es Fastcam SA3, de la marca Photron (*Figura 3.5*). La resolución máxima de esta cámara es de 1024x1024 píxeles, para la cual se pueden grabar 4 segundos a 2000 fps. Para grabar a una mayor cantidad de cuadros por segundo es necesario disminuir la resolución. El modelo del lente utilizado es Nikon 60mm f/2.8, el cual es un lente macro y cuya resolución permite observar descensos del orden de las décimas de milímetro. La configuración de grabación de la cámara de alta velocidad es realizada mediante el software Photron Fastcam Viewer, proporcionado por el mismo fabricante de la cámara de alta velocidad.

#### 3.5.4. Cuarto Oscuro

Los videos grabados a alta velocidad muestran fluctuaciones en la intensidad de la luz, ya que la iluminación del laboratorio es alimentada por corriente alterna. Para evitar que esto suceda se construye un cuarto oscuro, dentro del cual se instala un foco led que se alimenta de corriente continua. La fuente de corriente continua es una batería de 12V y capacidad de 100Ah. El foco led tiene una potencia de 30W.

Es importante verificar que el foco entregue una pantalla de luz uniforme sobre la zona que es filmada, sobre todo considerando que el acrílico refleja bastante la luz. Con este propósito se ha colocado papel diamante sobre el foco, para dispersar la luz que emite el foco. Además, se ha evitado apuntar directamente el foco a la zona que es filmada.

#### 3.5.5. Bomba de vacío

Una bomba de alto vacío generará la disminución de presión interna del contenedor. El modelo de la bomba de vacío es DC.16D, marca D.V.P (*Figura 3.6*).

Esta bomba de vacío cuenta únicamente con un interruptor de encendido y apagado. Para regular la presión dentro del contenedor se utiliza una válvula reguladora y un vacuómetro, colocados en serie.



**Figura 3.6. Bomba de alto vacío D.V.P. DC.16D.**

### 3.5.6. Sensor de presión

Para medir la presión de poros en el lecho es necesario instalar un sensor de presión (*Figura 3.7*) en el centro de la base que sostiene al lecho. Para evitar medir la presión litostática se debe utilizar un medio que permita únicamente el paso del aire. Para esto se utiliza una placa porosa de 0.96mm de espesor. Esta placa queda introducida en una ranura circular por sobre la posición del sensor de presión, para lograr que el fondo del contenedor quede plano.

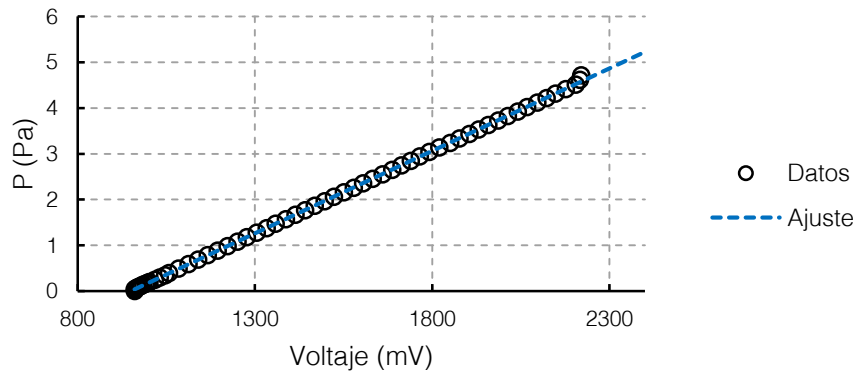
El sensor de presión utilizado puede medir entre 0 y 1 psi. En experimentos de ruptura de presa, el avance de partículas finas fluidizadas genera presiones que como máximo se aproxima a valores de 1 psi, al comienzo del canal (Chedeville & Roche, 2014; Roche et al, 2010). En el caso del presente estudio se espera que las diferencias de presiones a medir sean inferiores a 0,3 psi (2,07 kPa).

El sensor de presión utilizado no entrega datos en unidades de presión, sino que entrega datos en mili-voltios (mV). Para encontrar la relación entre voltaje y presión se debe hacer una calibración. El método de calibración consiste en medir la presión de una columna de agua con el sensor de presión. De esta forma se puede asociar la presión hidrostática ( $P_{Hid} = \rho gh$ ) con el voltaje registrado por el sensor (*Figura 3.8*).



**Figura 3.7. Sensor de presión, fabricado por Measurement Specialties.**

El sensor está fabricado de forma que las variaciones de voltaje son directamente proporcionales a las variaciones de presión. Por lo tanto, se ajusta una recta a los pares de datos obtenidos.

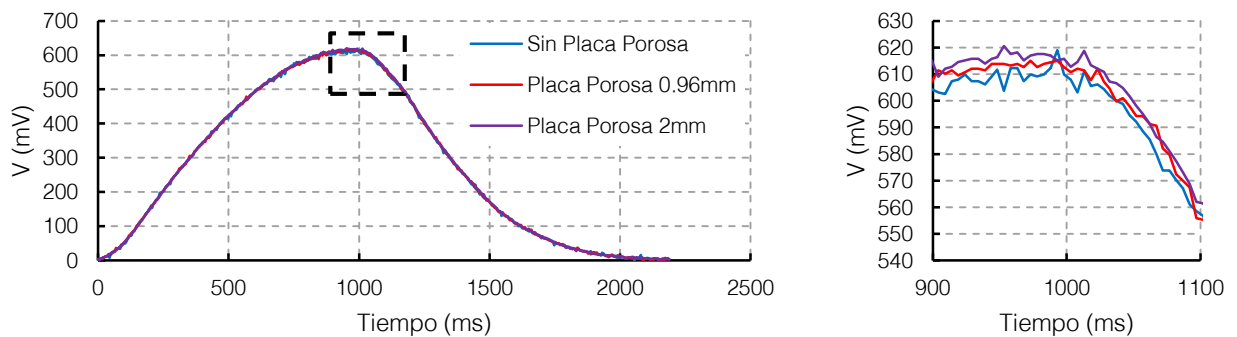


**Figura 3.8. Calibración del sensor de presión. La presión corresponde a la columna de agua, y el voltaje corresponde a la medición del sensor de presión.**

### 3.5.7. Placa porosa

Como se menciona en el punto anterior, una placa sólida de textura porosa es colocada sobre el sensor de presión. Existe una ranura en la base que permite que el fondo del contenedor quede plano al colocar la placa porosa. La placa es capaz de resistir el peso de la columna de material fino, sin deformarse al punto de llegar a tocar el sensor.

Se estudia la posibilidad de que la placa porosa pueda atenuar los valores de presión de aire. Es medido un pulso de presión con 3 sensores simultáneamente, bajo 3 configuraciones distintas: sin placa porosa, con placa porosa de 0,96mm de espesor, y con placa porosa de 2mm de espesor. Los resultados obtenidos (*Figura 3.9*) no muestran indicio de alguna alteración significativa entre los valores obtenidos con y sin placa porosa.

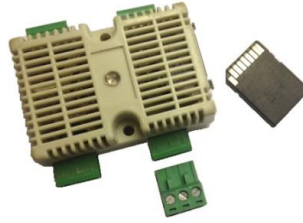


**Figura 3.9. Ensayo de retardo por uso de placas porosas.**

### 3.5.8. Data logger

El voltaje medido por el sensor de presión es registrado mediante un data logger (*Figura 3.10*), el cual es controlado por un software dedicado. El data logger graba los datos a una memoria SD, a una tasa de 200 mediciones por segundo. El control desde el computador se realiza mediante un cable de datos USB para teléfonos móviles.





**Figura 3.10. Data logger y accesorios.**

### 3.5.9. Programas computacionales utilizados

Los videos son traspasados desde la memoria interna de la cámara de alta velocidad al computador mediante un cable de red de categoría 5. Este traspaso de información se gestiona mediante el programa Photron Fastcam Viewer.

Mediante Matlab R2013b se analizan los datos que se obtienen del sensor de presión. Además fueron creados scripts para hacer el tracking, o seguimiento, del descenso de la columna de partículas finas. Un modelo numérico para resolver la ecuación de difusión en 1-D fue programado en este programa también.

Para medir la velocidad del péndulo al momento del impacto, fue utilizado el programa Open Vision Control, el cual es un programa de tracking, o seguimiento de objetos en movimiento.

También se utilizó Microsoft Excel para analizar datos.

## 3.6. Montaje de un experimento

El montaje de un experimento se divide en varias etapas, desde procesos que se realizan al material que se utiliza en los ensayos hasta el mantenimiento y correcto ensamble de los equipos.

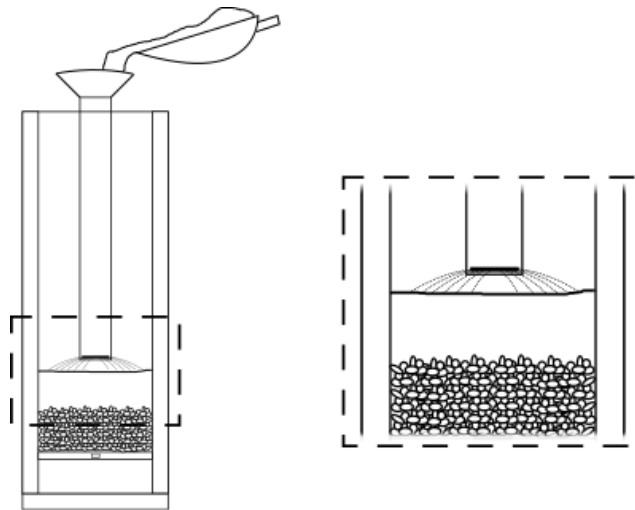
### 3.6.1. Preparación del material granular

Las partículas finas y gruesas son colocadas en un horno a 150°C, por al menos 90 minutos. Luego, las partículas finas son dejadas en reposo por aproximadamente 120 minutos, en un lugar cubierto de la intemperie para que no se humedezcan. Las partículas gruesas se mantienen cubiertas hasta que alcancen una temperatura ambiente. Las partículas finas son colocadas en un contenedor que inyecta aire desde su base, para ser aireadas durante una o dos horas, hasta que alcancen la temperatura ambiente. El aire que es inyectado pasa por dos filtros de humedad.

### 3.6.2. Colocación del material granular

En primer lugar, se coloca un lecho de partículas gruesas compactado de 9 cm de altura. Sobre este lecho se coloca una columna de partículas finas de 40 cm de altura, tratando de no compactarlas.

Para lograr un mínimo empaquetamiento las partículas finas se colocan por medio de un tubo vertical, el cual esparce horizontalmente las partículas en su parte inferior. Esto permite que en el eje vertical se genere una caída libre (Figura 3.11). El extremo inferior del tubo debe estar siempre cerca de la superficie, para evitar que las partículas alcancen velocidades excesivas que puedan generar compactación.



**Figura 3.11. Esquema del llenado del contenedor con partículas finas.**

Una vez conseguida la altura deseada, la superficie es emparejada, para que la superficie se vea horizontal frente a la cámara. Para emparejar la superficie se utiliza un pincel de modo que el contacto entre partículas y el pincel no genere compactación.

Finalmente, la tapa superior del contenedor es apernada. Esta tapa tiene un o-ring en su parte inferior. Dado que tanto el o-ring como el acrílico tienen superficies porosas, se debe limpiar y lubricar con grasa ambas superficies, para que el o-ring pueda deformarse lo más posible y ocupar todos los espacios por donde pueda escapar aire.

Las densidades promedio de los depósitos son  $1.430 \pm 30 \text{ kg/m}^3$  y  $1.460 \pm 50 \text{ kg/m}^3$ , para las partículas A y B respectivamente.

### 3.6.3. Registro de datos

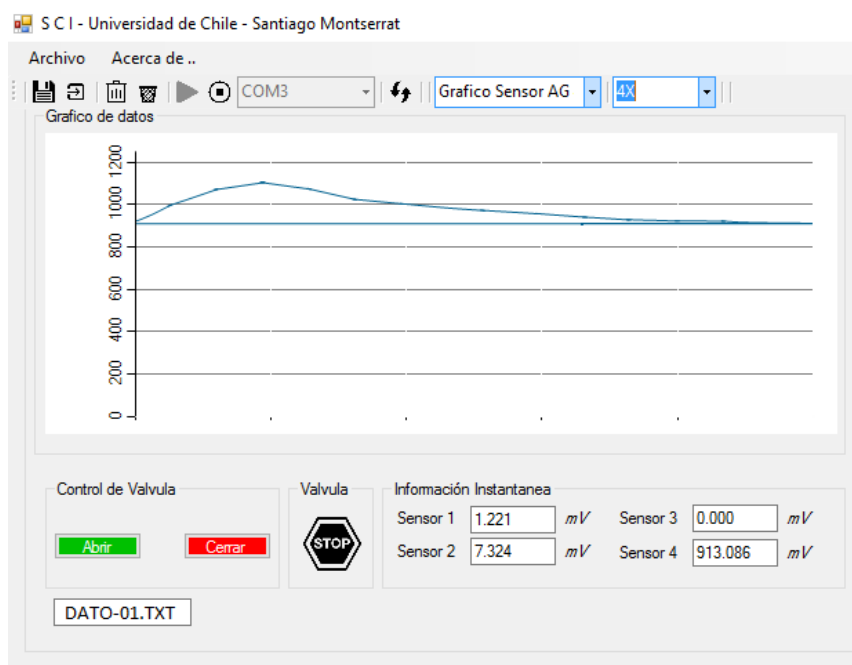
Se utiliza una resolución de 512x128 píxeles, enfocando la imagen en la superficie de la columna de partículas finas, y una tasa de 1000 fps, con lo cual se pueden grabar 80 segundos. Se utiliza un sistema de gatillo, el cual permite grabar videos de 1 segundo cada vez que se presiona el

botón de grabar. De esta forma es posible registrar hasta 80 impactos de péndulo por ensayo, antes de tener que respaldar los videos al computador.

Antes de comenzar un ensayo, se mide la presión ambiente durante al menos 30 segundos, para ver si es necesario corregir la calibración del sensor. Lo que se corrige en el ajuste lineal de la calibración no es la pendiente, sino la constante, ya que por experiencia se ha visto que la pendiente no varía, pero sí a veces esta constante mencionada.

El registro de la presión no presenta mayor uso de memoria. Una memoria microSD instalada en el data-logger es capaz de grabar varias horas de datos, por lo tanto estos datos son respaldados al final de cada ensayo. Un archivo *.txt* se crea al detenerse cada medición.

Cuando se realizan los impactos debe esperarse suficiente tiempo para que la presión de poros vuelva a ser la presión inicial. Para saber cuándo la presión ha vuelto a ser la inicial se utiliza un gráfico de voltaje en función del tiempo, el cual se actualiza en tiempo real, como se puede apreciar en la *Figura 3.12*.



**Figura 3.12. Gráfico de presión en tiempo real. Eje vertical corresponde a mediciones de voltaje, mientras que el eje horizontal se encuentra la línea de tiempo, la cual se actualiza en tiempo real durante un ensayo.**

### 3.7. Análisis de datos

Los datos numéricos registrados son procesados en Matlab y Excel, principalmente. Los videos son procesados a través del programa Photron Fastcam Viewer (PFV), y luego procesados mediante Matlab. Ambos procesos se describen a continuación.

### 3.7.1. Análisis de imágenes

Mediante el programa PFV, los videos son guardados como imágenes separadas, o cuadros. Se hacen los recortes necesarios para ahorrar recursos computacionales. Posteriormente, mediante Matlab se computa un script capaz de leer los cuadros guardados de cada experimento. Por lo general son realizados tres videos por experimento. Es necesario calibrar este script, mediante el ingreso de datos como la escala de conversión de pixeles a metros, la altura inicial de la columna, la altura del lecho, número de videos a unir, cuadros por segundo, entre otros.

El procesamiento de la imagen consiste en hacer un alto contraste en blanco y negro, para luego hacer un recorte de cada imagen, dejando una única columna en la cual se puede encontrar la posición de la interface de colores. La diferencia de posiciones entrega la diferencia de altura en pixeles, la cual es convertida a metros, y esta diferencia se resta a la altura inicial.

### 3.7.2. Análisis de las presiones

Las presiones son almacenadas por el data-logger en una tarjeta microSD, en archivos de texto, y luego son traspasados a un computador. Cada dato incluye un valor de voltaje, en mili voltios, y el valor del tiempo acumulado, en milésimas de segundo.

Los datos son trabajados a través de Matlab, principalmente. Los datos de presión obtenidos tienen una frecuencia de muestreo de aproximadamente 200 datos por segundo. Los valores son interpolados, para poder obtener valores a una frecuencia equivalente a la cantidad de cuadros por segundo con que se graban los videos de alta velocidad. De esta forma es posible graficar conjuntamente los datos de presión y los datos de altura en función del tiempo.

El resto del análisis en gran parte incluye un trabajo manual, debido a la forma en que son registrados los datos. Algunos datos son posibles de procesar mediante scripts, como obtener los valores máximos de presión, unir varios archivos con datos, convertir todos los datos de voltaje a presión y extrapolar datos. Pero gran parte de los datos, como el seguimiento de la altura de la columna de material fino, el aislamiento de valores máximos de presión por impacto, el registro de la altura final tras cada impacto, el unir temporalmente datos de presión con altura de la columna de partículas finas, son realizados en detalle de forma manual.

# Capítulo 4

## Análisis de resultados

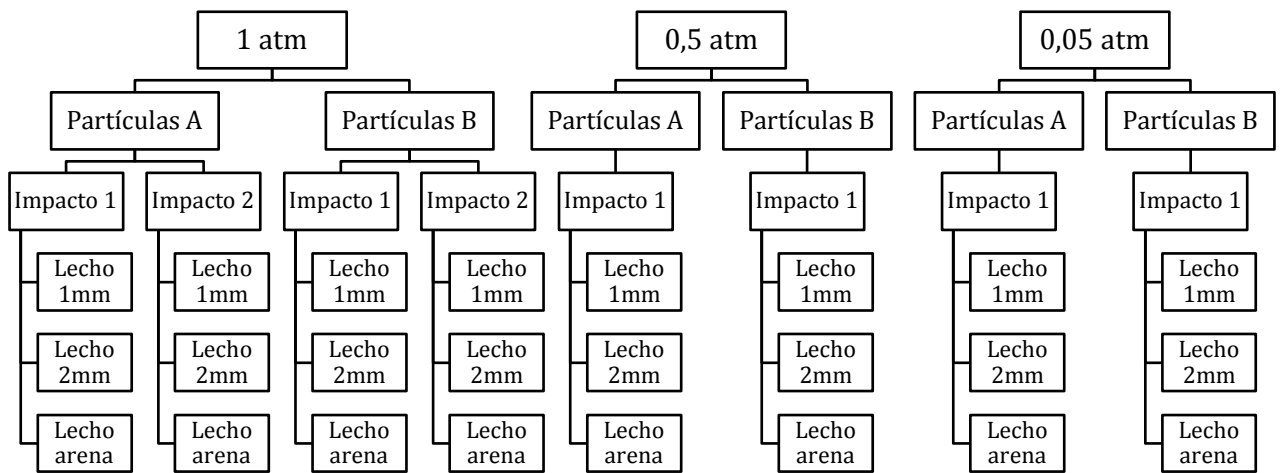
En el presente capítulo se muestran los resultados obtenidos de los ensayos experimentales, junto con su respectivo análisis.

Por ensayo se entenderá a todo el proceso de colocación de partículas finas y gruesas en el contenedor, realización de múltiples impactos de péndulo y medición de datos de presión y video.

En la *Tabla 4.1* se muestra la nomenclatura utilizada en este capítulo, y en la *Figura 4.1* se resumen los ensayos realizados.

**Tabla 4.1. Nomenclatura utilizada para presentar resultados.**

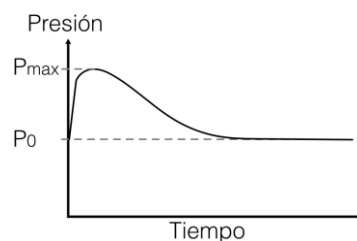
Variable	Descripción
Impacto 1	Golpe de péndulo liberado a una distancia de 36.34 cm del contenedor, $\alpha=51,34^\circ$
Impacto 2	Golpe de péndulo liberado a una distancia de 26,25 cm del contenedor, $\alpha=31,41^\circ$
Partículas A	Microesferas de vidrio de $d_m=75 \mu\text{m}$ , grupo A en la clasificación de Geldart.
Partículas B	Microesferas de vidrio de $d_m=150 \mu\text{m}$ , grupo B en la clasificación de Geldart.
Lecho d=1mm	Lecho uniforme compuesto de esferas de vidrio de 1mm de diámetro.
Lecho d=2mm	Lecho uniforme compuesto de esferas de vidrio de 2mm de diámetro.
Lecho arena	Lecho compuesto de arena de $d_m=3\text{mm}$ .
P atm	Presión ambiente de 1 atm = 101325 Pa = 14,69 psi



**Figura 4.1. Resumen de ensayos realizados.**

La nomenclatura utilizada en la redacción del capítulo y en los gráficos son las siguientes:

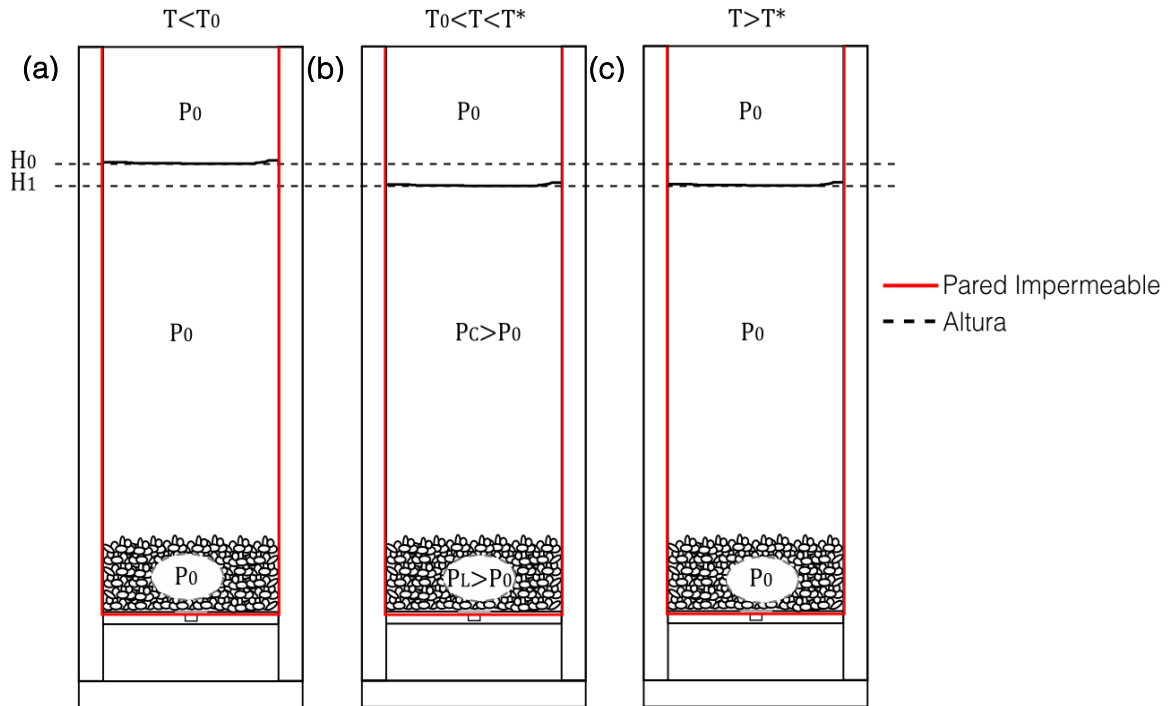
- $H_0$  : Altura inicial de la columna de partículas finas.
- $h$  : Altura de la columna de partículas finas.
- $\Delta h$  : Variación de altura de la columna de partículas finas debido a un impacto.
- $H_l$  : Profundidad, del lecho.
- $P_a$  : Presión de aire.
- $P_{lit}$  : Presión litostática de la columna de partículas finas definida como  $\rho_m g h$ , siendo  $\rho_m$  la densidad de la mezcla de partículas y aire.
- $P_v$  : Presión vertical de una columna de partículas finas.
- $P_0$  : Presión de aire inicial, o presión ambiente.
- $P_{max}$  : Presión de aire máxima alcanzada debido a un impacto.
- $\Delta P_a$  : Diferencia entre una presión medida  $P_a$  y  $P_0$ .
- $\Delta P_{max}$  : Diferencia de presión entre  $P_{max}$  y  $P_0$ .



**Figura 4.2. Variación de presión de aire debido a un impacto.**

## 4.1. Esquema de presiones y altura de columna

Es importante comenzar describiendo los fenómenos involucrados en los ensayos experimentales, de acuerdo a la configuración que se ha establecido en el montaje. En términos generales, la presión de aire y la altura de la columna de partículas finas varía de la forma que se muestra en la *Figura 4.3*, para un impacto de péndulo. Un ensayo consta de múltiples impactos, hasta que los intersticios del lecho se encuentren llenos de partículas finas, debido a la percolación. Los principales parámetros que serán tomados en cuenta serán la variación de altura y la variación máxima de presión registrada con respecto a la presión inicial.



**Figura 4.3. Variación de presión,  $P$ , y altura,  $H$ , durante un ensayo.  $T_0$  es el tiempo de impacto del péndulo, mientras que  $T^*$  es el tiempo en que cesan las variaciones de presión. (a) La presión en todas partes es la presión ambiente inicial,  $P_0$ . (b) La presión de aire del lecho,  $P_L$ , y la de la columna,  $P_C$ , aumentan con respecto a  $P_0$ . (c) La presión de aire en todas partes vuelve a ser  $P_0$ .**

La variación de la altura de la columna de partículas finas se mide tomando como referencia su altura inicial y luego sumando la variación de posición de su superficie desde las grabaciones con la cámara de alta velocidad. Estas grabaciones se realizan a una cercanía de 20 cm del contenedor aproximadamente, para obtener una buena resolución de imagen.

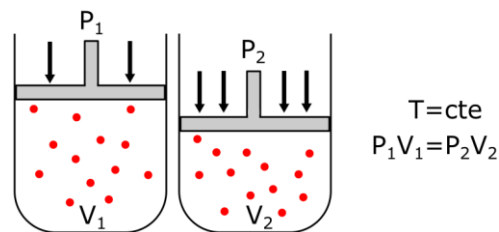
La presión del aire será medida en la base del lecho, en donde se encuentra el sensor de presión. La presión atmosférica es registrada mediante un sensor ubicado en el laboratorio de trabajo. Las presiones bajo la presión atmosférica son medidas mediante un vacuómetro análogo.

La presión de aire en la columna y en el lecho aumenta (*Figura 4.3-b*) debido a dos fenómenos. En primer lugar, al compactarse rápidamente la columna de partículas finas el aire atrapado en

sus intersticios se comprime, logrando que la presión de aire  $P_c$  aumente para luego difundirse hacia el lecho y hacia la atmósfera. En segundo lugar, al percolar rápidamente un volumen de partículas finas en el lecho el volumen de aire en el mismo se comprime, logrando un aumento de la presión  $P_L$ . En este caso el aire no puede escapar inmediatamente del lecho porque encima de este hay una columna cuya difusividad es baja para el aire, actuando como una tapa en los primeros instantes. La interacción de estas dos alzas de presión es lo que mide finalmente el sensor de presión, ya que hay intercambio de volumen de aire tanto en la interface lecho-columna como en la interface columna-atmósfera.

Para otorgar validez a lo recién mencionado, se ha considerado como válida la ley de Boyle en el instante de tiempo que tardan las partículas en percolar al lecho o lo que tarda la columna en compactarse.

La ley de Boyle es una ecuación que relaciona el volumen de un gas con su presión dentro de un contenedor o recipiente cerrado, dentro del cual a temperatura es constante. Más específicamente, lo que estableció Boyle en 1662 fue la ecuación de estado de los gases ideales,  $PV = nRT$ , bajo la condición de temperatura constante (*Figura 4.4*).



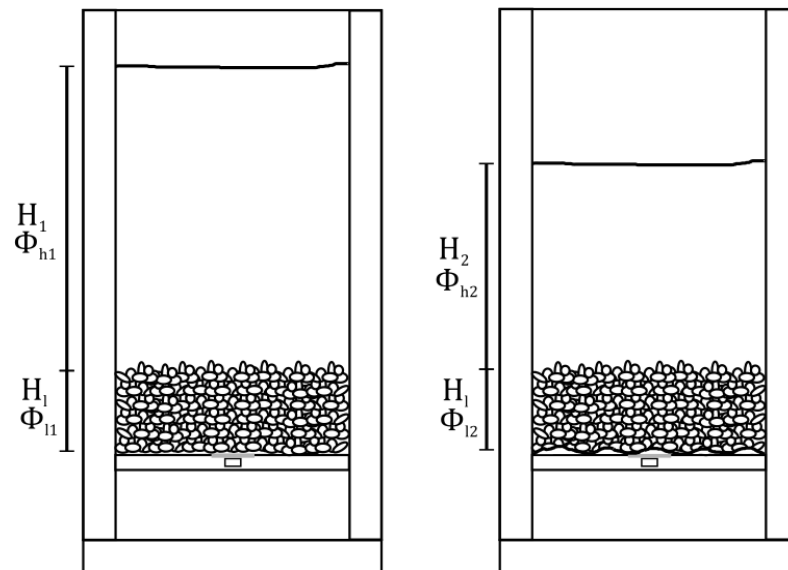
**Figura 4.4. Experimento realizado por Robert Boyle en 1662. Los puntos rojos representan a un gas atrapado en un contenedor. La tapa del contenedor es una prensa movable, la cual permite variar el volumen en donde es contenido el gas.**

El tiempo que tarda la percolación en ocurrir se asocia al tiempo en que ocurre la variación de la altura de la columna de partículas finas, la cual ocurre en aproximadamente 40ms. La presión máxima se alcanza entre 50 y 90ms, mientras que el tiempo difusivo<sup>3</sup> de la presión en la columna de partículas finas varía entre 630 y 1630ms. Estos datos respaldan a la ley de Boyle como un buen supuesto para explicar el origen de las sobrepresiones tanto en el lecho como en la columna, como se comentaba anteriormente.

En la *Figura 4.5* se muestra la variación total de la altura de la columna de partículas finas por el impacto de péndulo. Esta variación de altura se produce por percolación y compactación de forma simultánea y no es posible desagregar ambos efectos.

<sup>3</sup> Corresponde al tiempo característico que demora una variación de presión de aire dentro de un medio poroso en disiparse. El medio poroso es la columna de partículas finas de altura  $H$  y sección  $A$ , y  $D$  es el coeficiente de difusión de la presión en este mismo medio, siendo el tiempo difusivo igual a  $H^2/D$ .





**Figura 4.5.** El subíndice 1 indica la situación antes de un impacto de péndulo, mientras que el subíndice 2 indica el momento en que las partículas finas dejan de acomodarse producto del impacto.  $H_l$  es la altura del lecho.

## 4.2. Ensayos sin lecho

Aparte de los ensayos principales se realizaron otros ensayos adicionales, necesarios para entender y estudiar otros fenómenos que afectan a los resultados principales.

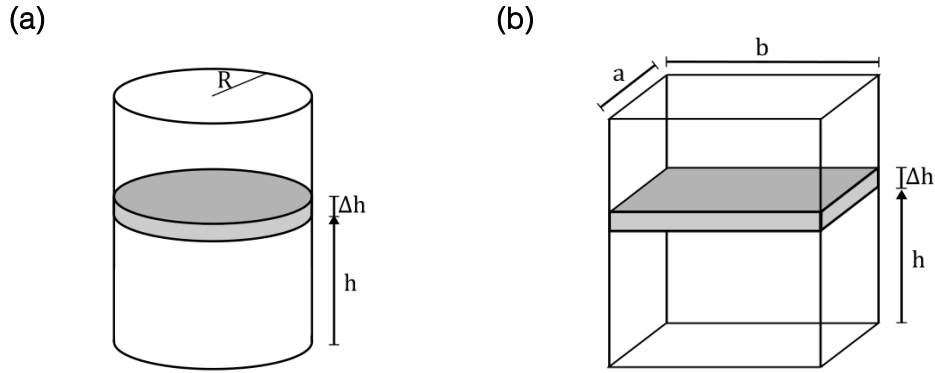
En esta sección se muestran los resultados de algunos ensayos realizados en ausencia de lecho, es decir, colocando solamente partículas A o B dentro del contenedor. El fin de estos ensayos es aportar cierta información que ayudará a analizar los resultados generales, que son los que provienen de los ensayos resumidos en la *Figura 4.1*.

### 4.2.1. Efecto de pared

El efecto de pared, conocido como efecto Janssen (H.A. Jansen, 1895), es un fenómeno que ocurre en los silos, y consiste en estimar la presión vertical del material almacenado considerando que existe roce entre este material y las paredes. Este es un efecto que también está presente en los ensayos experimentales del presente trabajo. Se debe conocer en qué medida este fenómeno puede afectar a las mediciones.

El roce entre partículas y las paredes produce que la presión vertical del material sea menor al valor teórico, estimado como  $\rho_m g h$ , en donde  $\rho_m$  es la densidad de la mezcla de material y aire.

Para estimar la presión vertical efectiva, Janssen realiza un equilibrio mecánico de fuerzas, para una columna de altura  $\Delta h$  y sección circular de radio  $R$ . Las ecuaciones derivadas de este equilibrio se muestran a continuación.



**Figura 4.6. Volumen de control sobre el cual se realiza el equilibrio de fuerzas.**

$$\pi R^2 \frac{dp_v}{dh} dh + 2\pi R \Delta h \mu K p_v = \pi R^2 \Delta h \rho_m g \quad 4.1$$

En la ecuación 4.1,  $p_v$  es la presión vertical,  $\mu$  es el coeficiente de fricción estático,  $K$ , es el coeficiente de fricción  $p_h/p_v$ , siendo  $p_h$  la presión horizontal,  $\rho_m$  la densidad de la mezcla aire-partículas, y  $h$  la altura del lecho de partículas.

El primer término del lado izquierdo de la ecuación 4.1 corresponde a la fuerza vertical producto de la variación de presión entre las alturas  $h$  y  $h + \Delta h$ , mientras que el segundo término de la misma ecuación corresponde a la fuerza de roce resultante de la fricción entre la pared y el material contenido. Al lado derecho de la misma ecuación se encuentra la fuerza ejercida por el peso del volumen de control.

Esta ecuación considera los siguientes supuestos:

- La presión vertical es constante en todo el plano horizontal.
- $K$  es constante en todo el espacio.
- La fricción del muro sostiene parte de la presión vertical al contacto con el muro.
- La densidad del material es constante a toda profundidad.

Si consideramos el término  $\Lambda = \frac{R}{2\mu K}$  en la ecuación 4.1, se obtiene la siguiente ecuación diferencial.

$$\frac{dp_v}{dh} + \frac{p_v}{\Lambda} = \rho g \quad 4.2$$

Resolviendo 5.2 se obtiene el siguiente resultado

$$p_v(h) = \Lambda \rho g - (\Lambda \rho g - p_v(0)) \exp(-h/\Lambda) \quad 4.3$$

Si se aplica el mismo método de Janssen a un silo de sección rectangular, de aristas  $a$  y  $b$ , se obtiene la siguiente ecuación.

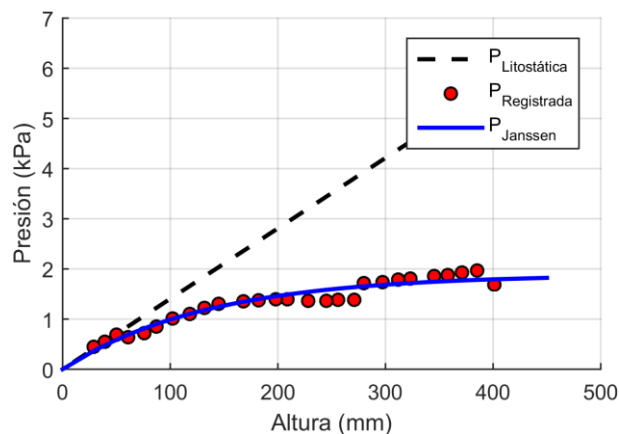
$$ab \frac{dp_v}{dh} dh + 2(a + b)\mu K p_v dh = ab\rho g dh \quad 4.4$$

Las ecuaciones 4.2 y 4.3 se mantienen igual, pero esta vez  $\Lambda = \frac{ab}{2(a+b)\mu K}$ .

Ajustando la ecuación 4.3 a mediciones de la presión litostática a diferentes alturas (Figura 4.7) es posible obtener el valor de  $\Lambda$  y, por lo tanto, el valor del producto  $\mu K$  (Tabla 4.2).

**Tabla 4.2. Resumen de datos obtenidos en ajuste de ecuación de Janssen, para partículas tipo A.**

Densidad kg/m <sup>3</sup>	Área m <sup>2</sup>	$\Lambda$	$\mu \cdot \kappa$
1.430	0,0196	0,1345	0,2603

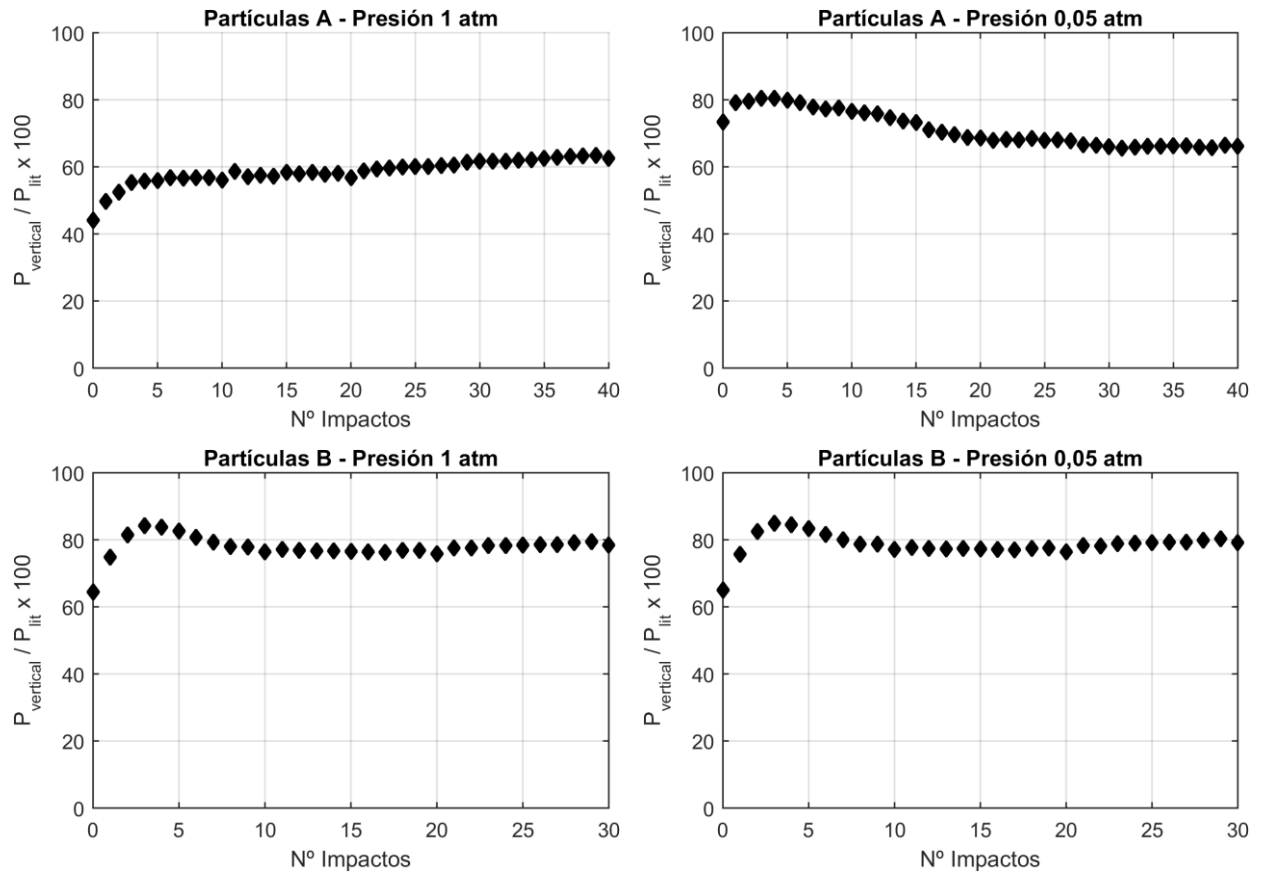


**Figura 4.7. Ajuste de ecuación de Janssen utilizando partículas A.**

Una vez obtenido el ajuste a la ecuación 4.3, es posible hacer ensayos de compactación en el mismo contenedor del montaje, sin lecho y utilizando los mismos impactos de péndulo que en los ensayos, para observar el comportamiento de la presión litostática en el tiempo. Para medir la presión litostática se remueve la membrana semi-permeable que protege al sensor de presión en la base. Se realizan ensayos de impactos sobre columnas de partículas A y B de 40 cm de altura sin colocar un lecho, midiendo la presión litostática. El sensor de presión registra la suma de la presión litostática con la presión de aire, por lo tanto después de cada impacto se espera un tiempo prudente para que la presión de aire pueda volver a su valor inicial. Se observa de los registros (Figura 4.8) que el efecto de pared varía a medida que se realizan más impactos, obteniéndose valores que varían entre el 60% y el 80% de la presión litostática,  $\rho_m g h$ . A pesar de alcanzarse estos valores, se cree que en el momento en que colapsa la columna la presión litostática alcanza valores cercanos al 100% de  $\rho_m g h$ , ya que debido a cada impacto el material es soltado de las paredes para poder descender y luego es contenido por las paredes nuevamente. Adicionalmente, se observa en los videos que la superficie de la columna

desciende de forma pareja en todo su ancho, es decir, no se ve mayor influencia en las zonas cercanas a las paredes.

Cabe mencionar que las presiones alcanzadas en los ensayos con lecho no se pueden comparar con la de los ensayos sin lecho, debido a que la presión de aire es medida en sectores distintos. Mientras que en ensayos sin lecho la presión de aire es medida en la base de la columna de partículas finas, en ensayos con lecho la presión es medida en la base del lecho, lo que implica un volumen de aire adicional al caso sin lecho.



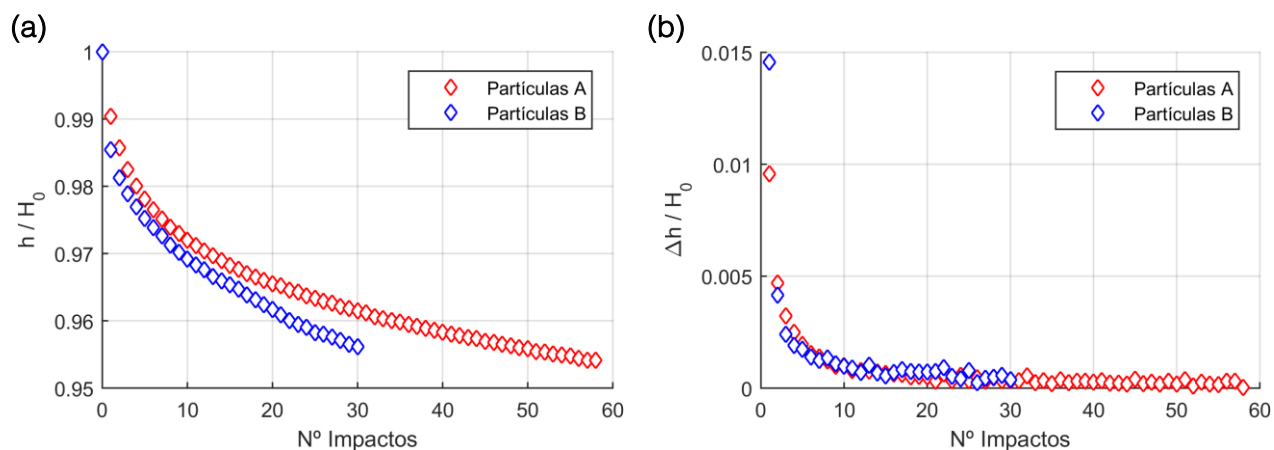
**Figura 4.8. Presión vertical vs N° de impactos. La presión vertical corresponde a la presión litostática que se alcanza una vez que la presión de aire se disipa.**

#### 4.2.2. Compactación

Se registró también la compactación de las columnas de partículas finas mediante grabaciones de la superficie de estas columnas. Para que la columna de partículas finas deje de compactarse es necesario realizar aproximadamente 200 impactos de péndulo. En los ensayos con lecho, el número de impactos analizados varía entre 10 y 40. Por lo tanto, siempre está parcialmente presente el efecto de compactación junto a la percolación.

Para tener una idea de la magnitud de la compactación esperada en los ensayos, se muestra en la *Figura 4.9* la variación de altura acumulada ( $h$ ) y la variación parcial de altura por impacto  $\Delta h$ . Se puede observar además que las partículas B se compactan prácticamente el doble que las

partículas B frente a un impacto. Si se comparan las tasas de descenso al alcanzarse una altura del 96% de la altura inicial, se observan valores de 0,090 mm/Impacto para las partículas A y 0,195 mm/Impacto para las partículas B.



**Figura 4.9. (a) Altura total y (b) descenso por impacto. Presión ambiente de 1 atm, sin lecho, utilizando impacto 1.**

Estos mismos ensayos fueron repetidos para estimar la densidad mínima y máxima que alcanzan las partículas finas A y B. En cada ensayo se mide la altura inicial y terminal de la columna de partículas finas, y luego se pesan estas partículas aparte. Los resultados se resumen en la *Tabla 4.3*.

**Tabla 4.3. Valores de descenso máximo, densidad mínima y densidad máxima alcanzados en ensayos sin lecho. El descenso máximo ocurre cuando la columna de partículas finas deja de disminuir su altura producto de los impactos de péndulo**

Partículas	$\Delta H_T$ mm	$\rho_{min}$ Kg/m <sup>3</sup>	$\rho_{max}$ Kg/m <sup>3</sup>
A	22 ± 2	1.430 ± 30	1.517 ± 30
B	20 ± 2	1.460 ± 50	1.539 ± 50

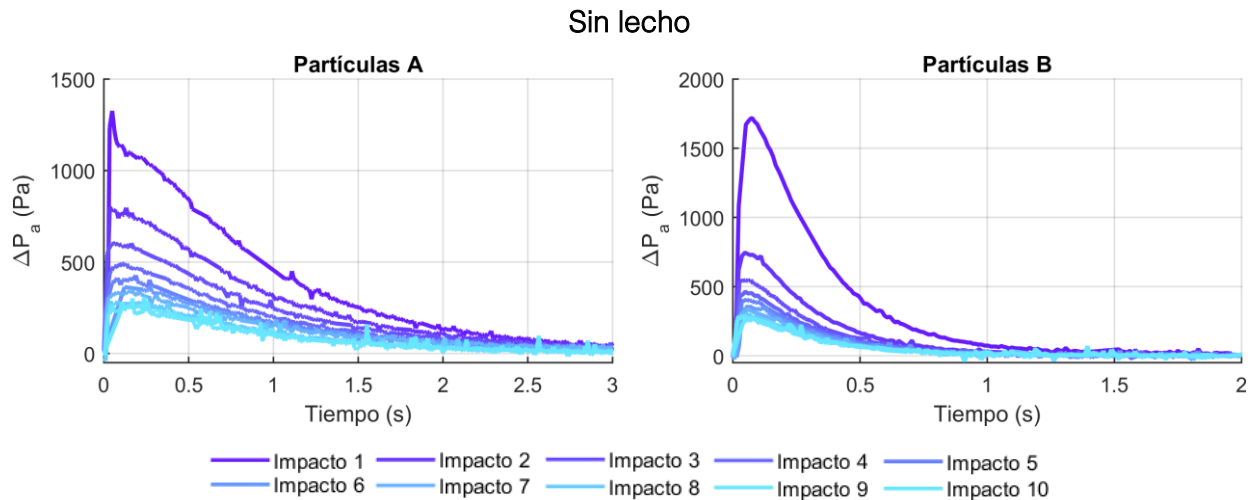
### 4.3. Datos de presión y altura

En esta sección se muestran los datos registrados de presión para el 100% y 50% de la presión atmosférica, y los datos registrados de altura para todos los ensayos a distintas presiones ambiente. Además se agregan ensayos sin lecho (con membrana semi-permeable). Los valores de presión corresponden a los primeros 10 impactos de cada ensayo.

### 4.3.1. Análisis de alzas de presión

En los ensayos sin lecho se puede observar una diferencia en la forma en que se alcanzan las presiones máximas. Las partículas A muestran alzas de presión pronunciadas acompañadas de un pronto descenso de presión, mientras que en las partículas B se observa una transición más lenta entre la etapa de alza de presión y la etapa de descenso de presión. Las presiones máximas alcanzadas hacia el impacto 10 no distan notoriamente en su valor.

Ensayos : Medición de presión de aire en la base de la columna  
Presión Ambiente : 1 atmósfera  
Tipo de impacto : Impacto 1

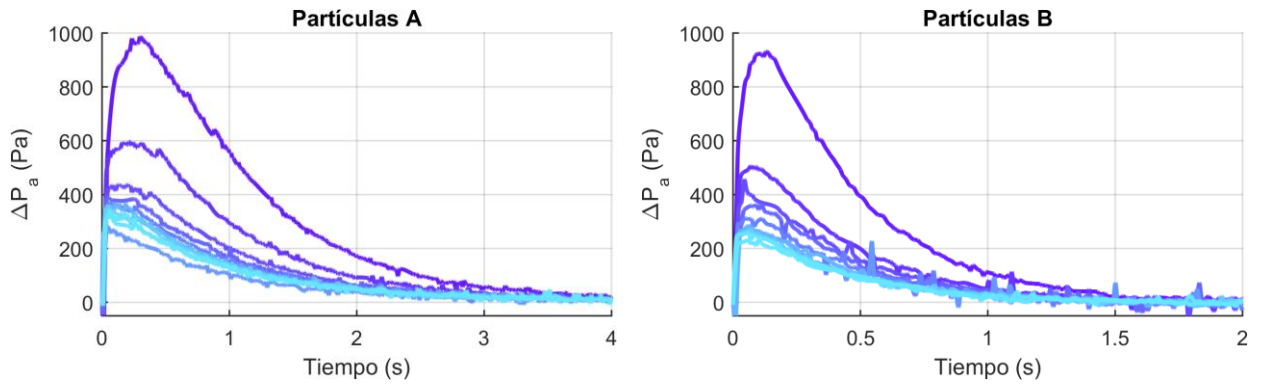


**Figura 4.10. Ensayos a presión atmosférica sin lecho utilizando Impacto 1.**

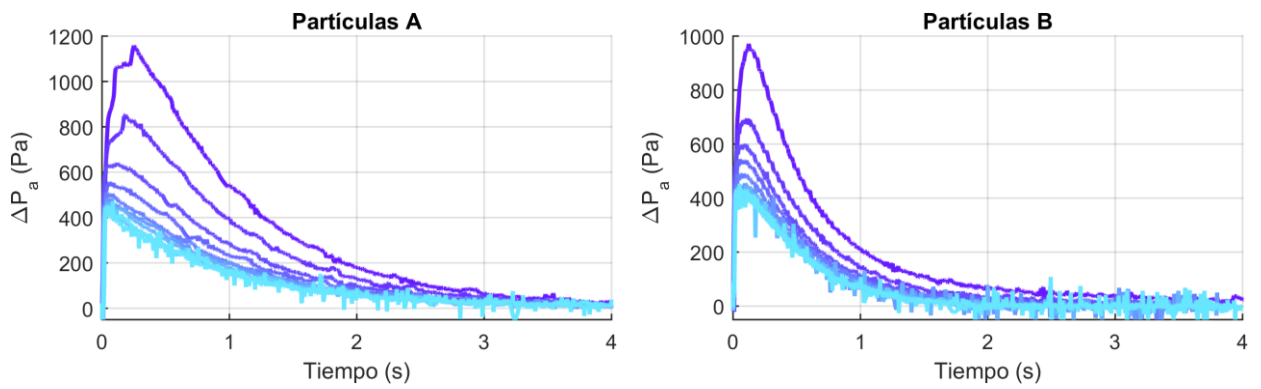
Las partículas B debieran generar mayores presiones que las partículas A si se considera que su tasa de compactación por impacto es mayor que la de las partículas A (*Figura 4.9*), generando una mayor compresión del volumen de aire intersticial en la columna. Por otra parte, se ve que los tiempos difusivos de las partículas A son mayores a los tiempos difusivos de las partículas B, que es lo esperado si se considera que las partículas B tienen mayor porosidad que las partículas A. Esto favorece a que las partículas A generen alzas de presión más pronunciadas que en el caso de las partículas B, ya que retienen el aire intersticial de la columna por más tiempo durante esta alza de presión. De esta forma se puede entender que ambos efectos se contrapongan y se logre observar que los valores de las presiones máximas no disten significativamente en ambos casos.

Ensayos : Medición de presión de aire en la base del lecho  
 Presión Ambiente : 1 atmósfera  
 Tipo de impacto : Impacto 1

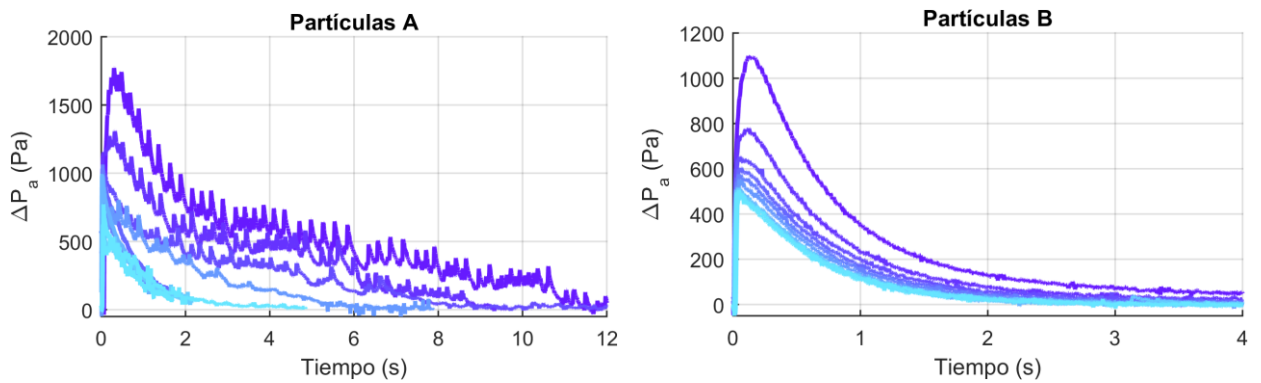
Lecho d=1mm



lecho d=2mm



lecho de arena

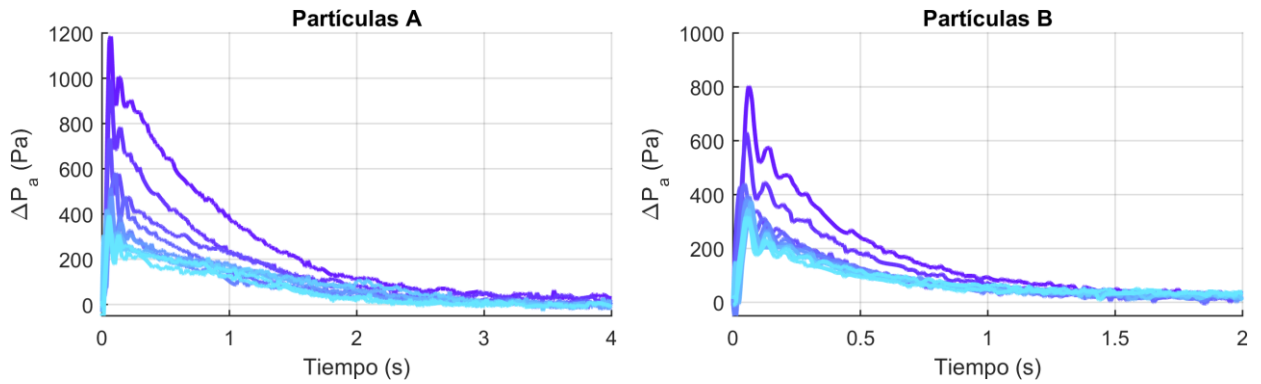


Impacto 1 Impacto 2 Impacto 3 Impacto 4 Impacto 5  
 Impacto 6 Impacto 7 Impacto 8 Impacto 9 Impacto 10

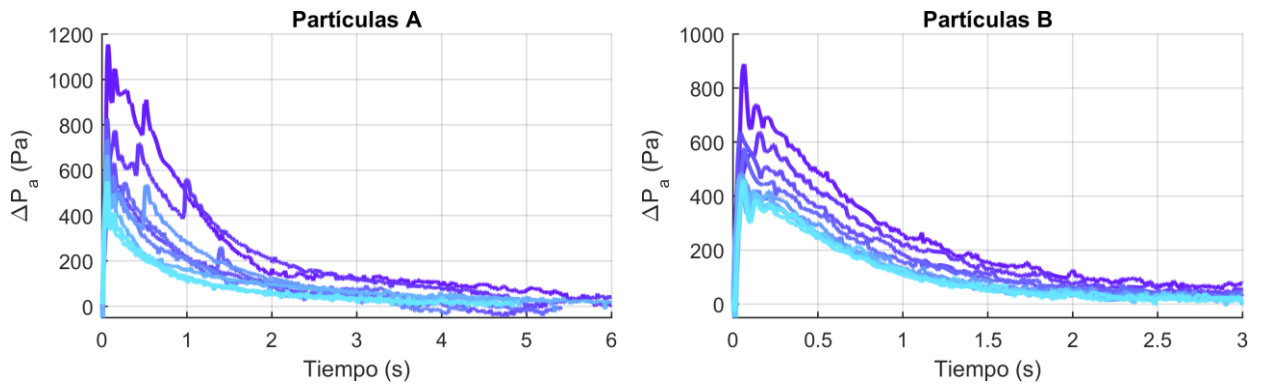
Figura 4.11. Ensayos a presión atmosférica utilizando Impacto 1.

Ensayos : Medición de presión de aire en la base del lecho  
 Presión Ambiente : 1 atmósfera  
 Tipo de impacto : Impacto 2

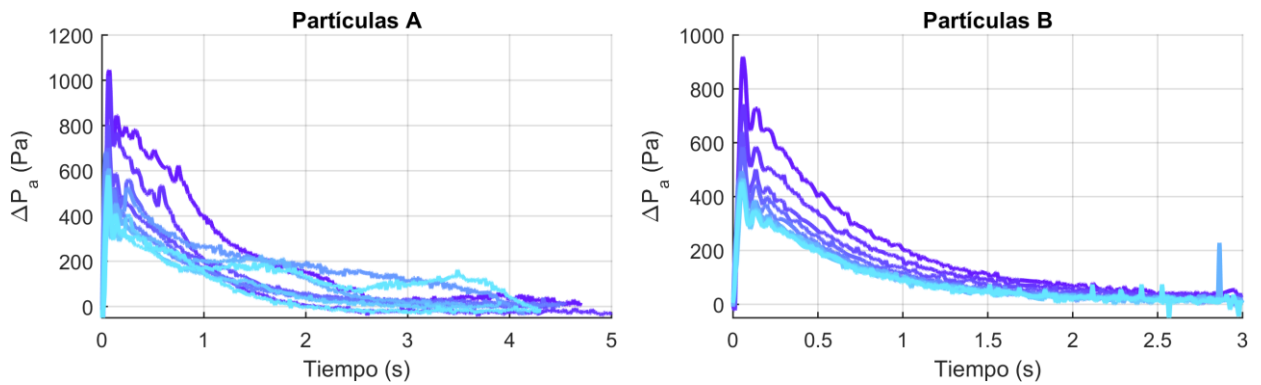
Lecho d=1mm



Lecho d=2mm



Lecho de arena

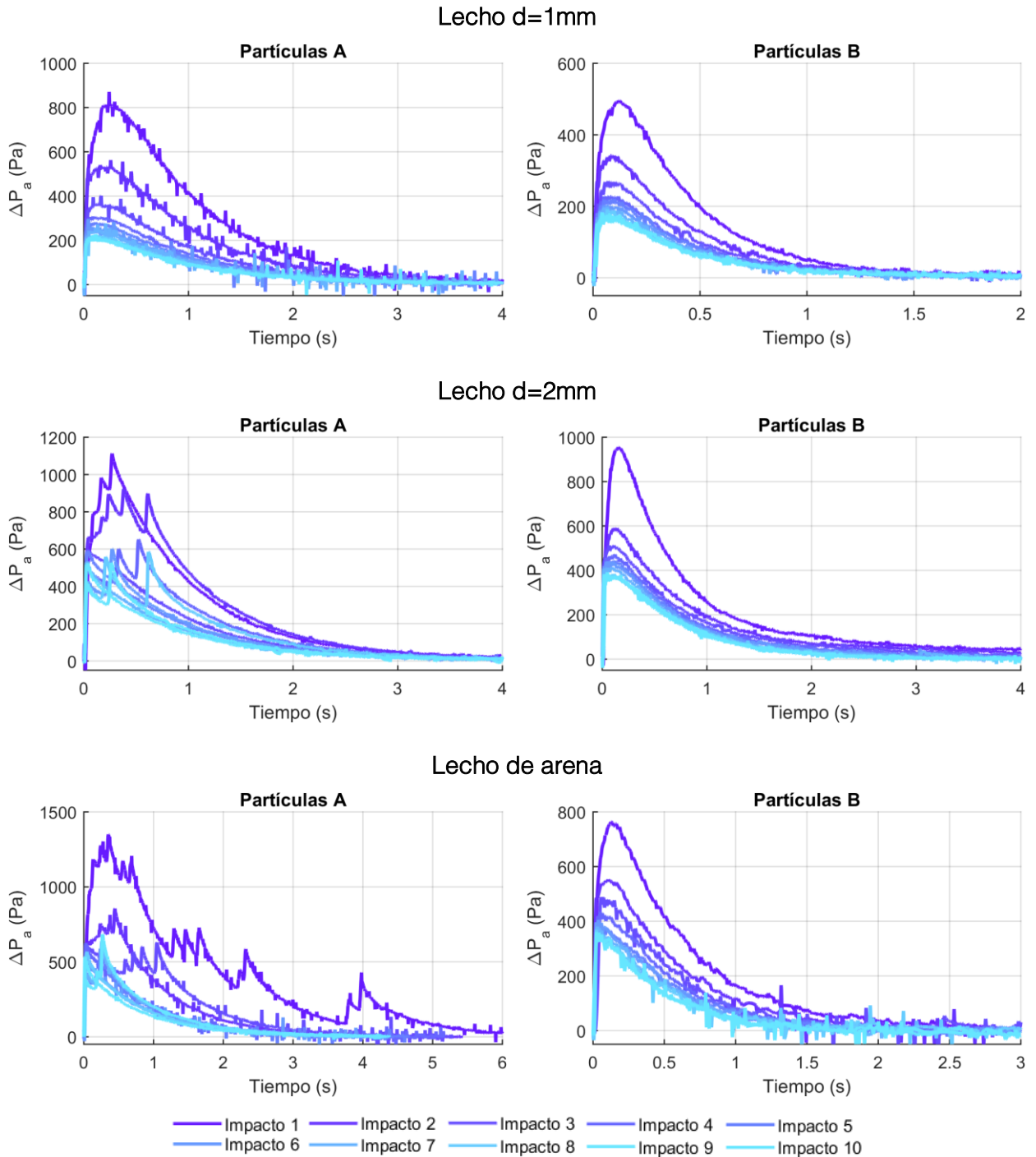


Impacto 1   Impacto 2   Impacto 3   Impacto 4   Impacto 5  
 Impacto 6   Impacto 7   Impacto 8   Impacto 9   Impacto 10

Figura 4.12. Ensayos a presión atmosférica utilizando Impacto 2.



Ensayos : Medición de presión de aire en la base del lecho  
 Presión Ambiente : 0,5 atmósfera  
 Tipo de impacto : Impacto 1



**Figura 4.13. Ensayos a 50% de la presión atmosférica utilizando Impacto 1.**

De las mediciones obtenidas se observa que en general los primeros impactos generan curvas de presión más suaves, mientras que hacia el décimo golpe ya se puede ver una rápida transición entre alza y baja de presión. Esto se puede entender por el efecto de la consolidación

de la columna de partículas finas, el cual es más notorio en los primeros golpes cuando el empaquetamiento es mínimo.

Es posible ver en algunos ensayos con partículas A que se presentan alzas repentinas de presión en la etapa posterior al alcance de la presión máxima. Tal es el caso en los ensayos con lecho de arena y algunos ensayos con lecho de esferas de 2 mm. De acuerdo a lo observado en los videos, esto se debe a que la percolación no ocurre completamente después del impacto, sino que se producen otros flujos de partículas finas adicionales los cuales generan aquellas alzas de presión.

En los ensayos a 50% de la presión atmosférica se pueden observar fluctuaciones durante la etapa de baja de presión, como una especie de pequeñas ondas. Estas fluctuaciones no se asocian a algún fenómeno físico que involucre a las partículas, sino que se asocian al funcionamiento de la bomba de vacío. Esta bomba se utiliza siempre encendida durante un ensayo, regulándose la presión mediante una válvula que permite regular una entrada de aire. Durante los impactos se han visto fluctuaciones anómalas en el vacuómetro, mostrando que al buscar el equilibrio de presión la bomba está ejerciendo ruido sobre las mediciones del sensor de presión. De todas formas, se espera que las presiones máximas sean correctas, ya que ocurren en un pequeño intervalo de tiempo desde que se realiza un impacto.

En general, los tiempos difusivos para las partículas A son notoriamente mayores a los tiempos difusivos para las partículas B, lo cual es de esperar por su diferencia en la porosidad.

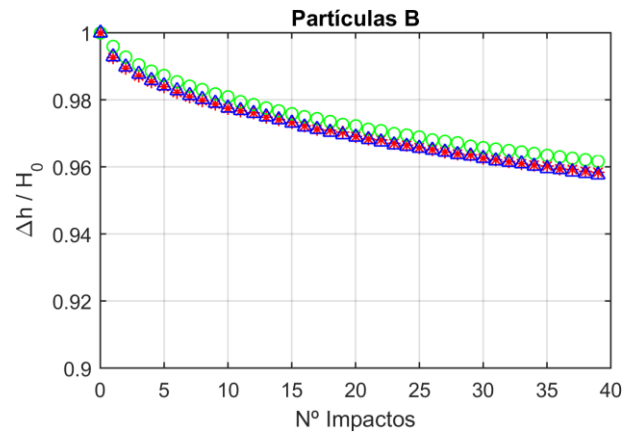
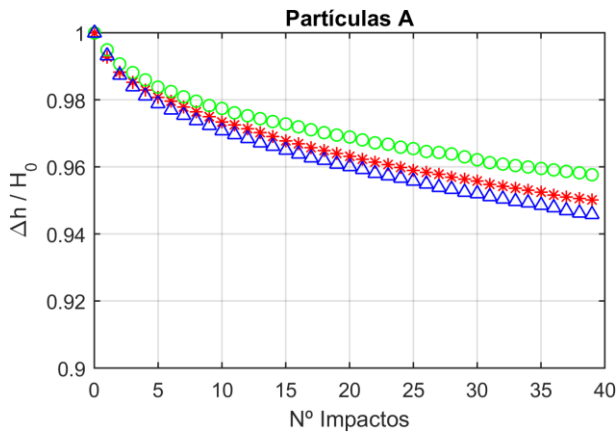
#### 4.3.2. Análisis de variación de la altura de la columna de partículas finas.

En cuanto a la variación de altura por impacto (*Figura 4.14* y *Figura 4.15*), no todos los ensayos cuentan con el mismo número de impactos. Esto se debe a que los impactos fueron realizados hasta observarse que el lecho esté lleno de partículas finas, exceptuando el caso de lecho de 1mm, en donde el lecho nunca llegó a llenarse. De la *Figura 4.14* se nota una tendencia a descender de forma constante una vez que han transcurrido los primeros impactos. En la *Figura 4.15* no se puede observar una tendencia en función de la presión ambiente. En la *Figura 4.16* se muestran las tasas de descensos calculadas mediante una regresión lineal de los últimos impactos. Algunos valores se han omitido debido a la insuficiencia de impactos para lograr ver una tendencia lineal. Estos valores confirman que no hay diferencias notorias al variar la presión atmosférica que puedan demostrar una tendencia con respecto a esta variable.

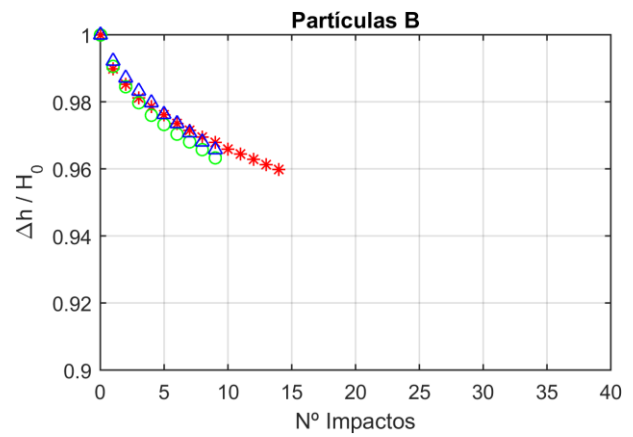
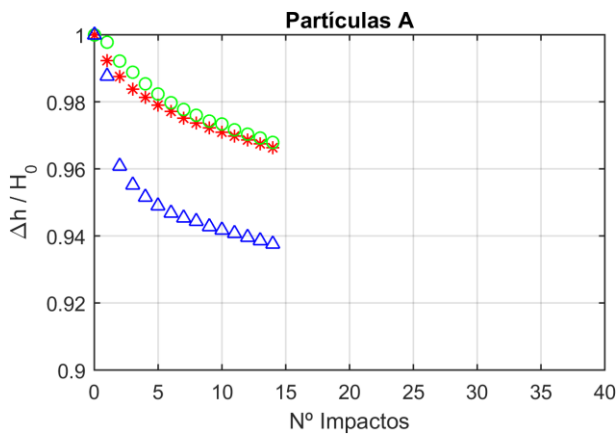
Comparando ambos tipos de impacto a presión atmosférica (*Figura 4.17*), se aprecia una tendencia contra intuitiva, pero consistente, en la cual el impacto 2, que es el impacto de menor energía, genera tasas de descensos mayores a las generadas mediante el impacto 1.

Ensayos : Medición de altura por impacto  
 Tipo de impacto : Impacto 1

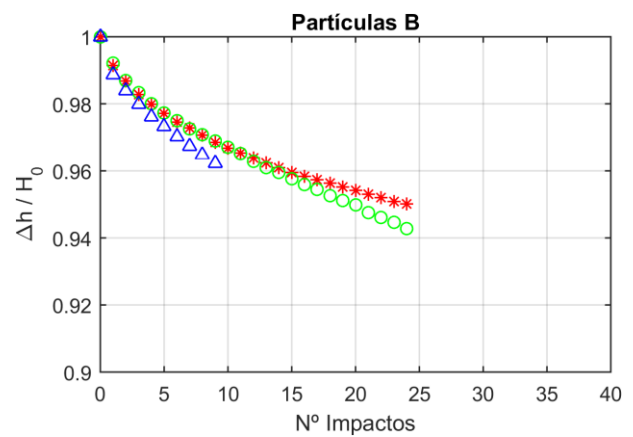
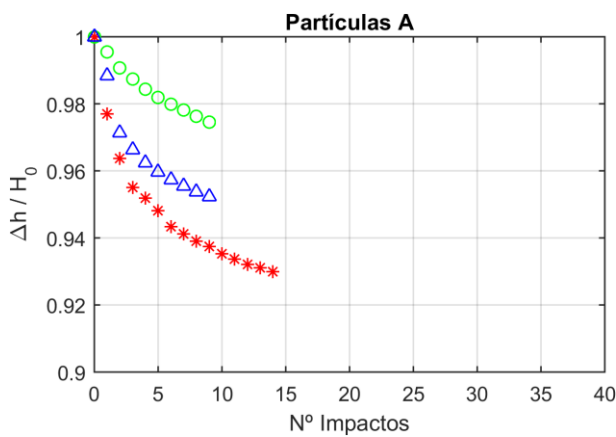
Lecho d=1mm



Lecho d=2mm



Lecho de arena

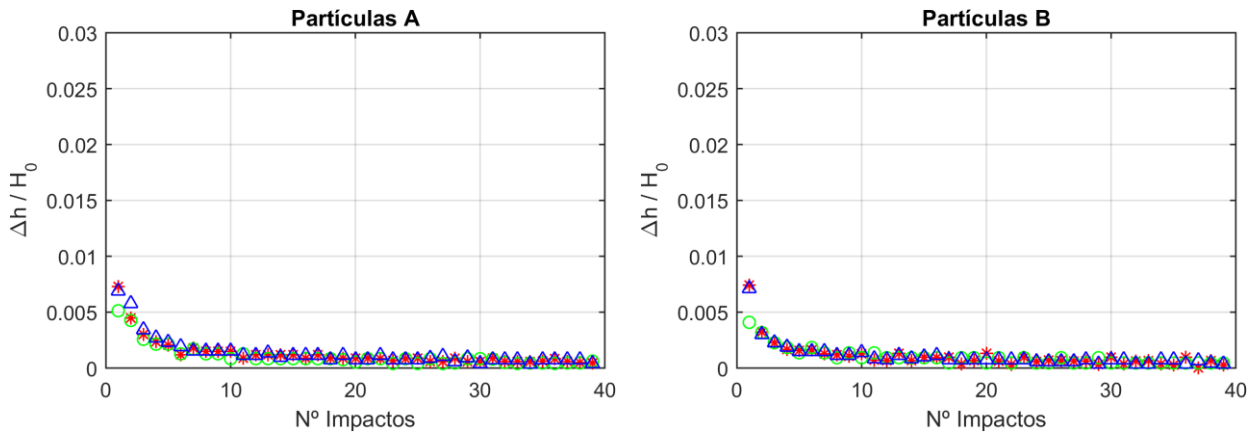


\* Presión 1atm    ○ Presión 0,5 atm    △ Presión 0,05 atm

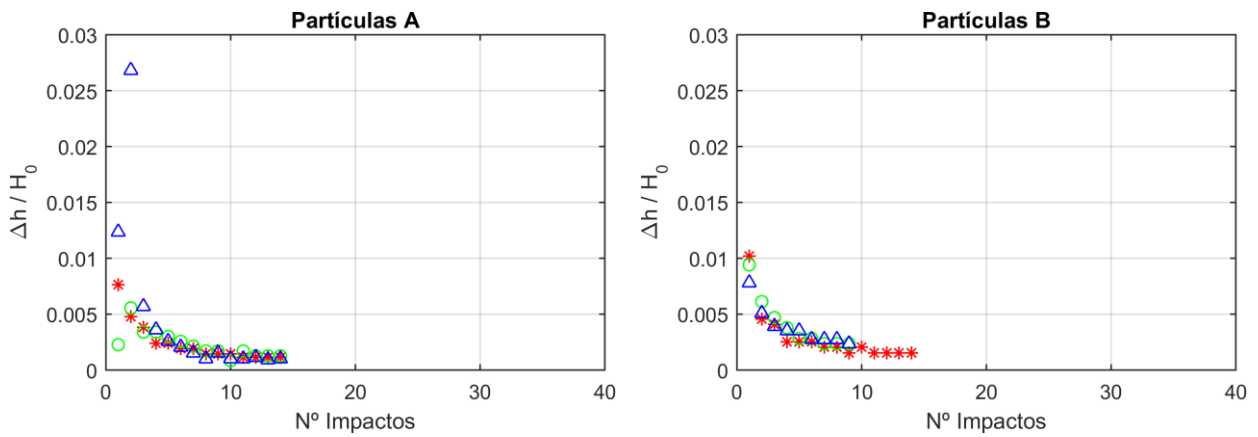
**Figura 4.14. Medición de altura por impacto a diferentes presiones ambiente. Se incluye la regresión lineal de los últimos impactos.**

Ensayos : Medición de la variación de altura por impacto  
 Tipo de impacto : Impacto 1

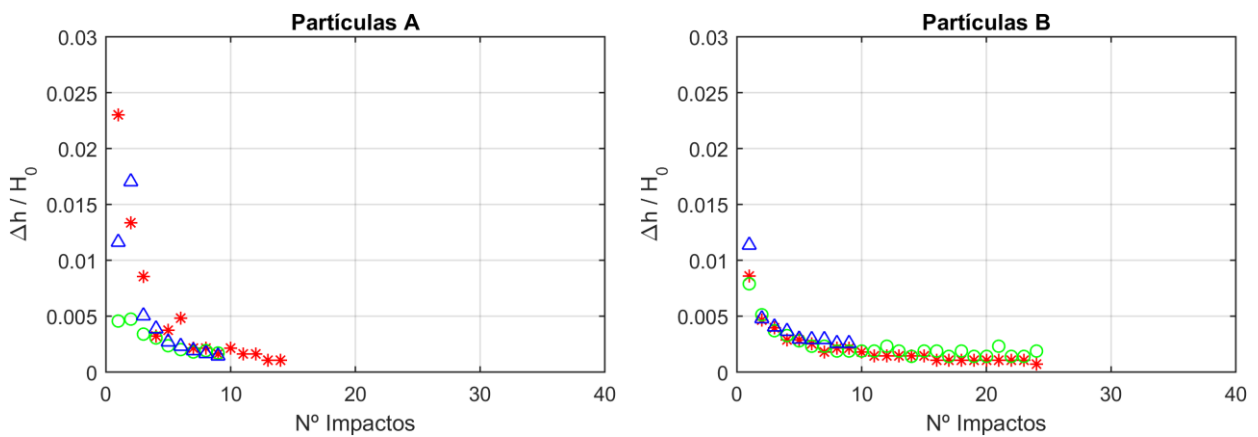
Lecho d=1mm



Lecho d=2mm

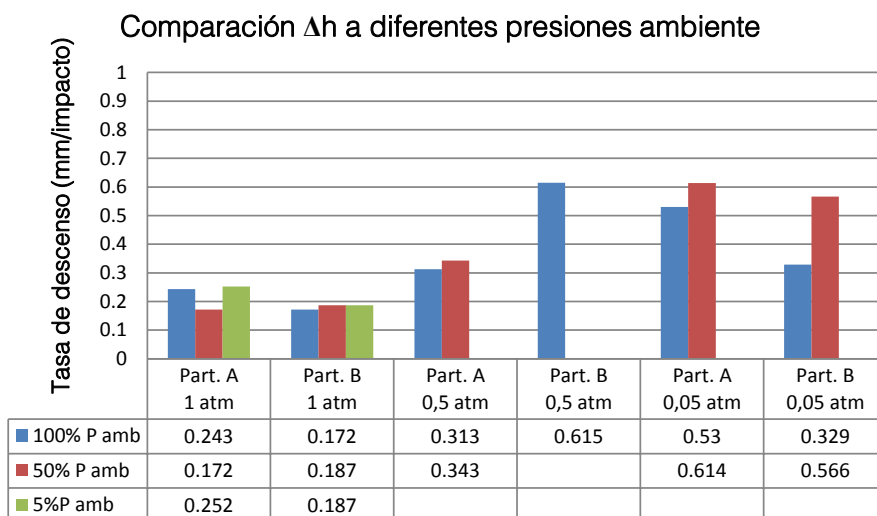


Lecho de arena

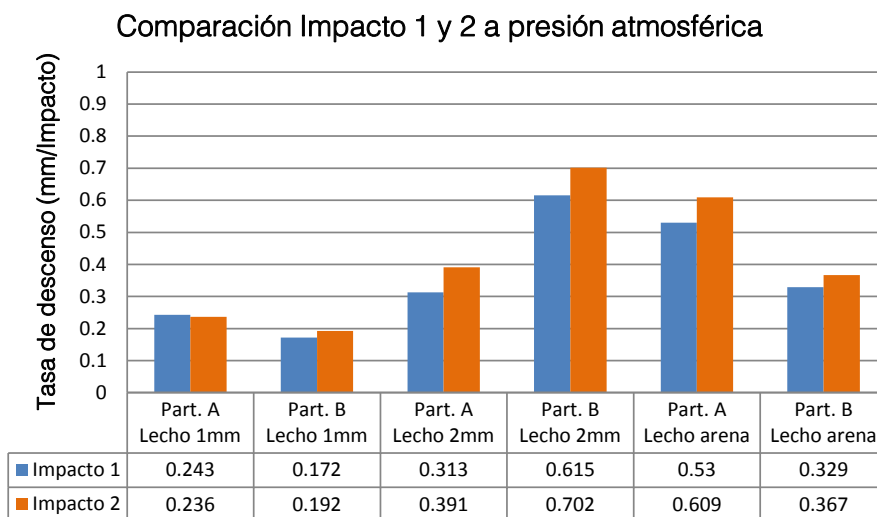


\* Presión 1atm    ○ Presión 0,5 atm    △ Presión 0,05 atm

Figura 4.15. Variación de altura por impacto a diferentes presiones ambiente.



**Figura 4.16. Descenso  $\Delta h$  por impacto a distintas presiones ambiente.**



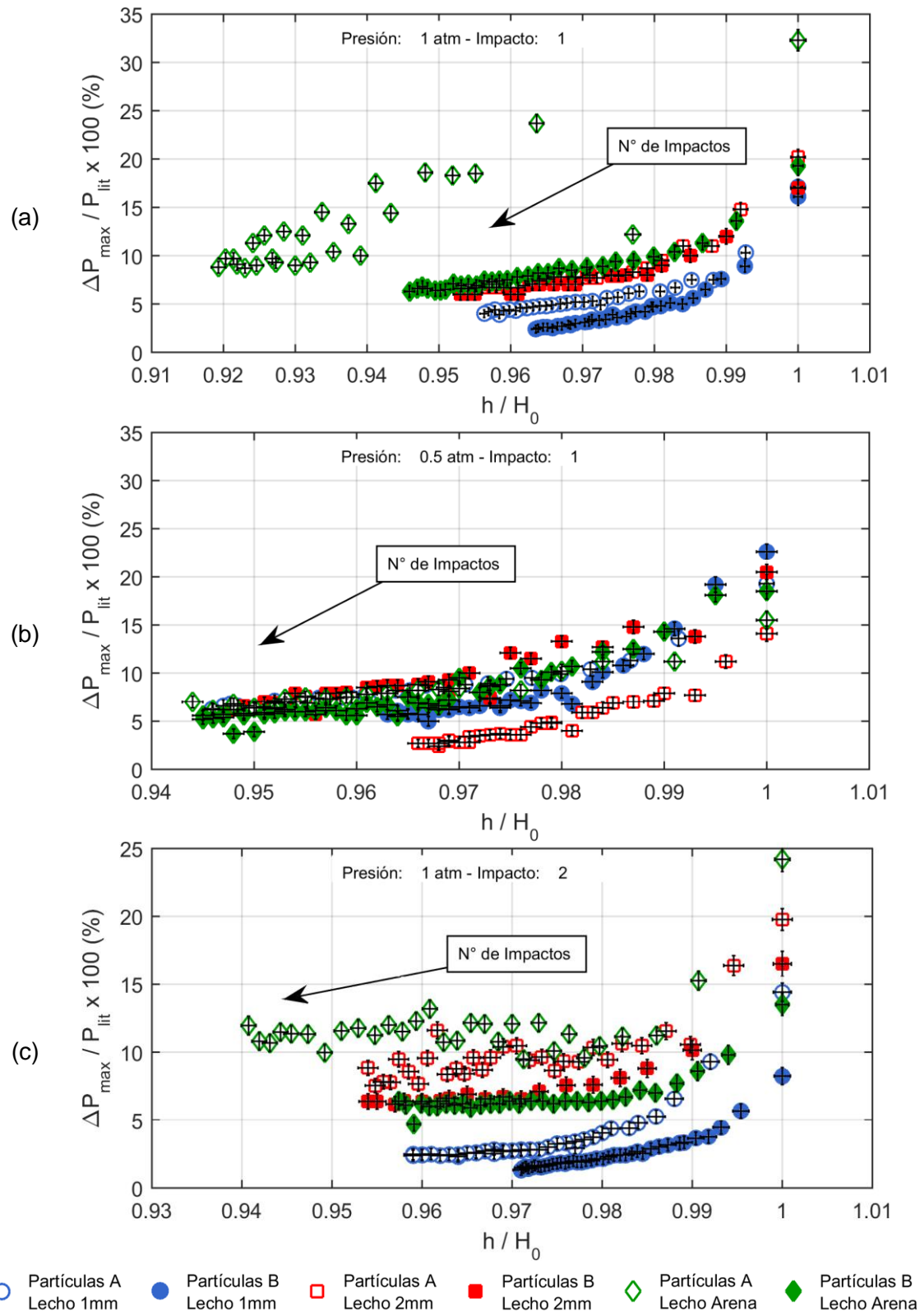
**Figura 4.17. Comparación de tasas de descenso para ambos tipos de impacto.**

### 4.3.3. Análisis de presiones máximas y altura de columna

En la *Figura 4.18* se ilustran las presiones máximas alcanzadas en función de la altura medida antes de realizarse cada impacto. La presión es mostrada como

$$\%Fluid = \frac{P_{max}}{P_{lit}} \times 100 \quad 4.5$$

Esta expresión corresponde al grado de fluidización de la columna, o dicho de otra forma, al porcentaje del peso que es sostenido por la sobrepresión alcanzada en el lecho.



**Figura 4.18. Presión de poros máxima alcanzada con respecto a la altura de la columna de partículas finas al momento de realizarse un impacto.**

Este análisis considera que son varios los fenómenos que inciden en los resultados. Más específicamente, las presiones medidas dependen de la tasa de percolación de las partículas finas en el lecho, de la compactación de las partículas finas que no percolan, y del roce con las paredes.

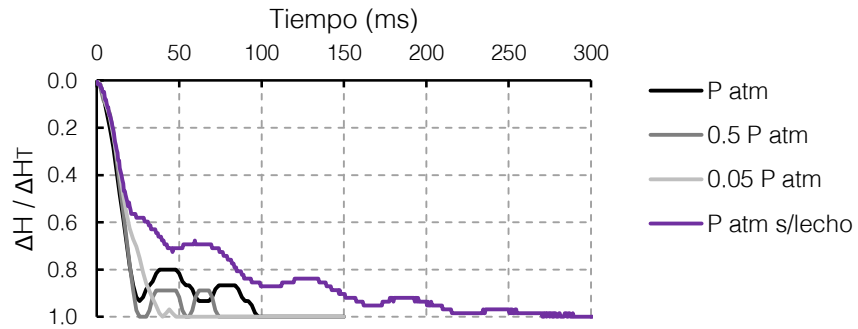
Se observa que a mayor porosidad del lecho se alcanzan mayores presiones, para ambos tamaños de partículas finas. Esto es de esperarse debido a que una mayor porosidad debiera permitir la percolación de una mayor cantidad de partículas finas y, por lo tanto, se debieran generar mayores sobrepresiones en el lecho. Para un mismo tipo de lecho, en la mayoría de los casos las partículas A generan mayores presiones que las partículas B, lo cual concuerda con el hecho de que las partículas A tienen un menor coeficiente de difusión que las partículas B, reteniendo el aire intersticial del lecho y de la columna por un mayor intervalo de tiempo.

En el caso de los ensayos a 50% de la presión atmosférica, no se observa una tendencia clara, más bien se observa que todos los ensayos tienden a un valor aproximado del 6% de fluidización, exceptuando las partículas A sobre lecho de 2 mm.

#### 4.3.4. Asentamiento de partículas finas tras un impacto a diferentes presiones ambiente

La superficie de la columna de partículas finas fue filmada a 1000 fps. El siguiente análisis es una observación estos videos, a diferentes grados de vacío.

Se aprecia una notoria diferencia en la forma en que la columna se compacta hasta volver a una posición de reposo. Como se ilustra en la *Figura 4.19*, el descenso de la superficie de la columna no es uniforme, sino que se generan unas alzas y descensos de la altura antes de llegar a la altura final de reposo. Este efecto es menos notorio mientras menor es la presión ambiente, llegando a ser casi inexistente a una presión ambiente de 0,05 atm. Estas alzas de altura no pueden ser provocadas por otra cosa que por una diferencia de presión entre el aire intersticial y el aire sobre la columna. Como se ha mencionado con anterioridad, al compactarse la columna de partículas finas el aire intersticial es compactado, y como consecuencia este aire compactado presionará en todos sentidos. Una hipótesis es que las alzas y descensos de la altura de la columna ocurren debido a que un conjunto de partículas en la parte superior de esta columna es empujado verticalmente por el aire que fue comprimido. Como ejemplo se puede pensar en un globo que al presionarlo genera una sobrepresión interna que actúa sobre las paredes para volver a su posición inicial, solamente que en el presente caso este efecto es parcial, porque escapa aire en todo momento. Este fenómeno vendría a ser la fluidización de una fracción de la columna de partículas finas.

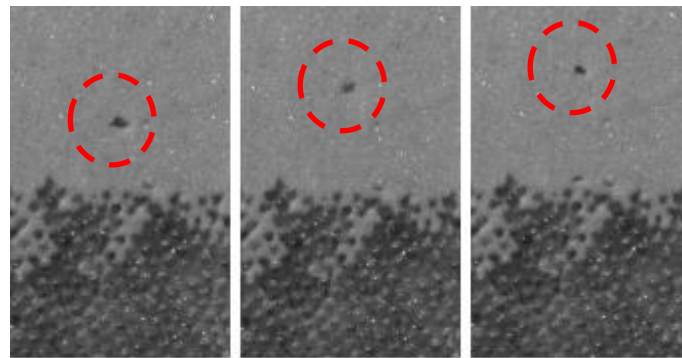


**Figura 4.19. Colapso de la columna de partículas A producto de un impacto, sobre lecho de esferas de 1mm. Se agrega un ensayo sin lecho (línea morada).**

#### 4.3.5. Interfaz lecho-columna

Es posible observar la aparición ocasional de burbujas de aire por sobre la interfaz lecho-columna (*Figura 4.20*). Estas burbujas dan indicio de que existen flujos de aire ascendentes que son capaces de romper en parte la estructura de la base de la columna de partículas finas, generando una entrada adicional de estas partículas finas al lecho.

Por otra parte, la percolación en el vacío ocurre de una forma uniforme a lo largo de la interfaz lecho-columna.



**Figura 4.20. Burbujas de aire formadas durante la percolación de partículas finas tipo A en un lecho de esferas de vidrio de  $d=2mm$ .**



## 4.4. Estimación de presiones máximas

Para poder comprender mejor lo que ocurre dentro de la columna y del lecho, se hace modelo numérico que resuelva la ecuación de difusión en una dimensión en el cual se consideran las alzas de presión debido a compactación y percolación. El fin de realizar este modelo no es obtener valores exactos, sino más bien acoplar los fenómenos en estudio y ver que los resultados sigan la misma tendencia observada en la realidad. Algunas de las condiciones y aproximaciones utilizadas se enumeran a continuación:

- Los valores de difusión  $D_A$  y  $D_B$  para las partículas A y B es el mismo en todos los ensayos. Estos valores se estiman en base a los ensayos sin lecho, que es en donde se tiene mayor certeza de su valor.
- Las sobrepresiones por compactación se calculan entre el momento del impacto,  $t_0$ , y  $t_c = (2\Delta h/g)^{1/2}$ , que corresponde al tiempo de caída libre para la superficie de la columna de partículas finas. Las sobrepresiones por percolación se calculan para todo tiempo.
- Es conocida la variación de altura de la columna  $\Delta h$  en función del tiempo para cada impacto. En ensayos de compactación se considera un descenso lineal entre  $t_0$  y  $t_c$ , mientras que en ensayos de percolación se considera los valores de  $\Delta h(t)$ .
- Los ajustes en donde se consideran tanto percolación como compactación son ajustados mediante un factor entre 0 y 1, debido a que son efectos suplementarios. En los ajustes aislados de estos efectos se considera un factor 1, indicando que no hay atenuación a las sobrepresiones.

### 4.4.1. Método de volúmenes finitos

El método numérico de resolución es el de volúmenes finitos, aplicada a la ecuación 4.6, que es la ecuación de difusión.

$$\frac{\partial P}{\partial t} = D \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} + r(P) \quad 4.6$$

Considerando el dominio  $H_S \leq z \leq H_N^4$ , y una condición inicial  $P(z, t = 0) = f(z)$ , sujeta a la condición de borde Neumann en  $z = H_S$ , se obtiene

$$-D \left. \frac{\partial P}{\partial z} \right|_{z=H_S} = F_0 \quad 4.7$$

La condición de borde Dirichlet en  $z = H_N$ , es la siguiente

---

<sup>4</sup> Los subíndices S y N hacen referencia a los puntos cardinales sur y norte, respectivamente.

$$P(z = H_N) = P_0 \quad 4.8$$

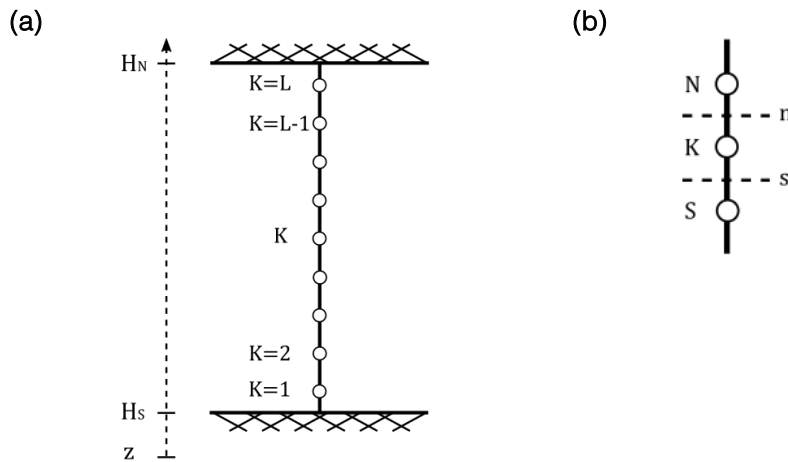
Se asume que el término fuente  $r$  es función de  $P$ .

El modelo de volúmenes finitos en 1-D consiste en dividir el dominio en nodos equidistantes que representen un volumen finito, y establecer ecuaciones de forma conservativas entre ellos. En este caso, para calcular la concentración en un punto  $k$  (con  $k = 1 \dots L$ ), se utiliza la siguiente ecuación

$$\Delta z \frac{\partial P_p}{\partial t} = \dot{m}_s - \dot{m}_n + r(P_p)\Delta z \quad 4.9$$

En esta ecuación,  $\Delta z$  es el espaciamento entre nodos,  $\dot{m}_s$  y  $\dot{m}_n$  son flujos másicos de entrada y salida del volumen de control, desde la frontera vecina sur y norte, respectivamente. Las letras en minúscula indican las caras del volumen de control, mientras que las mayúsculas a los elementos vecinos.

Considerando el esquema de la *Figura 4.21*, se establece un sistema de  $L$  ecuaciones, que permita encontrar las concentraciones en el tiempo  $t + 1$ , dado que se conocen las concentraciones en el instante  $t$ , para todos los volúmenes de control  $K = 1 \dots L$ . Esto es, poder calcular  $P_K^{t+1}$ , dado que conocemos  $P_K^t$ , para los  $L$  nodos.



**Figura 4.21. Discretización del método de volúmenes finitos.**

El primer nodo se ubica en  $H_s + \Delta z/2$ , mientras que el último se ubica en  $H_N - \Delta z/2$ , de forma que se tienen  $L$  volúmenes de dimensión  $\Delta z = (H_N - H_s)/L$ . La posición de cada nodo  $K$  es  $Z_p = H_s + (K - 1/2)\Delta z$ .

$$m_n = -D \frac{\partial P}{\partial z} \Big|_{z=z+\Delta z/2} ; m_s = -D \frac{\partial P}{\partial z} \Big|_{z=z_p-\Delta z/2} \quad 4.10$$

Se considera una variación lineal de  $P$  entre  $P_K$  y  $P_N$ , o  $P_S$ , según corresponda

$$m_n = -\frac{D}{\Delta z}(P_N - P_K) \quad 4.11$$

$$m_s = -\frac{D}{\Delta z}(P_K - P_S) \quad 4.12$$

Para calcular  $P$  en cualquier nodo “ $K$ ”, se plantea la siguiente ecuación

$$\frac{\partial P_K}{\partial t} = \frac{D}{\Delta z^2}(P_S - 2P_K + P_N) + r(P_K) \quad 4.13$$

En el nodo  $K = 1$ , por condición de borde tipo Newmann el flujo másico  $m_s = F_0$ , se obtiene  $P_1$

$$\frac{\partial P_1}{\partial t} = \frac{D}{\Delta z^2}(P_2 - P_1) + \frac{F_0}{\Delta z} + r(P_1) \quad 4.14$$

Por otra parte, en el nodo  $K = L$ , para una concentración  $P_0$ , en la ecuación 4.11 se obtienen las siguientes ecuaciones para el flujo másico y la concentración

$$m_n = -\frac{2D}{\Delta x}(P_0 - P_K) \quad 4.15$$

$$\frac{\partial P_L}{\partial t} = \frac{D}{\Delta z^2}(P_S - 3P_L) + \frac{2D}{\Delta z^2}P_0 + r(P_L) \quad 5.16$$

Ahora, las  $N$  ecuaciones pueden ser escritas verticalmente, y reducidas a una expresión con matrices y vectores, como se muestra a continuación

$$\frac{\partial P}{\partial t} = MP + b + r(P) \quad 4.17$$

La concentración  $P$  ahora es un vector columna, con las concentraciones de cada nodo. Por otra parte,  $r(P)$  es un vector columna que contiene la función que describe los términos fuentes evaluadas en cada nodo, y  $b$  es un vector columna que contiene los términos asociados a las condiciones de borde

$$b = \left[ \frac{F_0}{\Delta z}, 0, 0, \dots, 0, \frac{2D}{\Delta z^2}P_0 \right]^T \quad 4.18$$

Finalmente,  $M$  es una matriz de  $L \times L$  elementos, que controla los términos difusivos, y al ser multiplicada por la columna  $P$  entrega los flujos másicos de las ecuaciones. La matriz  $M$  es triagonal, llena de valores 0, comúnmente llamada *sparse*.

$$MP = \frac{D}{\Delta z^2} \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -2 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -2 & 1 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & -2 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & -2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 1 & -3 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ \vdots \\ P_{L-2} \\ P_{L-1} \\ P_L \end{pmatrix} \quad 4.19$$

Los coeficientes  $-1$  y  $-3$  ubicados en  $(1,1)$  y  $(L,L)$ , corresponden a las condiciones de borde de Neumann y Dirichlet, respectivamente.

Ya presentado este conjunto de ecuaciones, lo que resta es discretizar temporalmente el problema. En este caso se mostrará el método de Runge-Kutta de cuarto orden. Este método sirve para resolver problemas del siguiente tipo

$$\frac{\partial P}{\partial t} = f(P, t) \quad 4.20$$

En esta ecuación,  $f$  es una función cualquiera que depende de la concentración  $P$  y el tiempo  $t$ .

$$f(P, t) = MP + b + r(P) \quad 4.21$$

La variación temporal en este caso se encuentra en el vector  $b$ .

El método de Runge-Kutta busca estimar la concentración en el tiempo  $t + 1$ , dado que conocemos las concentraciones en  $t$ , como se había mencionado con anterioridad. La ecuación discretizada bajo este método es la siguiente

$$P^{t+1} = P^t + \frac{\Delta t}{6} (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \quad 4.22$$

Los términos  $k_i$  se definen de la siguiente forma

$$k_1 = f(P^t, t) \quad 4.23$$

$$k_2 = f\left(P^t + \frac{\Delta t}{2} k_1, t + \frac{\Delta t}{2}\right) \quad 4.24$$

$$k_3 = f\left(P^t + \frac{\Delta t}{2} k_2, t + \frac{\Delta t}{2}\right) \quad 4.25$$

$$k_4 = f(P^t + \Delta t k_3, t + \Delta t) \quad 4.26$$

Para que el modelo sea estable se debe cumplir que  $\Delta t \cdot D \cdot \Delta z^{-2} \leq 0.5$ . Mientras menor es este número, menor es el error del resultado.

#### 4.4.2. Adaptación del método numérico

La matriz en la ecuación 4.18 representa el caso en que se considera un único medio a través del cual la presión se difunde. En el caso en estudio se tienen dos medios, el lecho y la columna de partículas finas. Por lo tanto, se tendrán dos coeficientes de difusión,  $D_L$  en el lecho y  $D_C$  en la columna de partículas finas.

Si el último nodo del lecho es el  $J$ , entonces la ecuación de  $P_J$  queda expresada como sigue.

$$\frac{\partial P_K}{\partial t} = \frac{D_L P_{J-1}}{\Delta z^2} - \frac{(D_C + D_L) P_J}{\Delta z^2} + \frac{D_L P_{J+1}}{\Delta z^2} + r(P_K) \quad 4.27$$

La ecuación 4.27 considera que la difusión en la frontera entre lecho y columna de partículas finas es dominada por el medio con menor coeficiente de difusión. Es decir, la presión de aire en el lecho se difunde hacia la columna de partículas finas con  $D_C$  en la frontera.

La ecuación 4.18 se reescribe en la ecuación 4.28, tomando como ejemplo el caso en que  $J$  vale 3.

$$MP = \frac{1}{\Delta z^2} \left( D_L \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -2 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} + D_C \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & -2 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & -2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 1 & -3 \end{bmatrix} \right) \begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ \vdots \\ P_{L-2} \\ P_{L-1} \\ P_L \end{pmatrix} \quad 4.28$$

El aumento de presión en cada nodo producto de la percolación y compactación será incluido en el término  $b$ , mediante flujos de entrada  $F_K$ . Este flujo se calcula utilizando la ley de Boyle entre cada intervalo de tiempo,  $\Delta t$ , considerando la variación de la altura de la columna de partículas finas,  $\Delta H_t = H_t - H_{t-1}$ .

Las sobrepresiones generadas por percolación y compactación son modeladas como flujos de entrada  $F_0$ . El cálculo de estas sobrepresiones se detalla en las siguientes secciones.

#### 4.4.3. Cálculo de presión debido a la percolación de partículas finas en el lecho

En primer lugar se desarrollará una ecuación para calcular el aumento de presión mediante la ley de Boyle, considerando que solo existe percolación y no compactación de la columna, y que esto ocurre en un tiempo breve, del orden de los 40 ms. Si solamente hay percolación, al variar la altura en  $\Delta H$  el volumen de partículas que percola en el lecho es  $A\Delta H(1 - \phi_c)$ , en donde  $A$  es el área de la base y  $\phi_c$  es la porosidad de la columna de partículas finas, la cual es constante al no haber cambio en su estructura. Si  $H_l$  es la altura del lecho, se define el volumen inicial de poros,  $V_1 = AH_l\phi_l$ , siendo  $\phi_l$  la porosidad del lecho. También se define el volumen de poros después de la percolación de partículas finas en el lecho,  $V_2 = V_1 - A\Delta H(1 - \phi_c)$ .

El balance de volumen se hace únicamente en el lecho. No se incluye la columna de partículas finas porque esta columna tiene una difusividad mucho menor que la del lecho, e impide que el aire escape rápidamente del lecho en los primeros instantes de cada impacto.

$$P_1 V_1 = P_2 V_2 \quad 4.29$$

$$P_1 V_1 = (P_1 + \Delta P) V_2 \quad 4.30$$

$$\Delta P = P_1 \left( \frac{V_1}{V_2} - 1 \right) \quad 4.31$$

$$\Delta P = P_1 \left( \frac{V_1}{V_1 - A\Delta H(1 - \phi_c)} - 1 \right) \quad 4.32$$

#### 4.4.4. Cálculo de presión debido a compactación de las partículas finas

Esta vez se considera que la columna de partículas finas desciende  $\Delta H$  solamente por compactación. En este caso no existiría percolación, siendo el caso opuesto al visto en el punto anterior.

El volumen  $V_1$  es el volumen de aire atrapado en la columna de partículas finas solamente. No se considera el volumen del lecho porque la sobrepresión que se genera en la columna tarda mucho en difundir hacia dicho lecho, invalidándose la ley de Boyle. Producto de esto, no es posible estimar una presión que se pueda comparar fielmente con la presión medida por el sensor en la base del lecho.

Al disminuir la altura de la columna disminuye la porosidad y, por lo tanto, disminuye el volumen final de aire. Esto se traduce en un aumento de la presión final. Los volúmenes corresponden a  $V_1 = AH_1\phi_1$  y  $V_2 = AH_2\phi_2$ . El área  $A$  es el área de la base del contenedor, y  $H$  es la altura de la columna. La ecuación 4.31 queda expresada de la siguiente manera:

$$\Delta P = P_1 \left( \frac{AH_1\phi_1}{AH_2\phi_2} - 1 \right) \quad 4.33$$

Las porosidades se definen como  $\phi_1 = 1 - V_p/V_{t1}$  y  $\phi_2 = 1 - V_p/V_{t2}$ , en donde  $V_{ti}$  es el volumen total,  $AH_i$ , y  $V_p$  es el volumen de partículas,  $M/\rho_p$ .  $M$  es la masa del conjunto de partículas finas usadas en cada ensayo.

$$\Delta P = P_1 \left( \frac{AH_1 - V_p}{AH_2 - V_p} - 1 \right) \quad 4.34$$

#### 4.4.5. Coeficiente de difusión de presión en ensayos sin lecho

Es necesario estimar el valor del coeficiente de difusión de ambos tipos de partículas para poder implementar este modelo. Como ya se ha mencionado, el escenario de los ensayos sin lecho no se puede comparar con el escenario de los ensayos con lecho, ya que el volumen de aire intersticial del lecho convierte el problema en un problema distinto. Pero de todas formas se hará el supuesto de que el coeficiente de difusión estimado en ensayos sin lecho también es válido para los ensayos con lecho. El valor real no debiera diferir en gran manera.

Una primera aproximación al valor del coeficiente de difusión puede ser deducida mediante la ley de Darcy. Utilizando la ley de los gases ideales, y la ley de Darcy se logra llegar a la siguiente expresión

$$\frac{\partial \Delta P_s}{\partial t} = D \nabla^2 (\Delta P_s) \quad 4.35$$

En esta expresión,  $\Delta P_s$  es la variación de presión con respecto a la presión atmosférica. Una forma de estimar el coeficiente de difusión,  $D$ , es mediante la siguiente ecuación (Homan, 2014):

$$D = \kappa \frac{P_0}{\mu (1 - \phi)} \quad 4.36$$

En esta ecuación,  $\kappa$  es la permeabilidad del material,  $\mu$  es la viscosidad dinámica del aire,  $P_0$  es la presión inicial y  $\phi$  es la porosidad del material.

Para calcular el coeficiente de difusión,  $D$ , se resolvió la ecuación 5.35 mediante un método numérico, minimizando la diferencia entre los datos reales y los datos calculados en función de  $D$ . Los resultados obtenidos son resumidos en la *Tabla 4.4*.

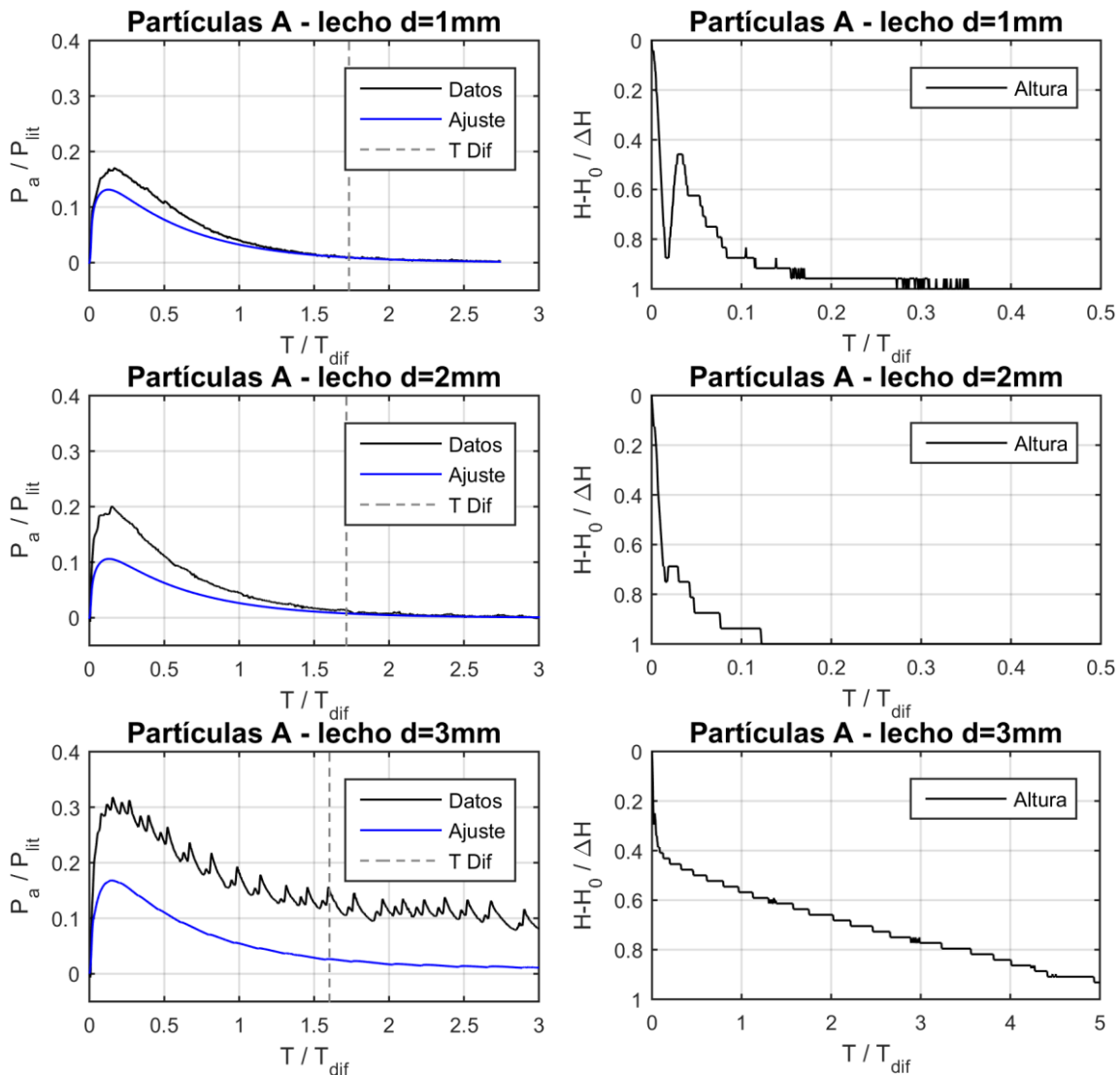
**Tabla 4.4. Cálculo de tiempos característicos de difusión.**

Variable	Unidades	Partículas A	Partículas B
$\mu$	Pa s	1.98x10 <sup>-5</sup>	
$d_m$	$\mu\text{m}$	75	150
$P_0$	kPa	101.33	
$\phi$	-	0.415	0.427
$H$	m	0.40	
$D$	m <sup>2</sup> /s	0.098	0.254
$\kappa$	m <sup>2</sup>	8.72x10 <sup>-12</sup>	2.85x10 <sup>-11</sup>
$t_{Dif}$	s	1.63	0.63

#### 4.4.6. Análisis de resultados

Desde la *Figura 4.22* a la *Figura 4.28* se ilustran los ajustes realizados.

- Tipo de ensayos : Ajuste de presión de aire para primer impacto considerando efecto de compactación junto a variación de altura de la columna.
- Tipo de partículas : Partículas A.
- Presión Ambiente : 1 atmósfera.
- Tipo de impacto : Impacto 1.



**Figura 4.22. Ajuste de ecuación de difusión para ensayos con lecho y partículas clase A, para primeros impactos, considerando solamente el efecto de compactación de la columna.**



Tipo de ensayos : Ajuste de presión de aire para primer impacto considerando efecto de compactación junto a variación de altura de la columna.

Tipo de partículas : Partículas B.

Presión Ambiente : 1 atmósfera.

Tipo de impacto : Impacto 1.

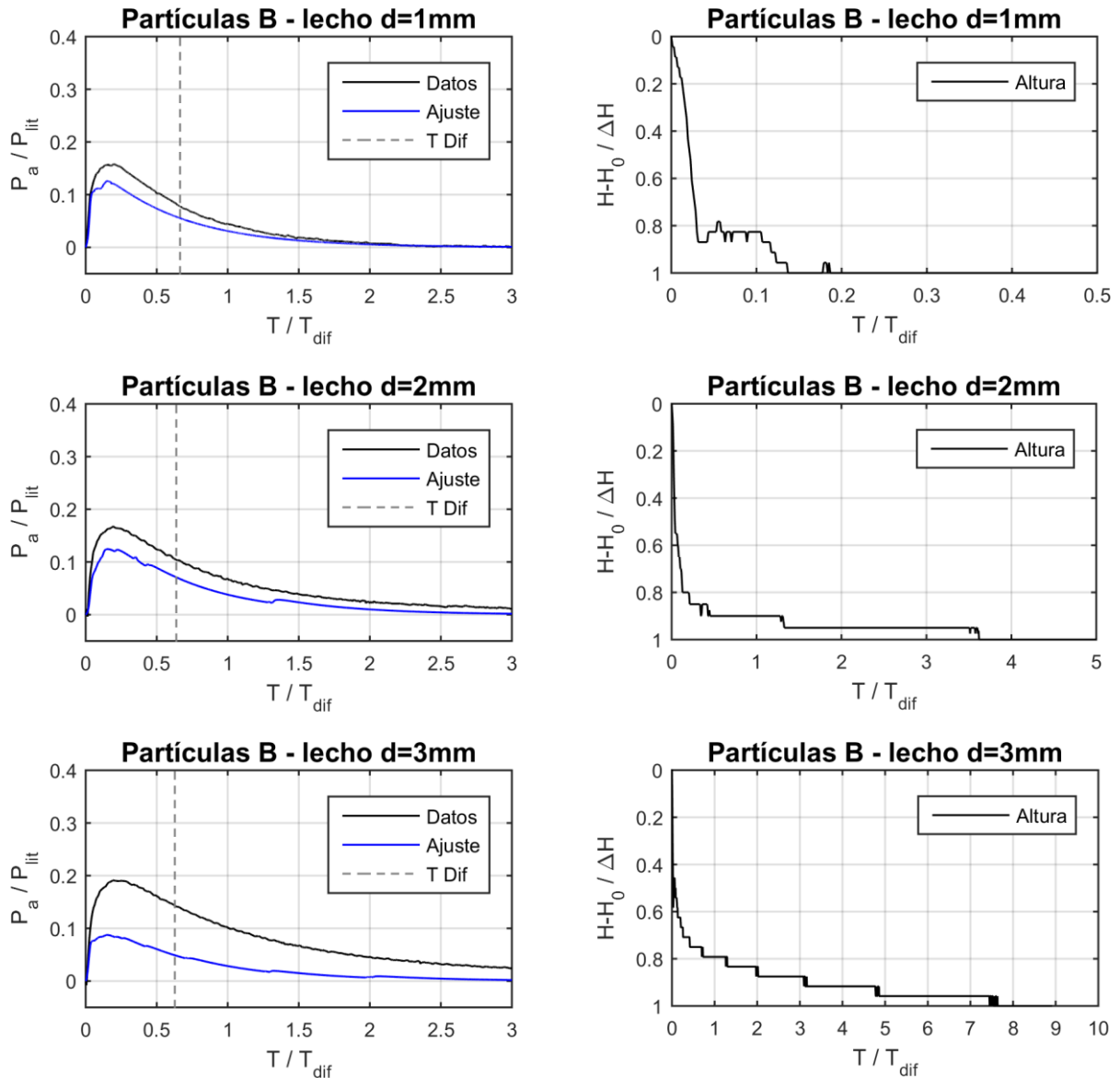


Figura 4.23. Ajuste de ecuación de difusión para ensayos con lecho y partículas clase B, para primeros impactos, considerando solamente el efecto de compactación de la columna.

Tipo de ensayos : Ajuste de presión de aire para primer impacto considerando efecto de percolación.  
 Tipo de partículas : Partículas A y B.  
 Presión Ambiente : 1 atmósfera.  
 Tipo de impacto : Impacto 1.

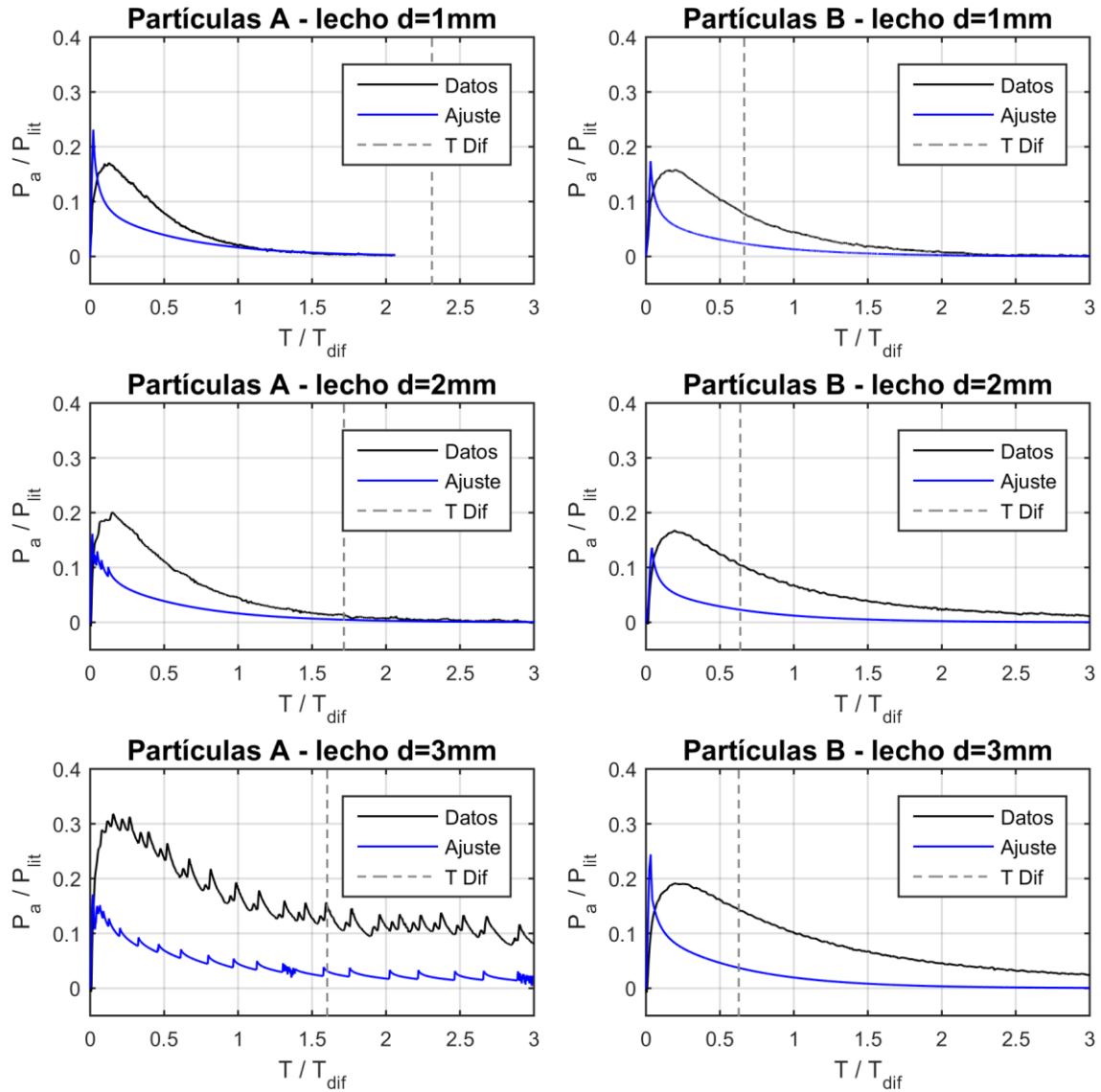


Figura 4.24. Ajuste de ecuación de difusión para ensayos con lecho y partículas clase A y B, para el primer impacto, considerando solamente el efecto de percolación de partículas finas en el lecho.

Tipo de ensayos : Ajuste de presión de aire para primer impacto considerando efecto de percolación y consolidación.  
 Tipo de partículas : Partículas A y B.  
 Presión Ambiente : 1 atmósfera.  
 Tipo de impacto : Impacto 1.

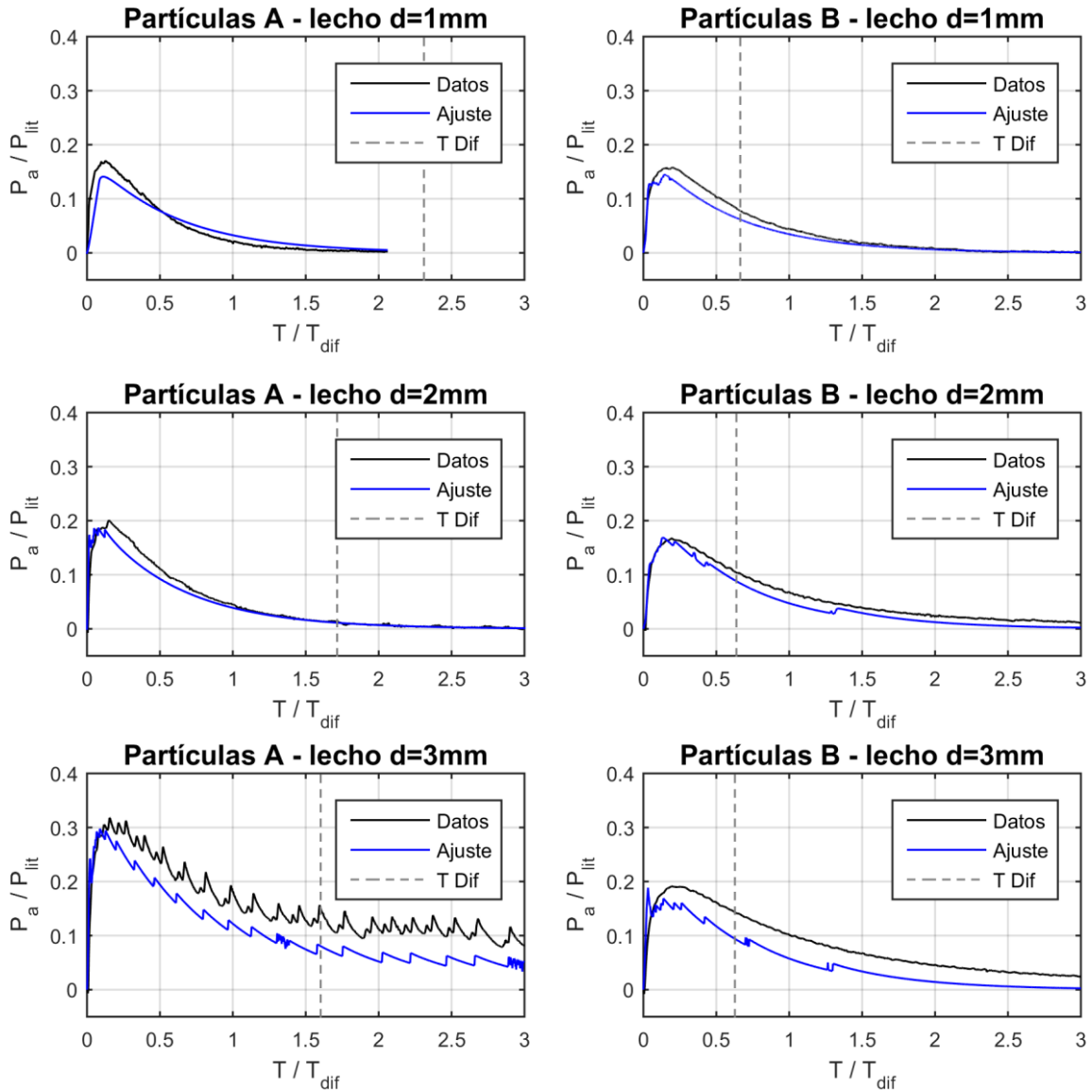


Figura 4.25. Ajuste de ecuación de difusión para ensayos con lecho y partículas clase A y B, para el primer impacto, considerando el efecto sumado de percolación y compactación de las partículas finas.

Tipo de ensayos : Ajuste de presión de aire para últimos impactos considerando efecto de consolidación.

Tipo de partículas : Partículas A y B.

Presión Ambiente : 1 atmósfera

Tipo de impacto : Impacto 1

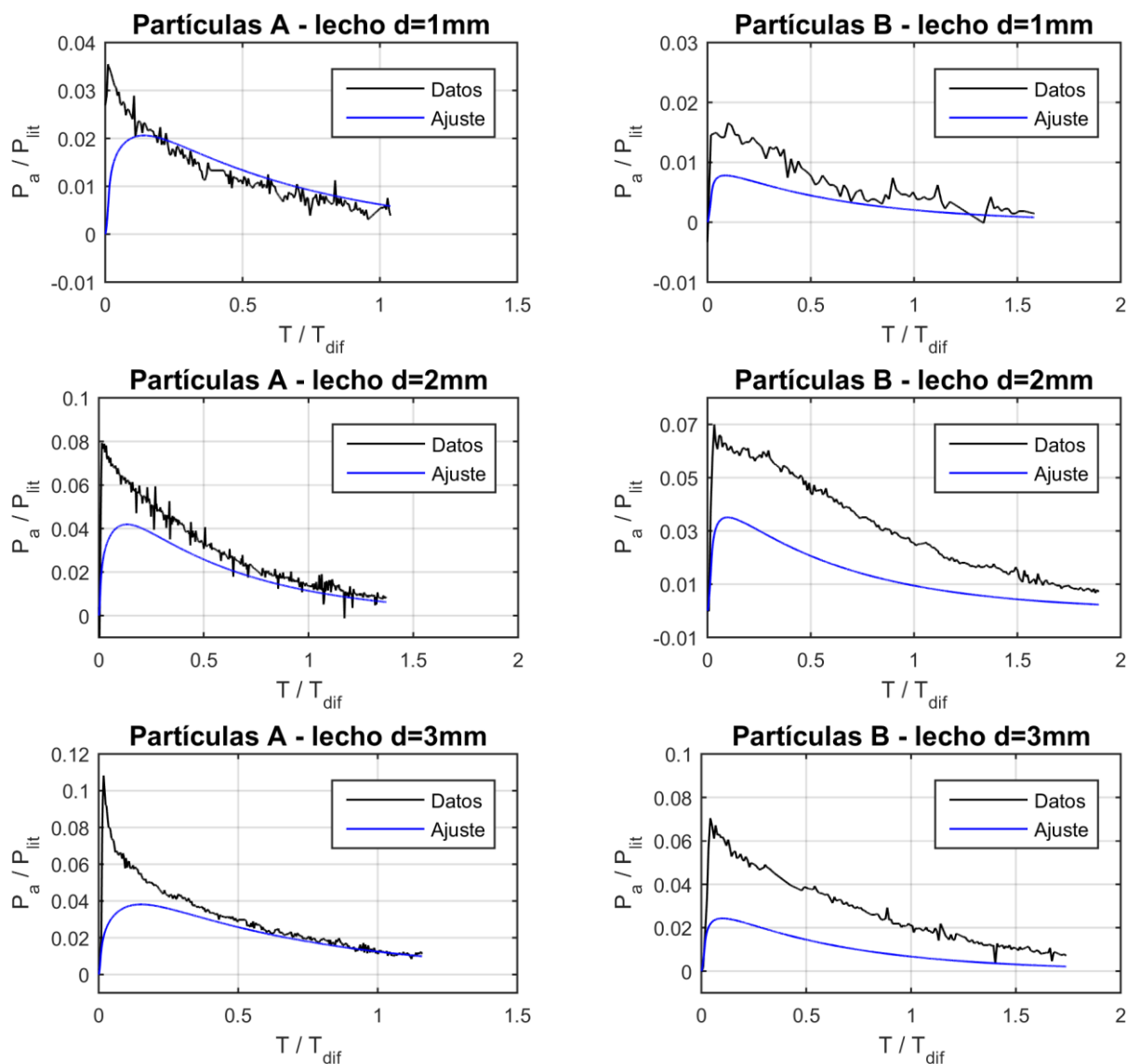


Figura 4.26. Ajuste de ecuación de difusión para ensayos con lecho y partículas clase A y B, para los últimos impactos, considerando solamente el efecto de compactación de la columna.

Tipo de ensayos : Ajuste de presión de aire para últimos impactos considerando efecto de percolación.

Tipo de partículas : Partículas A y B.

Presión Ambiente : 1 atmósfera.

Tipo de impacto : Impacto 1.

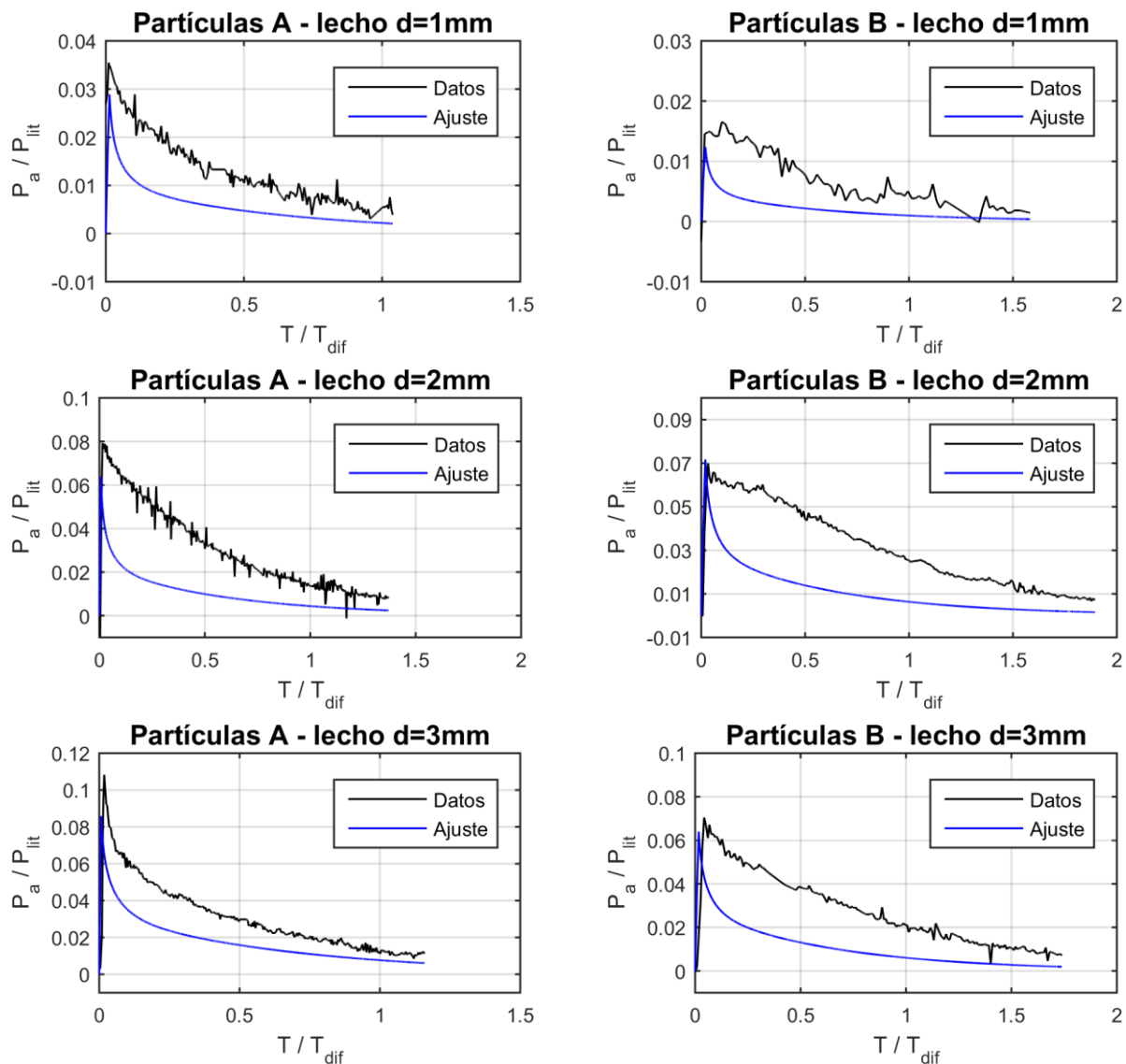


Figura 4.27. Ajuste de ecuación de difusión para ensayos con lecho y partículas clase A y B, para los últimos impactos, considerando solamente el efecto de percolación de partículas finas en el lecho.

Tipo de ensayos : Ajuste de presión de aire para últimos impactos considerando efecto de percolación y consolidación.

Tipo de partículas : Partículas A y B.

Presión Ambiente : 1 atmósfera.

Tipo de impacto : Impacto 1.

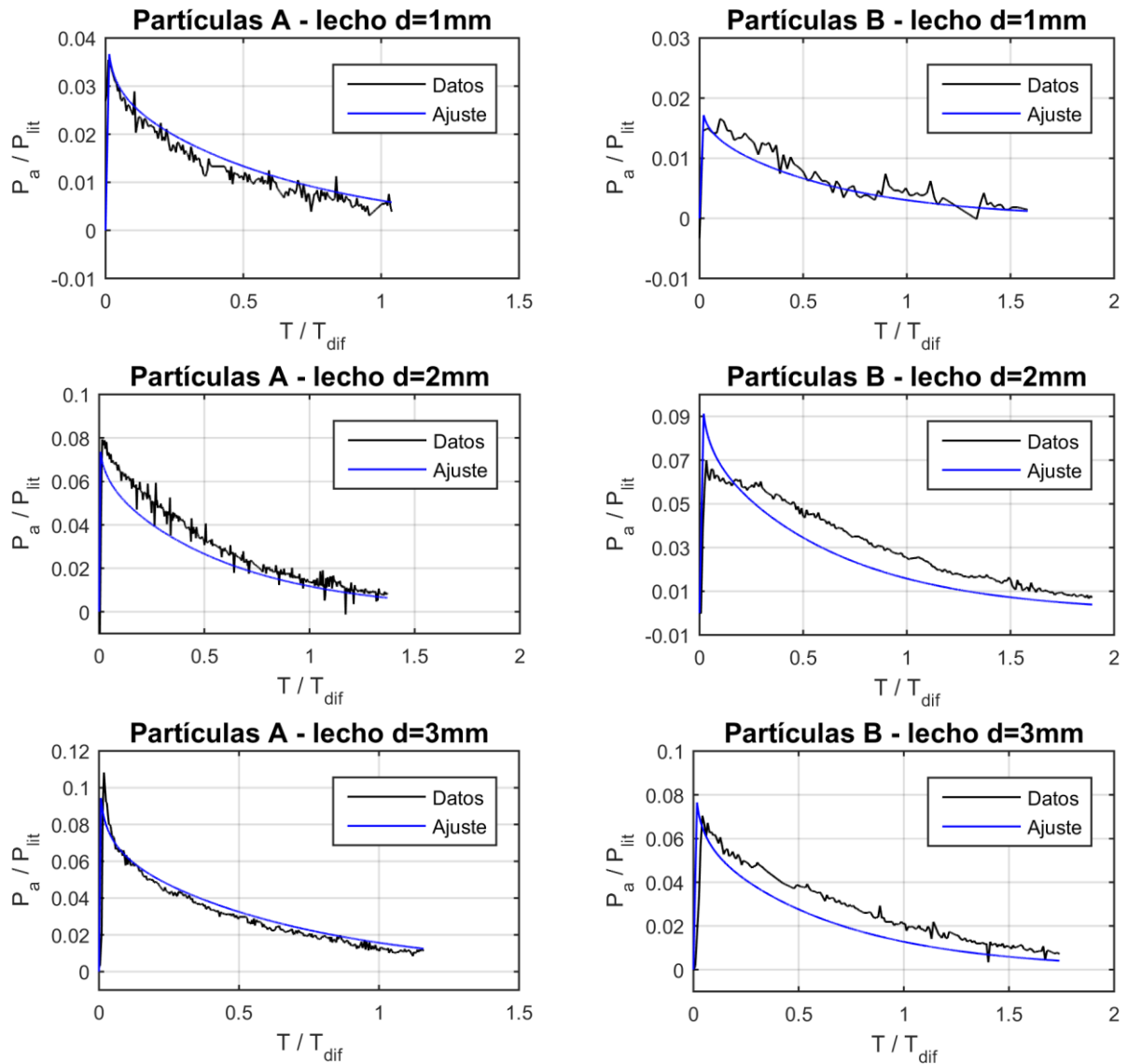


Figura 4.28. Ajuste de ecuación de difusión para ensayos con lecho y partículas clase A y B, para los últimos impactos, considerando el efecto sumado de percolación y compactación de las partículas finas.

Es importante mencionar que en los ensayos acoplados de percolación y compactación se empleó un factor entre 0 y 1 a cada efecto, ya que en la realidad no pueden ocurrir ambos efectos simultáneamente en su totalidad. Con esto se pretende considerar el porcentaje que aporta cada efecto a la presión resultante.

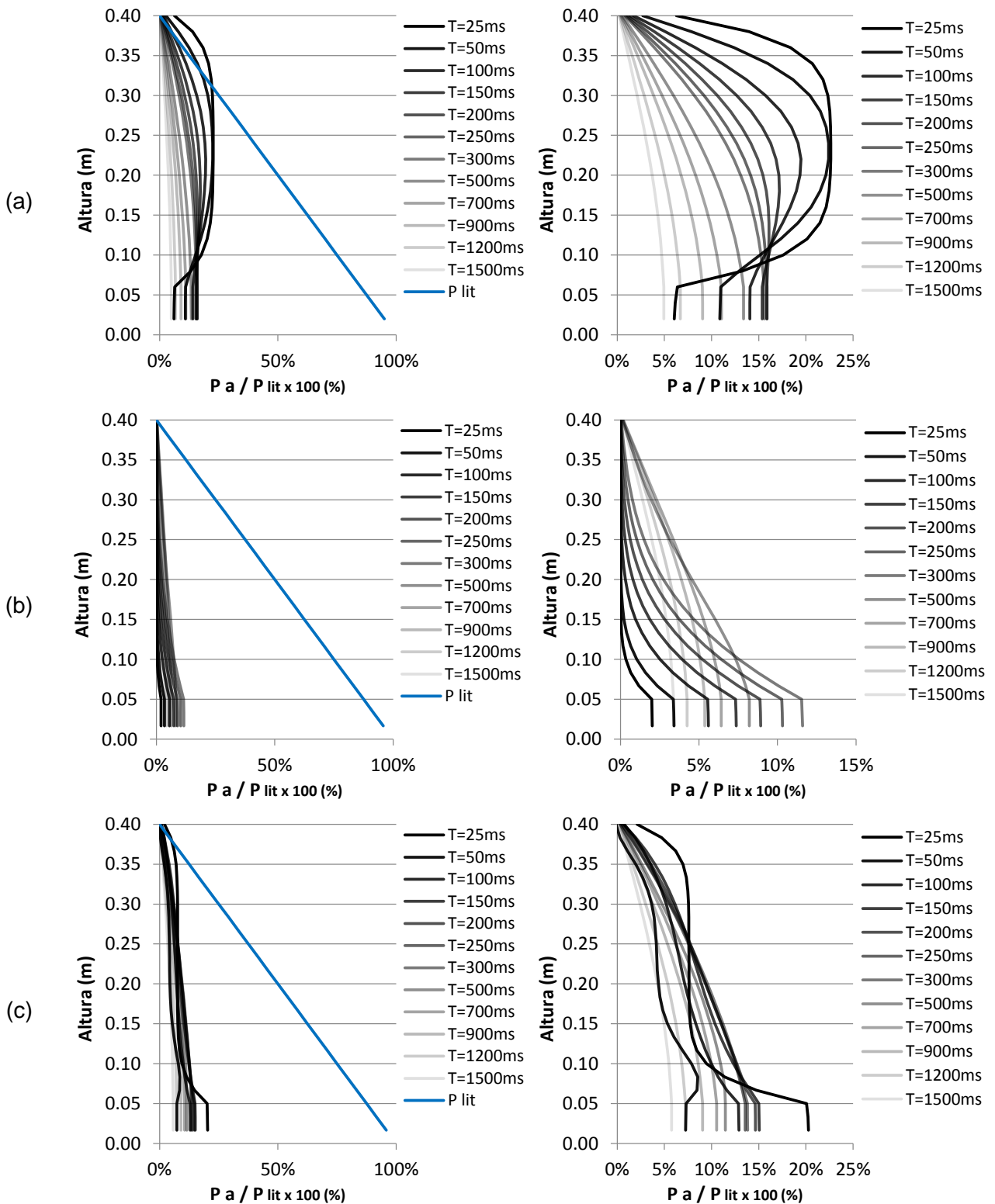
Se puede observar una diferencia notoria entre considerar el efecto de compactación y percolación, tanto en la forma en que varía la presión en el tiempo como en los valores alcanzados. La percolación afecta directamente al volumen de aire que se encuentra en contacto con el sensor, que es el aire intersticial del lecho, por lo que se entiende que sus alzas de presión sean más pronunciadas. Por otra parte, por medio de la compactación el volumen de aire intersticial de la columna es comprimido, desde donde el aire difunde hacia la atmósfera y hacia el lecho, siendo el aire que llega al lecho el que produce la sobrepresión que mide el sensor, explicando que la variación de presión sea menos pronunciada (*Figura 4.29*). Además, durante la compactación el aire también difunde hacia la atmósfera.

Al acoplarse ambos efectos se puede observar que la variación de presión estimada sigue la misma tendencia que los valores reales, y además sus valores son similares. Por otra parte, se percibe que la forma en que decae la presión no es tan cercana a la forma del ajuste, probablemente debido a que se utilizó un valor fijo del coeficiente de difusión como aproximación.

En los ensayos con lecho de 1mm se observó que hubo menos percolación que en los ensayos con los otros dos tipos de lechos, y consecuentemente se observa que los valores máximos alcanzados por el efecto de consolidación se acercan bastante a los valores reales.

En los últimos impactos se espera que el efecto de la consolidación disminuya, pero no desaparezca, como se concluyó de los ensayos en ausencia de lecho en la *sección 4.4.2*. Los valores obtenidos por percolación en este caso muestran mayor similitud a los datos reales, pero se puede observar que el mejor ajuste viene de considerar ambos efectos acoplados, en donde la percolación toma la principal ponderación en la mayoría de los casos.

La *Figura 4.29* muestra la variación temporal de la presión de aire, tanto en el lecho como en la columna de partículas finas, de acuerdo a lo modelado. Esta figura sugiere que la presión interna de la columna puede alcanzar valores mayores a los medidos por el sensor en la base del lecho, lo que significa una mayor fluidización sobre las partículas finas. Las sobrepresiones generadas cerca de la superficie pueden explicar lo observado en la *sección 4.3.4*, sobre el asentamiento de las partículas. Esto debido a que la presión litostática en la columna es menor a bajas profundidades, y en esta zona el conjunto de partículas puede ser más susceptible a la diferencia de presión entre sobrepresiones internas de la columna y la presión atmosférica (*Figura 2.9*), logrando aquel empuje ascendente frente a un colapso visto en la *Figura 4.19*.



**Figura 4.29. Distribución vertical de presiones en el tiempo, para partículas A sobre lecho de  $d=1\text{mm}$ , considerando efecto de (a) compactación, (b) percolación y (c) ambos efectos juntos.**



# Capítulo 5

## Conclusiones

El objetivo del estudio de la percolación de partículas finas en lechos de partículas gruesas a distintas presiones ambientales, se cumple, como así también los objetivos específicos. El montaje permitió llevar a cabo los ensayos, mientras que los datos y videos obtenidos fueron analizados mediante las herramientas computacionales consideradas. Los resultados pudieron ser clasificados de acuerdo a las variables estipuladas.

En los siguientes puntos se resumen las principales conclusiones obtenidas, divididos por temas.

### 5.1. Montaje experimental

La principal observación ocurre referente a los tipos de impactos utilizados. Comparando los dos impactos de péndulo, se observa que prácticamente no existe diferencia entre los resultados obtenidos utilizando impactos de tipo 1 o 2, a pesar de que el la energía del impacto 1 es casi el doble que la del impacto 2. Esto apunta a que la percolación inducida es indiferente a ambas configuraciones

En cuanto al montaje, también existen ciertas observaciones. Un segundo sensor de presión colocado por un costado del lecho mejoraría la fidelidad de los datos, ya que el sensor que se encuentra en la base es tapado por las partículas finas a medida que se produce la percolación. Este efecto puede generar algún retardo en la medición de presiones, principalmente en los últimos impactos de cada ensayo. Además, una serie de sensores de presión pueden ser colocados a lo alto del contenedor de partículas, para comprobar la veracidad de los datos estimados en la *sección 4.4*. Agregar todos estos sensores presenta un gran desafío, ya que se debe en hermetizar la parte trasera de cada sensor para poder someterlo al vacío juntamente con su parte superior. Por otra parte, las dimensiones del montaje experimental limitan la observación de ciertos fenómenos a baja presión ambiental, por lo que podría considerarse utilizar menores alturas de columnas de partículas finas y mayores alturas de lecho.

### 5.2. Percolación a distintos grados de vacío

La presencia de aire intersticial en este caso en particular no influyó notoriamente en el descenso total de la columna de partículas finas. Esta conclusión se restringe solamente al presente montaje experimental, ya que no se descarta que en otros trabajos similares de mayor

envergadura puedan encontrarse algunas diferencias significativas. En este caso el tamaño del lecho fue limitante en la duración de los ensayos, para poder haber observado mejor alguna tendencia en este respecto.

La presión ambiente influye notoriamente en la forma en que la columna colapsa frente a un impacto hasta asentarse sobre el lecho. Los registros muestran que a presión atmosférica, en los primeros impactos existen varias expansiones de la columna durante su proceso de asentamiento, como pequeños rebotes (*Figura 4.19*). Esto no es observado a 5% de la presión atmosférica, en donde se observa que la columna siempre desciende durante su colapso frente a un impacto.

### 5.3. Percolación y consolidación a presión atmosférica

No es posible separar el aporte de la percolación y de la consolidación a las alzas de presión observadas, ya que no se puede conocer con certeza la cantidad de material que percola en cada impacto. Mediante la resolución de la ecuación de difusión aplicada a la configuración presente fue posible confirmar que ambos efectos participan conjuntamente, debido a que los supuestos utilizados entregaron valores similares a los reales. Esto es relevante, considerando que el modelo es basado en aproximaciones de ciertos valores. Para poder corroborar este análisis, se pueden agregar sensores de presión a distintas alturas de la columna, como se menciona anteriormente.

### 5.4. Fluidización

La mayor parte de la fluidización se debe al rápido colapso de la columna de material fino (2% y 6% del tiempo difusivo, para partículas A y B respectivamente). Los valores de fluidización más altos fueron alcanzados para los lechos más gruesos, que es en donde se observó mayor percolación. Las partículas tipo A, que son las más finas, mostraron una tendencia a generar mayores porcentajes de fluidización que las partículas B. Estos valores varían entre el 25% y 30% de fluidización.

El modelo utilizado muestra que las presiones internas en ciertas alturas de la columna pueden ser mayores a los valores de  $P_{max}$  medidos. La baja difusión de las partículas permite retener parte del aire por algún momento, y esa alza interna de presión en la columna no llega directamente al sensor de presión (*Figura 4.29*).

Los empujes ascendentes observados en la superficie de la columna entregan indicios de una fluidización parcial sobre una zona cercana a la superficie. Esta puede ser una de las explicaciones a los extensos alcances observados en experimentos de ruptura de presa.

# Capítulo 6

## Bibliografía

Chedeville, C. and Roche, O. 2014. Autofluidization of pyroclastic flows propagating on rough substrates as shown by laboratory experiments. *JGR*.

Cheng, X., R. Smith, H.M Jaeger, and S. R. Nagel, 2008. Formation of air bubbles during compaction of a granular pack, *Phys. Fluids* 20(12), 123305-123305.

Cole, P. D., Calder, E.S., Sparks, R.S.J., Clarke, A.B., Druitt, T.H., Young, S.R., Herd. R.A., Harford, C.L., and Norton, G.E., 2002. Deposits from dome-collapse and fountain-collapse pyroclastic flows at Soufrière Hills Volcano, Montserrat, in Druitt, T.H., and Kokelaar, B.P., eds., *The Eruption of Soufrière Hills Volcano, Montserrat, from 1995 to 1999: Geological Society of London Memoir* 21, p.231-262.

Geldart, D., 1973. Types of gas fluidization: *Powder Technol.*, 7, 385-292, doi: 10.1016/0032-5910(73)80037-3.

H. K. Pak, E. Van Doom, and R. P. Behringer, 1994. Effects of Ambient Gases on Granular Materials under Vertical Vibration. *Department of Physics and Center for Nonlinear and Complex Systems, Duke University, Durham, North Carolina*.

Girolami, L., T. H. Druitt, O. Roche, and Z. Khrabrykh (2008), Propagation and hindered settling of laboratory ash flows, *J. Geophys. Res.*, 113, B02202, doi:10.1029/2007JB005074.

Girolami, L., O. Roche, T. H. Druitt, and T. Corpetti (2010), Particle velocity fields in laboratory ash flows, *Bull. Volcanol.*, 72(6), 747–759.

Homan, T., Gjaltema, C., & van der Meer, D. (2014). Collapsing granular beds: The role of interstitial air. *Physical Review E*, 89(5), 052204.

Iverson, R. M. (1997), The physics of debris flows, *Rev. Geophys.*, 35, 245–296.

Janssen, Z. (1895). Experiments on corn pressure in silo cells. *Engineer in Bremen, Germany*, 31st August.

Loughlin, S.C., Calder, E.S, Clarke, A., Cole, P.D., Luckett, R., Mangan, M.T., Pyle, D.M., Sparks, R.S.J., Voight, B., and Watts, R.B., 2002. Pyroclastic flows and surges generated by the 25 June 1997 dome collapse, Confière Hills Volcano, Montserrat, from 1996 to 1999: *Geological Society of London Memoir* 21, p.191-209.

Lube, G., Huppert, H. E., Sparks, R. S. J., & Freundt, A. (2011). Granular column collapses down rough, inclined channels. *Journal of Fluid Mechanics*, 675, 347-368.

Phillips, J. C., A. J. Hogg, R. R. Kerswell and N. H. Thomas, 2006. Enhanced mobility of granular mixtures of fine and coarse particles, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 246(3), 466-480.

Roche, O., 2012, Depositional processes and gas pore pressure in pyroclastic flows: An experimental perspective: *Bulletin of Volcanology*, v. 74, p. 1807–1820, doi: 10.1007/s00445-012-0639-4.

Roche, O., Montserrat, S., Niño, Y., and Tamburrino, A., 2008, Experimental observations of waterlike behavior of initially fluidized, unsteady dense granular flows and their relevance for the propagation of pyroclastic flows: *Journal of Geophysical Research*, v. 113, B12203, doi:10.1029/2008JB005664.

Roche, O., Montserrat, S., Niño, Y., and 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*, v. 115, B09206, doi: 10.1029/2009JB007133.

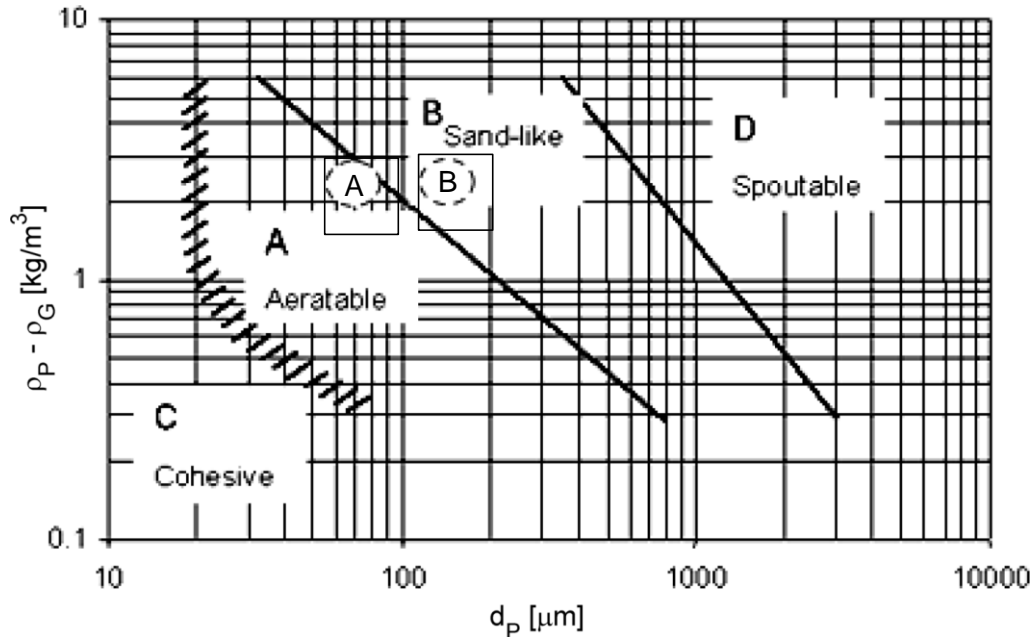
Roche, O., M. A. Gilbertson, J. C. Phillips, and R. S. J. Sparks, 2005. Inviscid behavior of fines-rich pyroclastic flows inferred from experiments on gas-particle mixtures: *Earth Planet. Sci. Lett.*, 240, 401-414.

Roche, O., Niño, Y., Mangeney, A., Brand, B., and Pollock N., 2014. Dynamic pore-pressure variations induce substrate erosion by pyroclastic flows: *Geology* 2013;41 ;1107-1110, doi:10.1130/G34668.1.

# Anexos

## Anexo A Clasificación de Geldart

La clasificación de Geldart (Geldart, 1978) divide a los materiales granulares de acuerdo a su capacidad de ser fluidizados por un flujo ascendente.



**Figura 6.1. Representación gráfica de la clasificación de Geldart, en donde  $\rho_p$  es la densidad de las partículas,  $\rho_g$  es la densidad del fluido y  $d_p$  es el diámetro de las partículas A y B corresponde a los grupos de partículas utilizadas en los ensayos del presente trabajo, cuyos diámetros medios son 75  $\mu\text{m}$  y 150  $\mu\text{m}$ , respectivamente.**

Geldart clasifica dichos materiales de acuerdo a la densidad de las partículas, la densidad del fluido y el tamaño de las partículas, como se puede apreciar en la Figura 6.1.

Los grupos descritos por Geldart son los siguientes:

- Grupo A: Las partículas alcanzan la fluidización a bajas velocidades de aire ( $U_{mf}$ ), y luego existe una expansión lineal del lecho en función de la velocidad, hasta que se alcanza la velocidad de burbujeo ( $U_{mb}$ ).
- Grupo B: Las velocidades  $U_{mf}$  y  $U_{mb}$  son casi idénticas, lográndose una fluidización en la que prácticamente no hay expansión del lecho.
- Grupo C: Las partículas son cohesivas. La fuerza de dicha cohesión es difícil de vencer mediante un flujo de aire, dificultando la existencia de fluidización.
- Grupo D: Partículas de gran tamaño, y cuya fluidización requiere de una alta velocidad de aire ascendente.

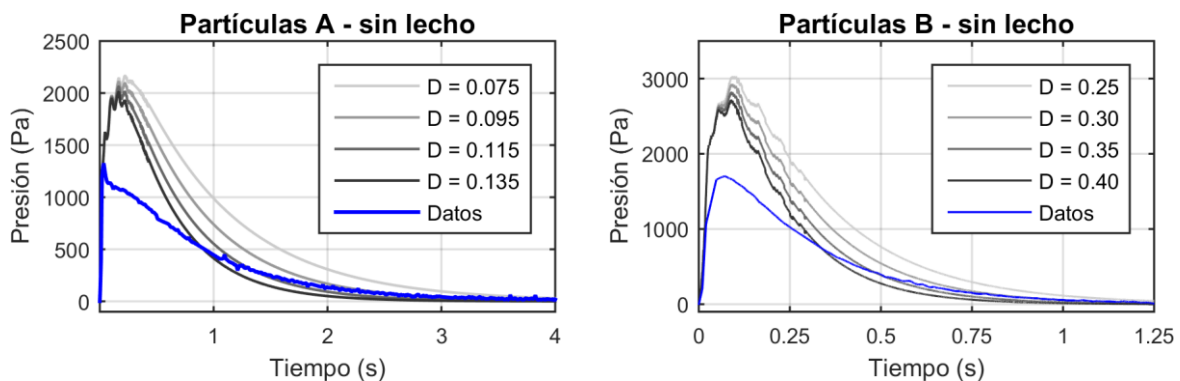
## Anexo B Condiciones para calcular coeficientes de difusión

Las siguientes condiciones fueron usadas en primera instancia, para los ensayos en ausencia de lecho:

### Primer modelo

- Como condición de borde superior, se considera presión constante, igual a la presión atmosférica.
- En la base del contenedor se impone la condición de no flujo.
- El espaciamiento de tiempo es de  $\Delta t = 0.0001$ .
- La variación de presión en cada instante,  $\Delta P_t$ , se calcula en función del descenso,  $\Delta h_t = h_{t-1} - h_t$ .

Los primeros resultados muestran que las alzas de presión calculadas son mayores a las registradas, y no es posible encontrar un valor de D que permita un buen ajuste.

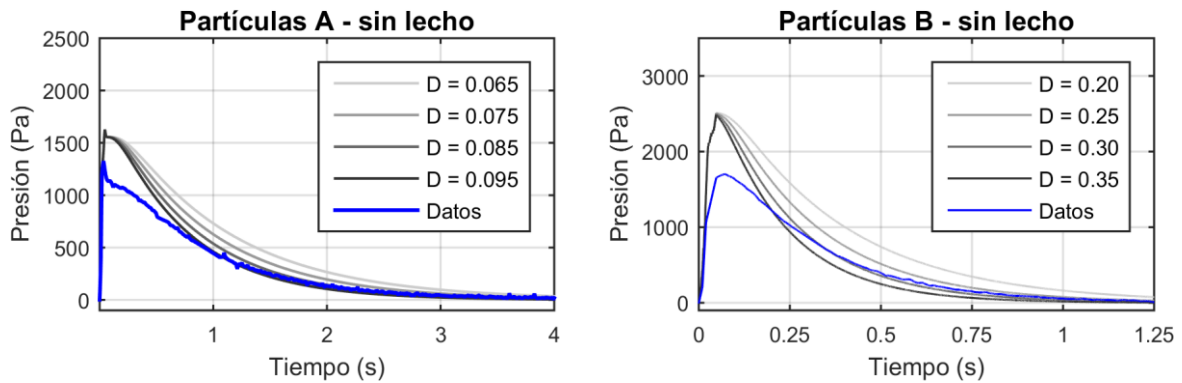


**Figura 6.2. Primer ajuste de coeficientes de difusión.**

### Segundo modelo

- Se considera el intervalo de tiempo del primer descenso como importante. Desde este tiempo en adelante no se considera más aporte de presión.
- Se ha visto que el primer descenso ocurre en un tiempo igual al tiempo de caída libre ( $t = \sqrt{2d/g}$ ), considerando la superficie de la columna como objeto en caída.
- Se desprecia el efecto de los ascensos y descensos de la superficie de la columna que ocurren después del primer descenso.

Se puede observar en la *Figura 6.3* que el modelo se asemeja más a los datos reales, pero aun los valores de  $P_{max}$  estimados siguen siendo altos.



**Figura 6.3. Segundo ajuste de coeficientes de difusión.**

Tercer modelo

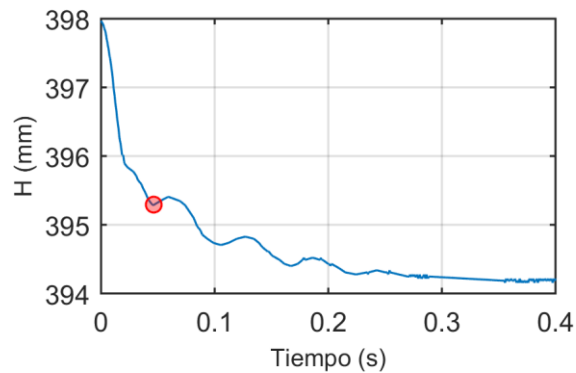
- Esta vez se aplica un factor menor a 1 a las presiones calculadas en cada paso de tiempo, desde el inicio del colapso hasta que concluye el primer descenso (*Figura 6.4*, punto rojo), tomando en cuenta que este tramo es el que aporta principalmente la sobrepresión

$$F = \frac{H_i - H_{td}}{H_i - H_f} \quad \text{e - 6.1}$$

$H_i$  : *Altura inicial.*

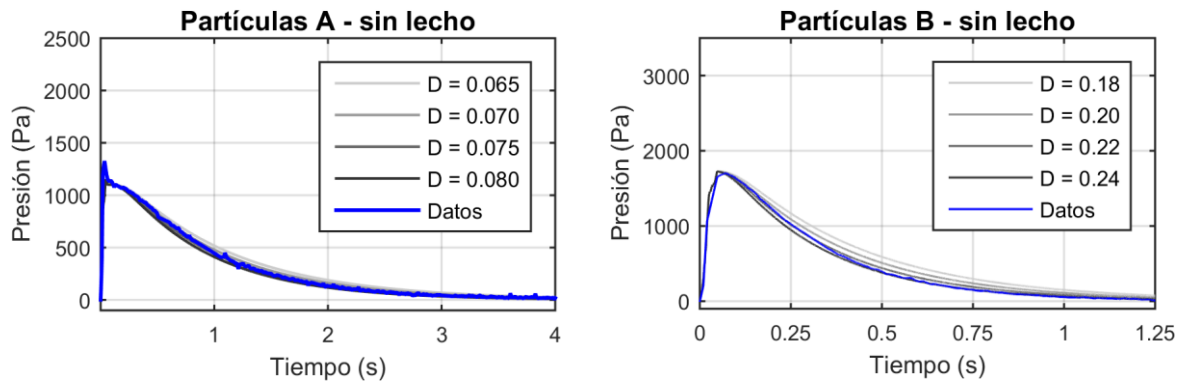
$H_f$  : *Altura final.*

$H_{td}$  : *Altura en el momento en que termina el primer descenso.*



**Figura 6.4. Ejemplo del seguimiento de la superficie de la comuna de partículas finas durante un colapso. El punto rojo indica el momento en que termina el primer descenso.**





**Figura 6.5. Tercer ajuste de coeficientes de difusión.**