



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

ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL COLAPSO DE MATERIAL GRANULAR  
NO COHESIVO EN AMBIENTES NEWTONIANOS Y PSEUDOPLÁSTICOS

MEMORIA PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

NICOLAS ANDRES CELIS PEREZ

PROFESOR GUÍA:  
ALDO TAMBURRINO TAVANTZIS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
SANTIAGO MONTSERRAT MICHELINI  
YARKO NIÑO CAMPOS

FINANCIADO POR PROYECTO FONDECYT 1130910

SANTIGO DE CHILE  
2017

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO  
DE INGENIERO CIVIL  
POR: NICOLÁS ANDRÉS CELIS PÉREZ  
FECHA: 08/08/2017  
PROF. GUÍA: Sr. ALDO TAMBURRINO TAVANTZIS

## ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL COLAPSO DE MATERIAL GRANULAR NO COHESIVO EN AMBIENTES NEWTONIANOS Y PSEUDOPLÁSTICOS

El estudio de flujos granulares resulta importante en distintas aplicaciones industriales, como también para lograr una mejor comprensión de fenómenos naturales. Los flujos granulares que ocurren en la naturaleza muchas veces presentan un gran poder destructivo. Por ello, la predicción de la ocurrencia y comportamiento de éstos a escalas geofísicas resulta de gran interés para el ordenamiento territorial y evaluación del riesgo en asentamientos humanos y numerosas faenas industriales.

Se realiza un estudio experimental para analizar la importancia de la reología del fluido en el colapso de una columna de material granular no-cohesivo, en un fluido ambiente que es newtoniano o pseudoplástico, generando desplazamientos de material granular en condiciones controladas. Para esto, se trabaja en una instalación de acrílico rectangular de 0.1 m x 1.4 m x 0.3 m (ancho x largo x alto), la cual se rellena con fluidos ambientes a distintas reometrías y con distintos tipos de materiales granulares.

Los experimentos consisten en la generación de un flujo de material granular, el cual se encuentra inicialmente sostenido por una compuerta. Al levantar esta compuerta se genera un flujo de material granular y fluido, el cual permite analizar cómo este flujo es influenciado a medida que se cambia la reometría del fluido ambiente en base a cómo se comporta el material granular en términos de desplazamiento y velocidad en el tiempo.

El desarrollo del colapso de material granular típicamente presenta un patrón común independiente del material utilizado. Inicialmente presenta un rápido aumento en su velocidad hasta llegar a un punto de velocidad constante, para finalmente desacelerar hasta llegar al reposo.

En este trabajo se puede ver que al trabajar en fluidos pseudoplásticos se genera un flujo secundario debido al esfuerzo de corte entre la compuerta y el fluido ambiente, que genera formas finales distintas a las típicamente conocidas para materiales granulares trabajados en aire. Para los resultados de distancia versus tiempo de materiales granulares en los fluidos ambientes newtonianos, se obtienen las curvas con forma de S que han sido registradas ampliamente en la bibliografía.

En base a todos los análisis realizados para los distintos fluidos ambientes, y en particular al mirar los resultados obtenidos para la relación entre la distancia final del frente y la razón de aspecto, se puede concluir que los factores más relevantes dentro de los parámetros estudiados en este trabajo corresponden a la viscosidad del fluido ambiente y la uniformidad del material granular a colapsar.

## Agradecimientos

Quisiera agradecer a todas y cada una de las personas que de una u otra forma hicieron más ameno mi paso por esta universidad. En particular, quisiera agradecer a los funcionarios del departamento de ingeniería civil, a quienes no creí que podría terminar apreciando, pero que al conocerlos fueron en general muy amables conmigo. Dentro de este grupo quisiera agradecer de forma particular a la Mónica, a la Paty y a la Jaqui, por su amabilidad y paciencia conmigo, y los funcionarios de los laboratorios de hidráulica y de calidad de aguas, don Manuel y la Vivi, que fueron demasiado agradables y siempre tuvieron la mejor disposición para ayudarme cuando se los solicité.

Gracias también, a los profes de la Comisión, Aldo, Santiago y Yarko por sus aportes que fueron fundamentales para que este texto se convirtiera en algo presentable. Quisiera agradecer en especial al profesor Aldo, quien es una de las principales razones de que este trabajo pudiera ser terminado. Muchísimas gracias profesor por todo el tiempo que le hice perder, por su paciencia y su amabilidad para ayudarme en los momentos difíciles.

Gracias a los amigos que hice en la U, a todos y cada uno con los que compartí alegrías y pesares. En especial, a Pablo, a Ilian y a la Venus, quienes me acompañaron la mayor parte de la carrera y que son de las personas que más me conocen. Gracias a Jorge, al Chino y al Gabo, a quienes conocí una vez entre en la especialidad y fueron los mejores compañeros y amigos que pueda tener.

Finalmente quisiera agradecer a mi familia, en particular a mis padres quienes han sido todo en mi vida y jamás podré hacer lo suficiente para expresar lo mucho que aprecio todo lo que han hecho por mí. A mi Mamá por ser mi sostén emocional, muchísimas gracias por tu cariño y paciencia conmigo. A mi Papá por ser tanto un padre como un amigo, y en general, a toda mi familia, pues tengo una maravillosa familia gracias a ustedes y sé que puedo contar con ustedes en todo momento.

# TABLA DE CONTENIDO

1. Introducción.....	1
1.1 Aspectos Generales.....	1
1.2 Objetivos.....	1
1.3 Estructura del Informe .....	2
2. Revisión Bibliográfica.....	3
2.1 Clasificación de Fluidos .....	3
2.2 Antecedentes Experimentales.....	4
3. Diseño Experimental y Metodología.....	7
3.1 Montaje Experimental .....	7
3.2 Materiales Utilizados .....	7
3.2.1 Materiales Granulares.....	7
3.2.2 Cámara de Video .....	8
3.3 Metodología.....	8
3.3.1 Carga del Material .....	8
3.3.2 Trabajo Posterior al Experimento.....	9
3.3.3 Procesamiento de Imágenes.....	9
3.4 Parámetros Ensayados .....	9
3.4.1 Granulometría.....	10
3.4.2 Reologías de Fluidos Ambientes .....	11
4. Presentación de Resultados Experimentales .....	14
4.1 Desarrollo del Colapso .....	14
4.1.1 Colapso en Aire .....	14
4.1.2 Colapso en Agua.....	16
4.1.3 Colapso en CMC1 .....	17
4.1.4 Colapso en CMC2 .....	18
4.2 Velocidad del Frente.....	19
4.3 Formas Finales del Ensayo .....	24
5. Análisis de Resultados.....	25
5.1 Parámetros Adimensionales.....	25
5.1.1 Análisis del Desplazamiento.....	26

5.1.2	Análisis de Adimensionales.....	34
5.2	Análisis del Fenómeno de Colapso.....	44
6.	Conclusiones .....	49
7.	Bibliografía.....	51

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1 Aspectos Generales

El colapso de material granular es un fenómeno que se puede dar tanto de forma natural como artificial en nuestro planeta. Existen una serie de fenómenos a escala geofísica asociados al colapso de material granular que podemos mencionar, como por ejemplo, el colapso de calderas volcánicas, aluviones, flujo de material granular producto de rotura de presas y/o tranques de relave, etc. Debido a todos los fenómenos anteriormente mencionados, resulta de gran relevancia entender el fenómeno del colapso de material granular, el cual ha sido estudiado tanto en forma experimental como numérica (Lube et al., 2005; Roche et al. 2008; Meruane et al 2010).

En el colapso de una columna granular compiten dos fuerzas: las que generan el movimiento de las partículas y las que se oponen a él. La fuerza motriz es la gravitacional y las resistivas comprenden las resultantes de la interacción sólido - sólido (fricción Coulómbica y colisiones), de la interacción sólido - fluido (fuerza de arrastre) (Meruane et al, 2008), y de la interacción fluido - fluido. Colapsos en medios newtonianos han sido ampliamente estudiados, básicamente con agua o aire como fluido ambiente (Lube et al. 2005; Roche et al. 2008, 2010 y 2014; Meruane et al 2010). Sin embargo, no existen estudios cuando el medio ambiente es no-newtoniano. Esta memoria busca contribuir a llenar este vacío, para lo cual se propone un enfoque experimental a partir del cual se caracterizará el fenómeno y mediante un análisis de los parámetros adimensionales que lo definen, lograr relaciones funcionales entre las características del colapso, del fluido y de las partículas sólidas, así como comparar con colapsos en un medio ambiente newtoniano.

### 1.2 Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es estudiar el efecto que tiene la reología del fluido ambiente en el colapso de una columna de material granular

Objetivos Específicos:

- Habilitar la instalación experimental, definir el material granular y el fluido ambiente, y sistemas de registro y procesamiento de datos que permitan cuantificar el fenómeno registrado experimentalmente.
- Experimentar con distintos materiales granulares y fluidos ambientes con distintas reologías (pseudoplástico o newtoniano), definir parámetros adimensionales que

caracterizan el fenómeno, y determinar la influencia de la reología en los parámetros característicos del colapso de un material granular no cohesivo.

- Inferir de los resultados experimentales relaciones que permitan ligar las características del colapso con las propiedades del fluido ambiente y del material granular, y comparar la fenomenología del colapso en un medio ambiente newtoniano con la que se tiene en un medio pseudoplástico.

### **1.3 Estructura del Informe**

Los contenidos por Capítulos que contiene el presente informe son:

Capítulo 2: Revisión Bibliográfica. Se presenta el marco teórico relacionado con el fenómeno y el estado del arte de estudios experimentales en el área.

Capítulo 3: Diseño Experimental y Metodología. Se detalla la instalación experimental utilizada, incluyendo los componentes y como interactúan estos entre sí. Además, se incluye una metodología experimental para la toma de datos y los distintos sets de experimentos a realizar.

Capítulo 4: Presentación de Resultados. Se presentan los registros de las mediciones para los colapsos realizados tanto en medios newtonianos como en medios pseudoplásticos.

Capítulo 5: Análisis de Resultados. Se estudian los resultados obtenidos con el fin de encontrar patrones de comportamiento.

Capítulo 6: Conclusiones. Se presentan las principales relaciones detectados durante el desarrollo del estudio experimental.

## Capitulo 2

# Revisión Bibliográfica

### 2.1 Clasificación de Fluidos

Fluidos no newtonianos son por definición, todos aquellos fluidos que no cumplen con la ley de Newton: “El esfuerzo de corte es proporcional al gradiente de velocidad o velocidad de corte”. Dicho de otra manera, son fluidos newtonianos aquellos que cumplen con la siguiente ecuación:

$$\tau_{ij} = \mu \dot{\gamma}_{ij} \quad (2.1)$$

En donde  $\mu$  representa a la viscosidad dinámica del fluido y  $\dot{\gamma}$  la tasa de deformación angular,

$$\dot{\gamma}_{ij} = \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.2)$$

Una primera clasificación de los fluidos no newtonianos los divide en dos categorías:

- 1- Comportamiento independiente del tiempo
- 2- Comportamiento dependiente del tiempo

Respecto al primer tipo (independiente del tiempo), se destaca que el esfuerzo de corte solo depende de la tasa de deformación angular ( $\dot{\gamma}$ ).

Para representar este tipo de fluidos no newtonianos se conocen varios modelos reológicos, siendo los modelos de Ostwald de Waele o Ley de la Potencia los que se utilizan en fluidos pseudoplásticos, el cual corresponde a la siguiente ecuación:

$$\tau_{ij} = K \cdot |\dot{\gamma}|^{n-1} \dot{\gamma}_{ij} \quad (2.3)$$

en donde  $K$  y  $n$  son parámetros empíricos, conocidos respectivamente como el índice de consistencia y el índice de comportamiento de flujo. Para el caso de un flujo 2 - D uniforme, la relación anterior se reduce a:

$$\tau_{xy} = K \cdot \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)^n \quad (2.4)$$

Dentro de esta gama de fluidos con comportamiento independiente del tiempo existe un grupo conocido como fluidos viscoplásticos, los cuales presentan un comportamiento sólido mientras el esfuerzo de corte no supere un valor de fluencia  $\tau_0$ . Una vez superado este valor pueden adoptar



un comportamiento newtoniano (plástico de Bingham), así como puede adoptar un comportamiento que sigue la ley de la potencia (Herschel – Bulkley).

Con respecto a los fluidos con comportamiento dependiente del tiempo se pueden mencionar dos formas en las que este fenómeno se puede dar: tixotropía y reopexia. La tixotropía es la propiedad de algunos fluidos no newtonianos que muestran una disminución de su viscosidad aparente con el tiempo (a mayor tiempo se someta el fluido a esfuerzo, más disminuye su viscosidad aparente), mientras que la reopexia corresponde al fenómeno inverso.

## 2.2 Antecedentes Experimentales

El estudio del colapso de material granular está fuertemente marcado por los estudios en fluidos ambientes newtonianos, siendo el fluido ambiente de estudio más común el aire. Diversos autores han estudiado el fenómeno del colapso de material granular en base a la liberación de éste en una superficie generalmente horizontal, para analizar su comportamiento y estudiarlo en base a lo que teóricamente se esperaría, esto considerando las principales fuerzas que dominan en este proceso (fricción de Coulomb y fuerza de arrastre, advección, gradientes de presión del sólido/fluido, etc.).

Dentro de los trabajos realizados esta última década, los principales autores estudiados corresponden a Lube, Lajeunesse y Roche. En particular, los primeros dos investigadores mencionados siguieron una línea de estudio bastante similar. Lube et. al. (2004) y Lajeunesse et. al. (2005), presentaron estudios en el cual se analiza la propagación de material granular en un plano horizontal. Para estos estudios, el montaje consistía en una superficie horizontal en la cual se posa un cilindro relleno con material granular, el cual es retirado para analizar la propagación del material que este contiene. Si bien cada uno de los autores antes mencionados trabajó con diferentes materiales y diferentes tipos de granos, las principales conclusiones que se obtienen de estos estudios son bastante parecidas entre sí. Dentro de las conclusiones obtenidas, se destaca la relevancia de un parámetro bastante utilizado en estos estudios que denominan como razón de aspecto (en este trabajo se denota a la razón de aspecto como “ $r$ ”), el cual se define como la razón entre la altura inicial de la columna de material granular ( $h_0$ ) y la distancia inicial de la misma ( $x_0$ ). Lajeunesse encontró que para valores de  $r$  menores a 3 el flujo granular se deposita produciendo un cono truncado, mientras que para mayores valores de  $r$ , la parte superior de la columna desciende conservando su forma, mientras que la base de la pila se propaga de forma radial, lo cual describen como un sombrero mexicano. Destaca también que en base a las diferentes variantes trabajadas en laboratorio, se observa que para estos rangos de  $r$  se obtienen las mismas dinámicas de los regímenes y morfologías de los depósitos, independiente de las propiedades del substrato o del tamaño de grano. Más aún indica que la fracción de energía disipada en el flujo y la velocidad de propagación reescalada solo varían con la razón de aspecto y no dependerían del tamaño de grano, las propiedades del substrato ni de la masa.

Lube (2005) y Lajeunesse (2005) continúan su estudio de flujos de material granular, al cambiar el montaje de estudio desde un cilindro que propaga el material en forma radial a un canal rectangular el cual presenta un reservorio con material granular, desde el cual el material granular es liberado al abrir una de las compuertas del reservorio. Si bien las dimensiones difieren entre los trabajos realizados en Lube et. al. (2005) y los realizados en Lajeunesse et. al. (2005), estos son similares en la forma del canal y en particular en la forma de abertura de la compuerta (un

peso es soltado para que una cuerda acoplada a un sistema de poleas produzca una tensión que levante la puerta a un tiempo fijo). Si bien los valores numéricos cambian, se vuelven a encontrar relaciones para describir el flujo en términos de la razón de aspecto, en donde para bajos valores de  $r$  la propagación de la columna produce un depósito truncado, mientras que para altos valores de  $r$  la columna cae produciendo un depósito cónico.

Dejando de lado la razón de aspecto, existen otros factores que estos autores destacan como relevantes en estos estudios. Dentro de los factores a considerar, Lajeunesse (2005) indica que se otro de los parámetros que se debe tener en cuenta el efecto de las paredes laterales.

No solo existen estudios experimentales, los estudios numéricos también fueron parte del proceso para comprender de mejor manera este fenómeno. Mangeney-Castelnau et. al. (2005) presenta un estudio numérico utilizando las ecuaciones de Saint Venant para modelar la propagación de material granular. En este trabajo presentan un modelo que genera buenas relaciones con los estudios de laboratorio realizados anteriormente, para razones de aspecto menores a 1 ( $r < 1$ ). Algunos fenómenos que se esperan de la propagación de material granular no fueron reflejados en este modelo, sugiriendo con esto que se debe mejorar el modelo agregándole un comportamiento reológico mas realista.

Continuando con la dinámica de la propagación de material granular, en Roche et. al. (2008) se presenta un estudio del comportamiento del material granular inicialmente fluidizado. En este, destaca la presencia de tres etapas dentro de la propagación del flujo. Una aceleración del flujo a medida que la columna colapsa, seguida de una transición en la cual se observa una fase con velocidad constante, para luego tener una tercera fase en la cual el flujo desacelera para finalmente frenar completamente su avance. Este estudio es similar a los anteriores, en términos del montaje con el reservorio, la compuerta y el canal rectangular, pero difiere en la condición inicial del lecho, pues al fluidizar el material se está disminuyendo la interacción partícula – partícula, permitiendo que el flujo se propague a una mayor distancia.

En los años posteriores, realiza una serie de estudios para analizar distintas componentes que forman parte de la propagación. La fluidización del material granular toma relevancia en sus investigaciones, encontrando que incluso sin fluidizar la columna de material granular, se puede producir una auto fluidización parcial del lecho.

El 2009 se realizo un estudio para determinar la relevancia del fluido ambiente en la dinámica de flujos granular gravitacionales (Meruane et. al 2009), en el cual realizando tanto ensayos de laboratorio como modelos numéricos, se obtiene como conclusión que para obtener representaciones realistas de la dinámica de flujos gravitacionales de material granular, el fluido ambiente debe ser considerado. Para esto se realizaron una serie de experimentos en los cuales se estudio la velocidad del frente para describir el flujo granular, lo que se debe a su mayor sensibilidad a los efectos del fluido ambiente. De estos estudios se tiene que en aire, el movimiento es principalmente producido por el gradiente de presión del sólido, mientras la fricción Coulómbica y en menor manera la fuerza de arrastre se oponen al movimiento. En contraste a este caso, cuando el fluido ambiente es agua el flujo se mueve principalmente producto de la advección y en menor medida por el gradiente de presión del fluido, mientras que la fuerza de arrastre se opone al movimiento. En ambos casos, el movimiento termina en un estado estático debido a la fricción Coulómbica.

Finalmente, y analizando un poco lo realizado posterior al 2010, se ha estudiado mucho el efecto que tiene la fracción volumétrica de la columna de material granular. Esto va relacionado con fenómenos como presiones internas negativas debido a la fluidización de las partículas en el desarrollo del colapso. A modo de ejemplo en Roche et al., (2010) se estudia la dinámica de los flujos piroclásticos en base a la medición de la presión de poro del material.

Dentro de las principales conclusiones que se pueden obtener de los trabajos realizados, se debe destacar que existe una gran cantidad de estudios asociados a material granular, los cuales generalmente se limitan a fluidos ambientes newtonianos.

La gran importancia que toma la razón de aspecto es uno de los valores más relevantes a rescatar de estos estudios, así como la importancia de considerar el fluido ambiente para obtener representaciones más realistas de la dinámica del flujo gravitacional de material granular.

## Capítulo 3

# Diseño Experimental y Metodología

### 3.1 Montaje Experimental

El montaje experimental consiste en un estanque de sección rectangular separado en dos zonas por una compuerta (Figura 3.1), en donde la primera corresponde a la zona que contiene el material granular a ensayar y la segunda corresponde al canal libre por donde fluirá el material una vez liberada la compuerta. La primera parte tiene un largo de 10 cm, distancia donde se emplaza la compuerta, mientras que la segunda zona posee un largo de 140 cm. La altura y el ancho de ambas zonas son de dimensiones de 30 y 20 cm respectivamente. Cada una de las paredes de este montaje es de acrílico, junto con la compuerta y la superficie basal. En la esquina superior del montaje, entre la zona que contiene al material granular y la zona inmediata luego de la compuerta se encuentran dos orificios, los cuales permiten nivelar la altura del fluido ambiente al estar conectados por unas mangueras. Finalmente, el montaje cuenta con un último orificio al extremo opuesto de la zona de material granular, en donde se tiene una válvula la cual nos permite vaciar el montaje una vez realizado.



Figura 3.1: Vista lateral montaje experimental iluminado por foco halógeno.

Se coloca un foco halógeno en la parte trasera del montaje, el cual sirve como herramienta de iluminación con el objetivo de mejorar las condiciones para la captura en video del experimento (ver figura 3.1).

### 3.2 Materiales Utilizados

#### 3.2.1 Materiales Granulares

Para la ejecución de estos ensayos experimentales se cuenta con tres tipos de materiales granulares (ver figura 3.2) correspondientes a perdigones esféricos de diámetro 4.5 mm (hierro,

densidad de partícula =  $7 \text{ gr/cm}^3$ ), arenas con un diámetro medio de  $1.22 \text{ mm}$  y densidad de  $2.6 \text{ gr/cm}^3$  y esferas de vidrio de  $3 \text{ mm}$  de diámetro con una densidad de  $2.5 \text{ gr/cm}^3$ .



Figura 3.2 a) Esferas de acero, diámetro  $4.5 \text{ mm}$



b) Arena de diámetro medio  $1.2 \text{ mm}$

### 3.2.2 Cámara de Video

Para las capturas en video del experimento se utiliza una cámara digital Nikon D3200 abarcando el largo del canal de interés (aproximadamente los primeros  $70 \text{ cm}$ , valor escogido en base al desplazamiento máximo registrado en ensayos preliminares). Esta cámara digital cuenta con una resolución de  $1280$  pixeles por  $720$  pixeles, por lo que cada pixel representa cerca de  $0.54 \text{ mm}$ . La velocidad de captura es de  $30$  cuadros por segundo. La cámara se posiciona ortogonal a la cara de interés del canal. Para el montaje se utiliza un foco halógeno ubicado en la parte posterior del montaje con el fin de obtener imágenes de alto contraste, que permitan identificar las partículas y evitar las sombras y brillo que ensucian la imagen.

## 3.3 Metodología

### 3.3.1 Carga del Material

Se comienza el montaje del experimento llenando el estanque con un fluido ambiente (agua y aire en el caso de fluidos newtonianos, y con una solución de agua y carboximetil celulosa (CMC) para generar el ambiente pseudoplástico). Para el llenado del material se debe tener primero el fluido ambiente a utilizar dentro del recipiente. A una altura de  $27 \text{ cm}$  se encuentran unas mangueras que permiten regular el nivel a cada lado de la compuerta, por lo que al poner el material granular se debe hacer lento para que el sistema se equilibre y no rebalse en la zona del material granular. Para hacer este proceso menos complicado, se llena el estanque dejando en la zona del material granular una botella (en la práctica, cualquier objeto que no ensucie la mezcla y que tenga dimensiones adecuadas es útil para este proceso) para que al retirarla nos deje un volumen a favor de tal manera que, al agregar el material granular, el fluido contenido antes de la compuerta no rebalse.

Una vez el estanque es llenado se procede a grabar desde el instante en que se levanta la compuerta hasta que la mezcla de material y fluido se detiene completamente.

### **3.3.2 Trabajo Posterior al Experimento**

Una vez que el flujo de material granular se detiene, se mide la distancia alcanzada y la altura final de la columna, para luego vaciar el estanque utilizando una válvula que permite evacuar el fluido. Una vez retirada la mayoría del fluido ambiente, se procede a recuperar el material granular de forma manual, el cual debe ser lavado y secado en hornos del laboratorio para poder reutilizarse.

### **3.3.3 Procesamiento de Imágenes**

#### *3.3.3.1 Captura de Imágenes*

La experiencia se registra en videos con vista lateral. El inicio del experimento está dado por la apertura de la compuerta, pero debido a que el experimento se realizó de forma unipersonal, la cámara se deja en grabación segundos antes de que el experimento se lleve a cabo, por lo que se deben cortar las secciones del video no asociadas al desarrollo del experimento.

#### *3.3.3.2 Análisis de Imágenes*

Las secuencias del colapso obtenidas son procesadas con Windows Movie Maker para cambiar los colores (aumento de contraste) y recortar el video acotándolo solo al periodo en el cual se desarrolla el fenómeno. Luego con el software Avidemux se corta el video continuo en una serie de imágenes, para posteriormente trabajar estas imágenes con Matlab, utilizando su extensión de procesador de imágenes. Debido a que se utiliza un sistema de grabación de video, la habitación donde se emplaza la instalación experimental debe ser aislada de la luz e iluminada de manera que permita visualizar el experimento de manera óptima.

El procesamiento de la imagen consiste en hacer un alto contraste en blanco y negro, para luego encontrar la posición donde se produce el cambio de colores. La diferencia de posiciones de esta interfaz nos entrega el avance del frente de material granular, el cual debe ser escalado debido a que esta información se obtiene en pixeles, por lo tanto, se debe ajustar para cada video el equivalente en metros para 1 pixel. Cabe destacar que para este trabajo se mide solo el desplazamiento horizontal, por lo que en base a lo dicho anteriormente y considerando que el flujo se mueve tanto en la vertical como en la horizontal para poder comparar los resultados se utiliza la medición del avance horizontal del material medida desde la base.

### **3.4 Parámetros Ensayados**

Una vez determinado el procedimiento sobre cómo se debe llevar a cabo el ensayo (ver punto 3.3), se definen el número de ensayos a realizar y las características de cada uno de ellos. Estos ensayos se dividen inicialmente por tipo de material granular utilizado (arena, acero o esferas de vidrio), tipo de fluido ambiente y número de alturas de columna a trabajar (5 configuraciones de

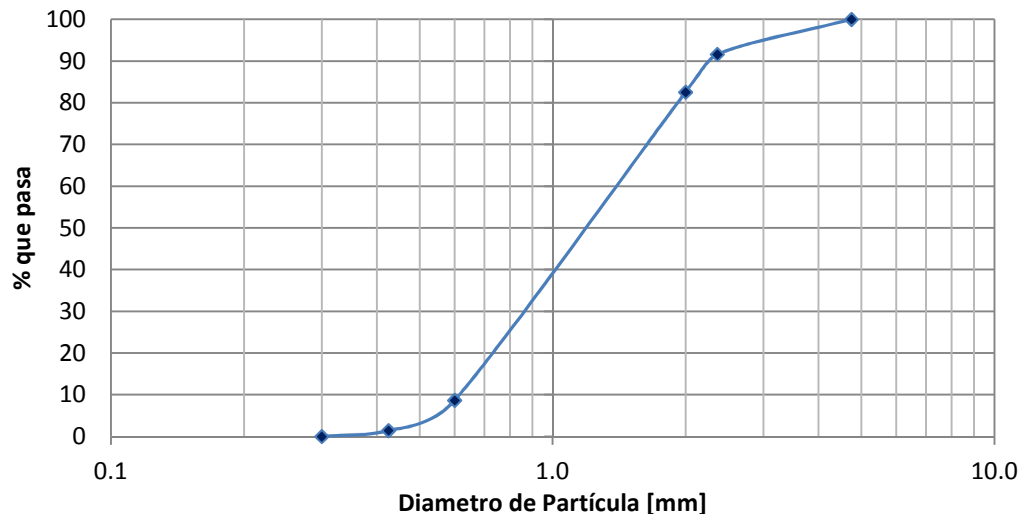
alturas, las cuales van desde los 25 cm a los 9 cm en espacios de 4 centímetros entre cada medición). Es así como se definen un total de 60 experimentos (ver Tabla 3.1).

**Tabla 3.1: Set de ensayos con largo y fondo constante.**

Material	Fluido Ambiente	Largo Columna	Fondo	Nº de Alturas Ensayadas
Acero	Agua	10 cm	Acrílico	5
	Aire	10 cm	Acrílico	5
	CMC1	10 cm	Acrílico	5
	Cmc2	10 cm	Acrílico	5
Arena	Agua	10 cm	Acrílico	5
	Aire	10 cm	Acrílico	5
	CMC1	10 cm	Acrílico	5
	Cmc2	10 cm	Acrílico	5
Vidrio	Agua	10 cm	Acrílico	5
	Aire	10 cm	Acrílico	5
	CMC1	10 cm	Acrílico	5
	Cmc2	10 cm	Acrílico	5

### 3.4.1 Granulometría

Para la realización de las experiencias se cuenta con un total de 10 kg de arena gruesa la cual fue inicialmente lavada y colada para evitar material fino que pueda generar un flujo secundario en el colapso. En cada experiencia se utiliza entre 1 y 3 kg del material, dependiendo de la altura ensayada. La granulometría se realizó antes de realizar las experiencias, pero posterior al lavado antes mencionado. Esta granulometría es realizada para una muestra representativa de 3 kg (Figura 3.3).



**Figura 3.3:** Granulometría de arena utilizada.

El material corresponde a un suelo de grano grueso ya que más del 50% queda retenido en la malla # 200 (0.074 mm), y se clasifica como una arena con pocos finos debido a que la fracción fina es menor al 5%. El coeficiente de curvatura ( $C_c$ ) es 2.08 por lo que el suelo es suelo tipo es una arena bien gradada y el coeficiente de uniformidad ( $C_u$ ) es 5.33, por lo que es una arena poco uniforme

### 3.4.2 Reologías de Fluidos Ambientes

Para la generación de los fluidos no newtonianos a trabajar, se utiliza una solución de carboximetilcelulosa (CMC) en agua, en donde se debe escoger la relación agua/CMC a utilizar. La carboximetilcelulosa es un hidrocoloide de gran utilidad en la industria de alimentos. Por su transparencia, viscosidad y tolerancia a medios ácidos se emplea en muchos productos.

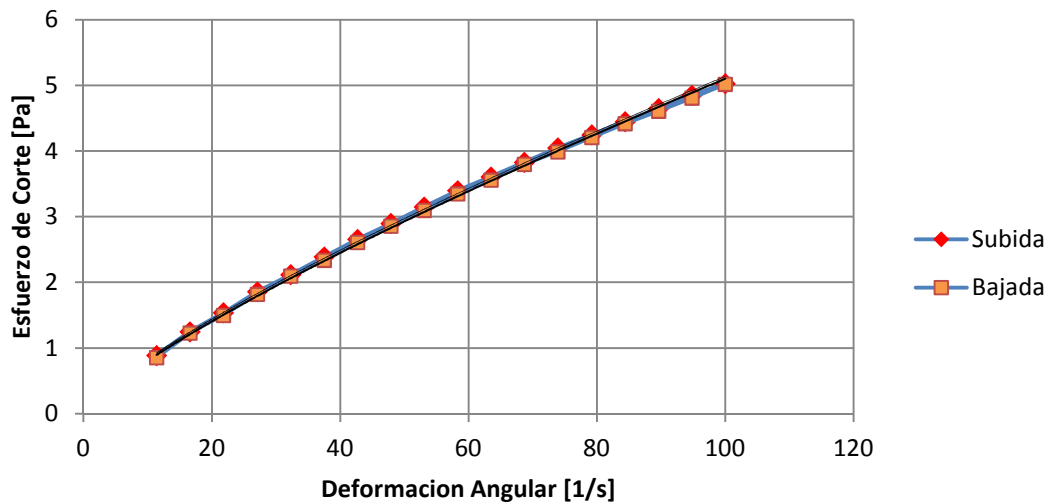
Para definir la concentración a utilizar de CMC se crean diferentes mezclas, las cuales son medidas mediante un reómetro Anton Paar modelo Rheolab QC (Figura 3.4).



Figura 3.4: Reómetro utilizado.

Una vez trabajadas con el reómetro se obtienen las reologías de las mezclas. Con esto se escogen dos concentraciones de carboximetilcelulosa a utilizar, lo que se conocerá en este trabajo como CMC1 y CMC2, correspondientes a mezclas de 0.4% y 0.5% en concentración peso/peso. En figuras 3.5 y 3.6 se pueden ver los resultados obtenidos con el reómetro para las mezclas CMC1 y CMC2.



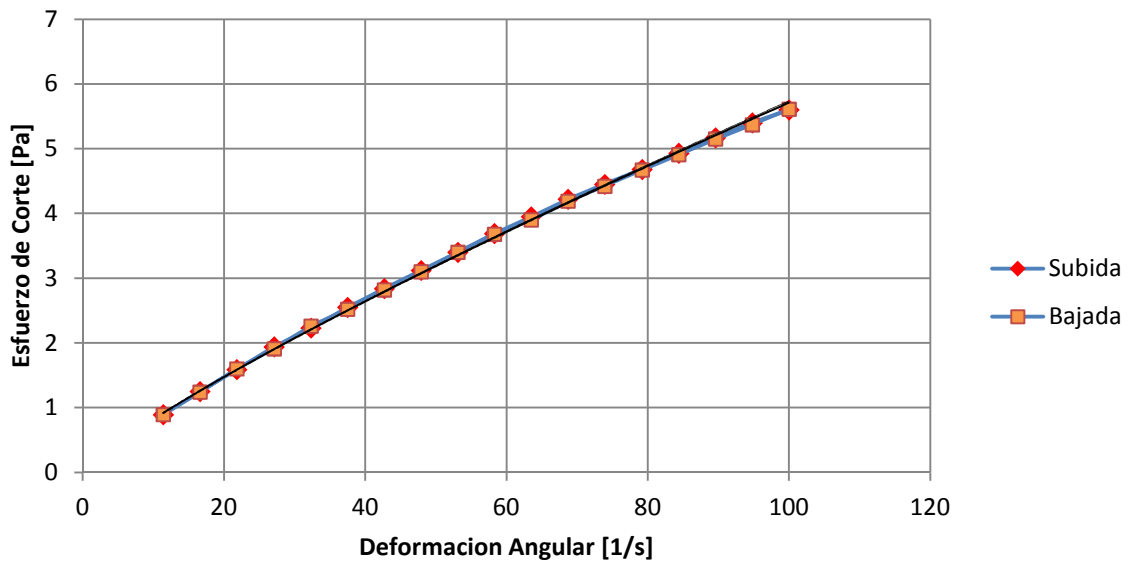


**Figura 3.5:** Reología de solución de CMC en agua a concentración 0.4 % peso/peso.

El reómetro entrega la relación entre el esfuerzo de corte y la deformación tanto de ida como de vuelta, por lo que los parámetros representativos de la solución ( $k$  y  $n$ ) corresponden al promedio de estos ciclos. Para obtener estos parámetros se busca analizar la tendencia que se genera entre el esfuerzo de corte y la deformación, la cual puede ser representada por una ley de potencia. En la tabla 3.2 se pueden ver los resultados obtenidos para el índice de consistencia ( $k$ ) y el índice de comportamiento de flujo ( $n$ ) de la solución conocida como CMC1.

**Tabla 3.2:** Coeficientes  $K$  y  $n$  de la reología de CMC1.

$K$	$n$ [-]	$K$ promedio	$n$ promedio
0.1351	0.79	0.131	0.796
0.1276	0.801		



**Figura 3.6:** Reología de solución de CMC en agua a concentración 0.5 % peso/peso.

Análogamente, en la tabla 3.3 se pueden ver apreciar los valores obtenidos para el índice de consistencia (k) y el índice de comportamiento de flujo (n) de la solución CMC2.

**Tabla 3.3:** coeficientes K y n de la reología de CMC2.

K	n [-]	K prom	n prom
0.1182	0.8431	0.118	0.843
0.1182	0.842		

## Capítulo 4

# Presentación de Resultados Experimentales

En laboratorio se realizaron una serie de ensayos preliminares con el fin de comprender de mejor manera el fenómeno de propagación de material granular. Dentro de los trabajos realizados de manera preliminar, se realizaron estudios con distintos niveles de compactación y altura.

Estos trabajos se utilizaron para verificar los resultados expuestos por diversos autores, para con ello ir acotando el estudio y seleccionando los parámetros a variar y los que se quedarían fijos. Dentro de los parámetros que se fijaron en base a esto, se puede nombrar, por ejemplo, al índice de empaquetamiento, el cual corresponde a la diferencia entre el volumen utilizado por el material en base a la altura de la columna (vale decir, el volumen de la columna como base por altura) y el volumen real que este utilizaba, medido como el cociente entre la masa y de la densidad del material.

A continuación, se presentan los registros obtenidos de la experimentación del colapso de material granular. Se exponen los datos tanto para medios newtonianos como para condiciones de ambiente pseudoplástico, para con esto poder realizar un análisis comparativo entre las distintas condiciones para definir la relevancia del fluido ambiente en este fenómeno.

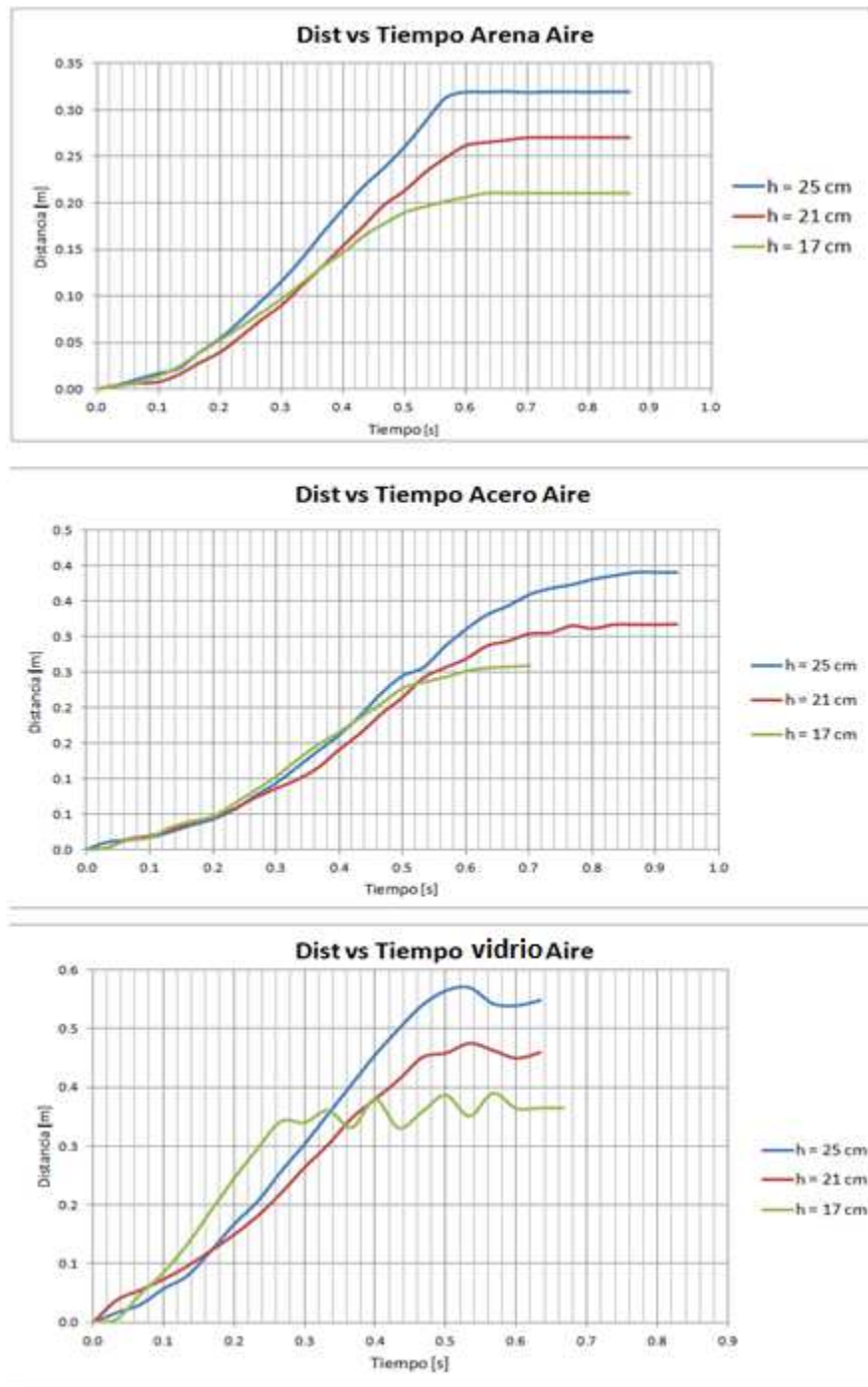
### 4.1 Desarrollo del Colapso

Las figuras 4.1 y 4.2 presentadas a continuación, representan el avance del frente de material granular una vez se comienza con el experimento (apertura de la compuerta). La Figura 4.1 muestra el avance de las distintas partículas en aire a medida que se varía la altura de la columna, la Figura 4.2, nos presenta el desplazamiento de los distintos materiales, pero esta vez sumergidos en agua. Finalmente, las figuras 4.3 y 4.4 nos presentan lo antes mencionado, pero esta vez utilizando los medios viscosos CMC1 y CMC2 respectivamente.

Para esta serie de experimentos la distancia recorrida está representada en metros y demoran entre 1 y 3 segundos en los casos newtonianos, mientras que para los medios pseudoplásticos el colapso puede tomar hasta 10 segundos en completarse.

#### 4.1.1 Colapso en Aire

La siguiente imagen representa el desarrollo del colapso obtenido para 3 alturas distintas cambiando el tipo de partículas utilizadas en cada ensayo, comenzando con una altura máxima de 25 cm y separadas en una altura constante de 4 cm entre cada altura trabajada.



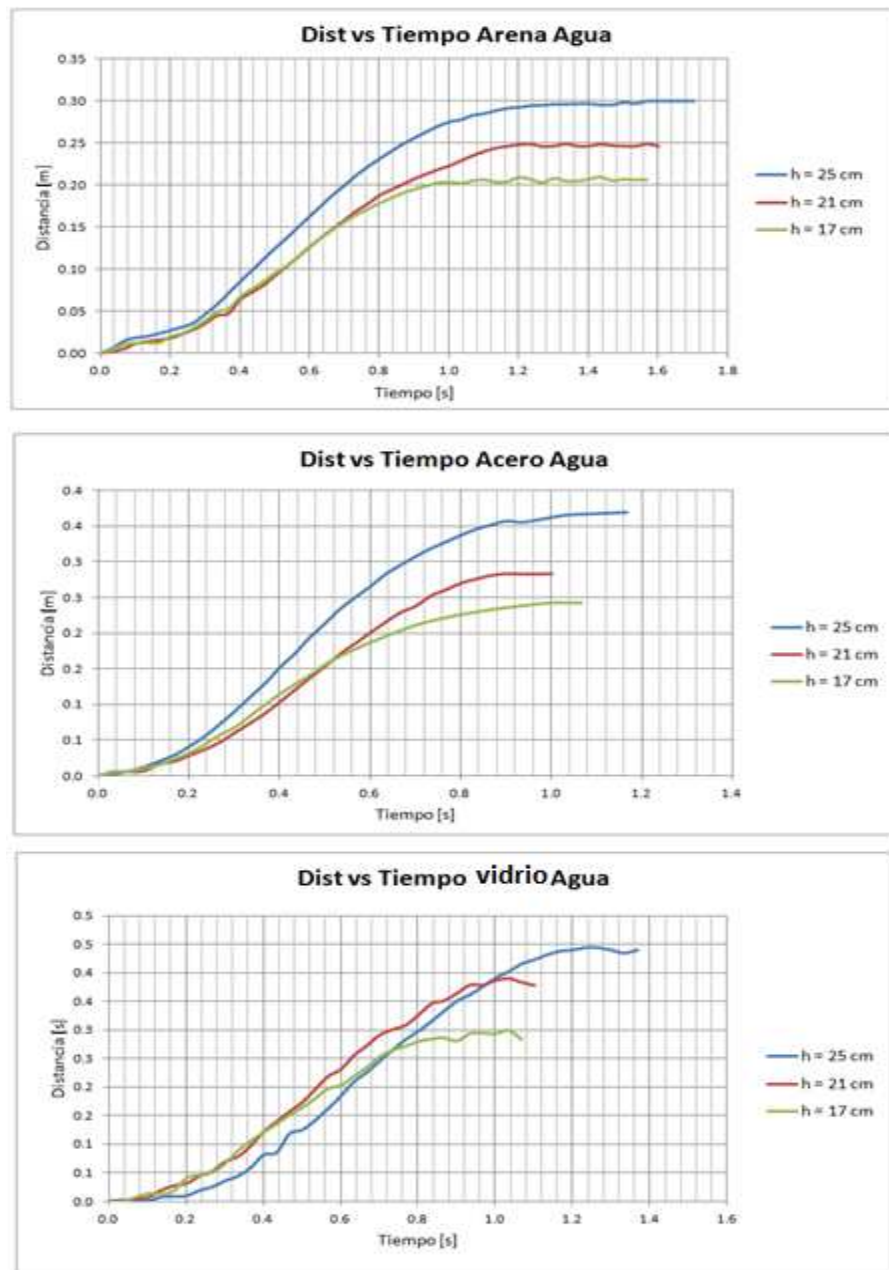
**Figura 4.1:** Distancia versus tiempo para distintos materiales granulares en aire.

En estas figuras es posible apreciar que los ensayos con mayores alturas presentan mayores desplazamientos, o, dicho de otro modo, alcanzan mayores distancias. Se puede ver que a medida que se disminuye la altura de la columna para las esferas de vidrio, los resultados obtenidos adquieren cada vez mayor ruido. Esto se debe a que los ensayos se realizaron todos con un mismo enfoque, para que de esta manera cada pixel medido tuviera asociada una misma distancia. Al tener la misma distancia focal para diferentes alturas, se tienen peores resoluciones

para alturas menores. Si a esto se le añade que las esferas de vidrio son semi transparentes, se obtienen estas medidas en donde pareciera que las partículas retroceden. Esta mala decisión es el motivo por el cual de tener 5 ensayos realizados por configuración (vale decir, alturas desde los 9 cm a los 25 cm) solo se presenten gráficamente las 3 alturas de columna mayores.

#### 4.1.2 Colapso en Agua

La siguiente imagen representa el desarrollo del colapso obtenido para 3 alturas distintas cambiando el tipo de partículas utilizadas en cada ensayo, comenzando con una altura máxima de 25 cm y separadas en una altura constante de 4 cm entre cada altura trabajada.



**Figura 4.2:** Distancia versus tiempo para distintos materiales granulares en agua.

En estos ensayos se puede apreciar el efecto que tiene el cambio en la viscosidad del fluido en el desarrollo del colapso, en donde si comparamos con el caso del aire pasamos de tener ensayos con duraciones entre los 0.5 y los 0.9 segundos a ensayos con duraciones que superan el segundo independiente del tipo de material que se esté analizando.

### 4.1.3 Colapso en CMC1

La siguiente imagen representa el desarrollo del colapso obtenido para 3 alturas distintas cambiando el tipo de partículas utilizadas en cada ensayo, comenzando con una altura máxima de 25 cm y separadas en una altura constante de 4 cm entre cada altura trabajada.

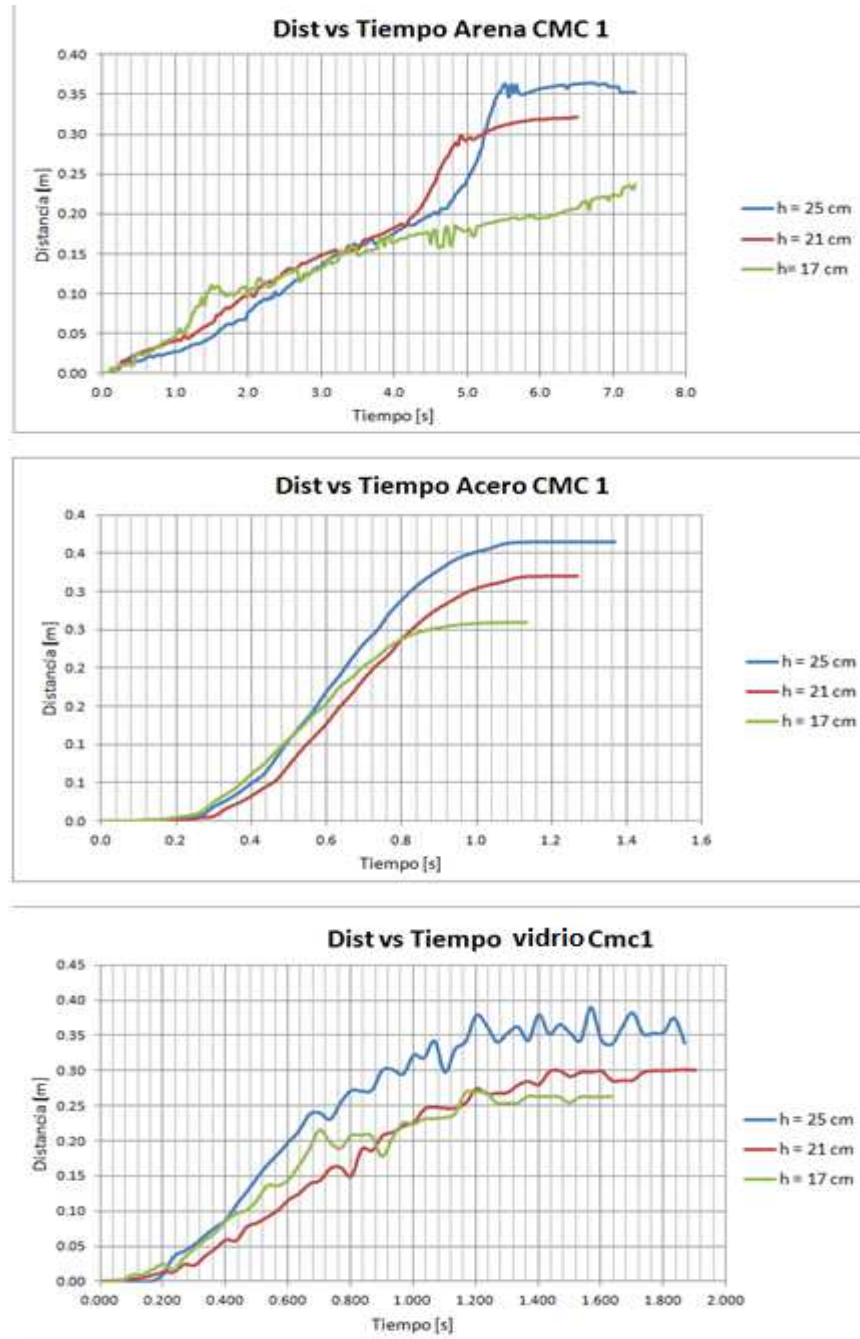


Figura 4.3: Distancia versus tiempo para distintos materiales granulares en cmc1.

#### 4.1.4 Colapso en CMC2

La siguiente imagen representa el desarrollo del colapso obtenido para 3 alturas distintas cambiando el tipo de partículas utilizadas en cada ensayo, comenzando con una altura máxima de 25 cm y separadas en una altura constante de 4 cm entre cada altura trabajada.

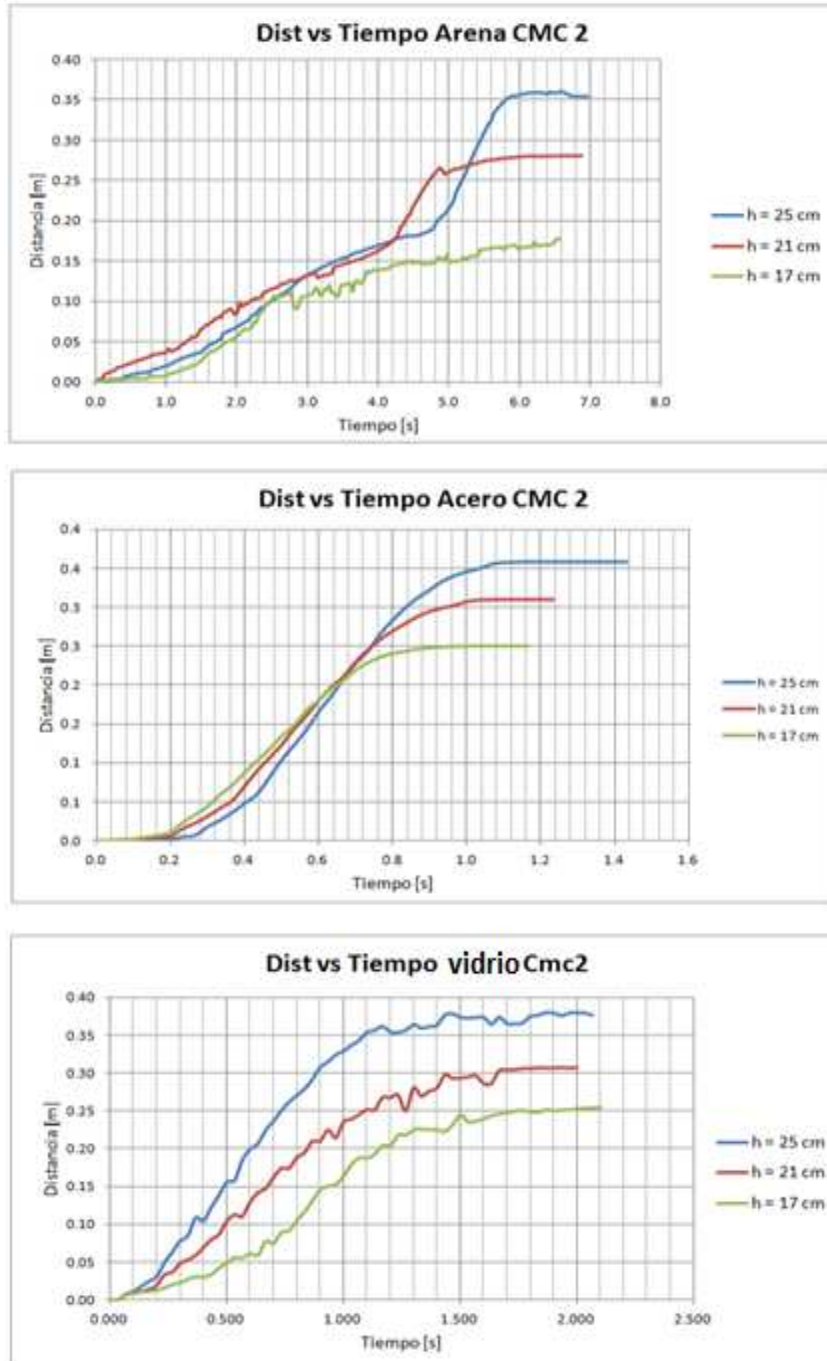


Figura 4.4: Distancia versus tiempo para distintos materiales granulares en cmc2.

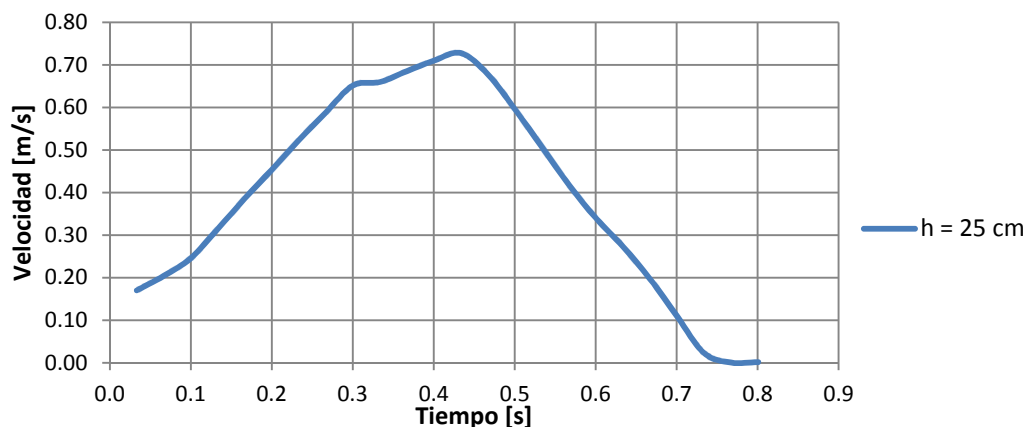
Tanto para el caso de los ensayos en cmc1 como en cmc2, una diferencia importante es apreciable al analizar el desarrollo del ensayo en distintos medios granulares. En particular, la respuesta que se obtiene en el experimento por parte de la arena difiere bastante si lo comparamos con los otros materiales ensayados. Otra diferencia importante que llama la atención al revisar estos ensayos es que, a diferencia de las partículas de acero o vidrio, los experimentos realizados en arena varían mucho más al cambiar desde un fluido newtoniano a un fluido pseudoplástico.

## 4.2 Velocidad del Frente

Uno de los parámetros más relevantes en el experimento corresponde a la velocidad del frente. Se sabe que el desarrollo de la velocidad en este fenómeno viene dado de un rápido aumento de la velocidad desde la condición estática, para luego alcanzar una velocidad constante y finalmente tener un rápido descenso en la velocidad hasta el reposo (Roche et al. 2008). Para este análisis, se pueden obtener dos velocidades relevantes. La primera corresponde a la velocidad máxima, la cual corresponde al punto de inflexión en la curva de distancia versus tiempo, mientras que la otra corresponde a la pendiente en el tramo de velocidad constante. En general, estos valores debieran ser iguales, pero dado que no siempre se tienen tramos con velocidad constante los resultados se trabajan en base a la velocidad en el punto de inflexión de la curva (la cual, debido al ruido presente en algunos experimentos realizados se calcula en base a una media móvil de 5 puntos).

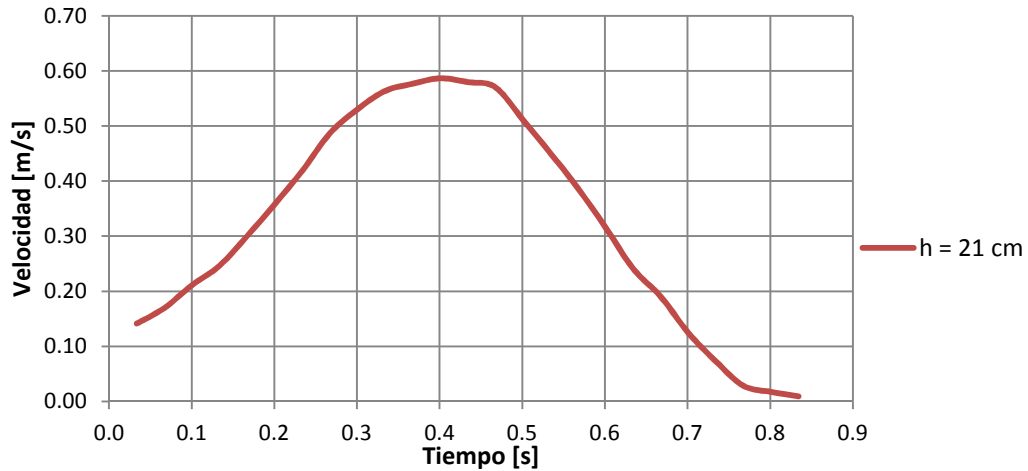
A continuación, se presentan los resultados de velocidad versus tiempo a modo de ejemplificar las distintas condiciones que estas presentan en este trabajo, tanto el caso expresado en Roche et al. (2008) como otras condiciones que se dieron en estos experimentos, y también los casos con pendiente constante, para comparar los valores obtenidos en ambos casos.

- Caso 1, desarrollo del colapso acorde con la bibliografía.

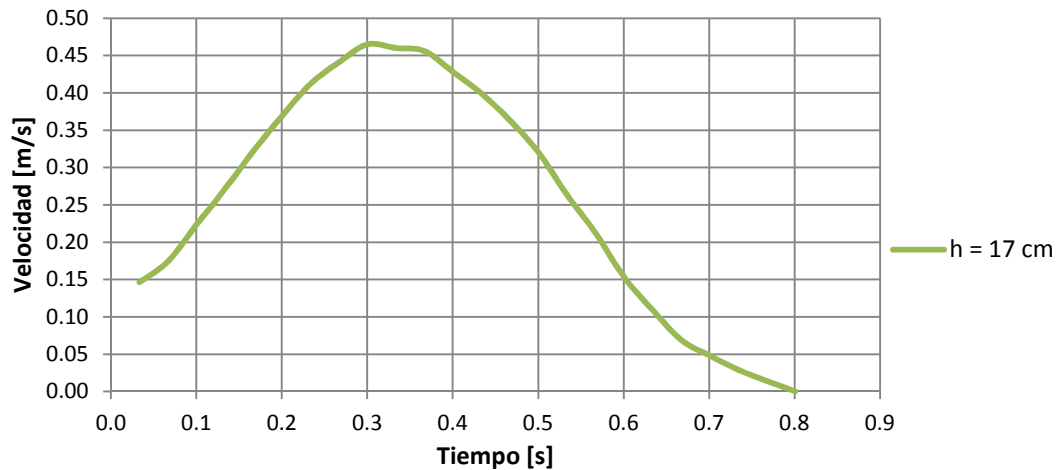


**Figura 4.5:** Velocidad versus tiempo para el colapso de columna de arena de 25 cm de altura en aire.



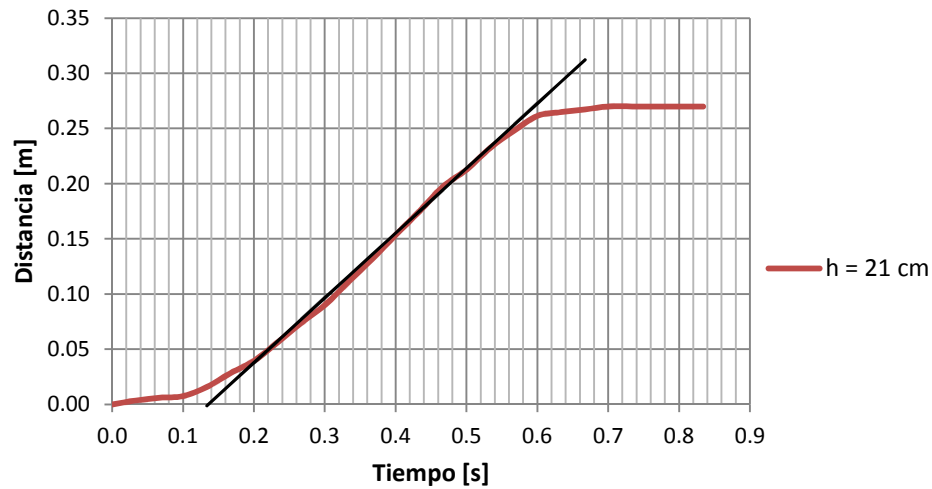


**Figura 4.6:** Velocidad versus tiempo para el colapso de columna de arena de 21 cm de altura en aire.



**Figura 4.7:** Velocidad versus tiempo para el colapso de columna de arena de 17 cm de altura en aire.

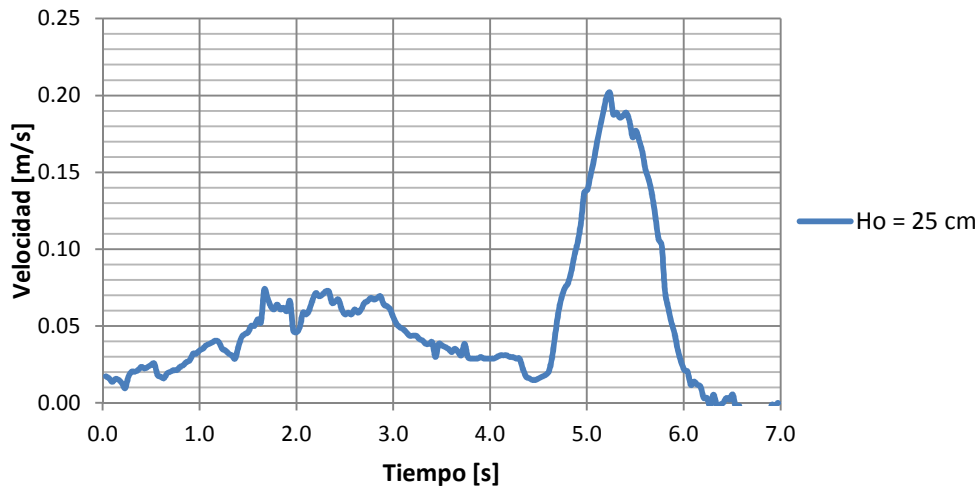
En esta serie de gráficos, que corresponden a los resultados obtenidos para los experimentos realizados con arena, podemos apreciar como en la zona cercana a la velocidad máxima se tiene un tramo donde la velocidad es relativamente constante. A modo de ejemplo, si se considera el gráfico que expresa lo obtenido para una columna de arena de 21 cm de altura, se puede apreciar que entre los 0.3 y 0.5 segundos existe un tramo de velocidad relativamente constante (Figura 4.6).



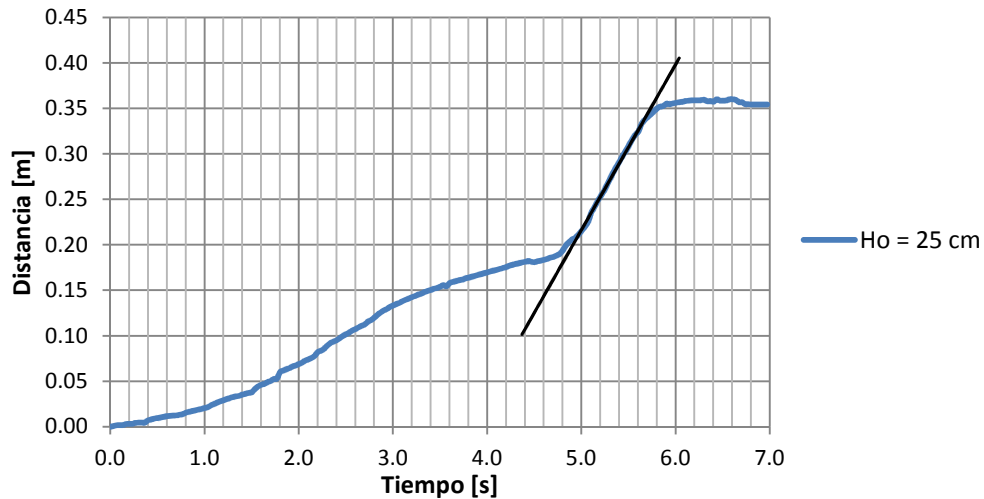
**Figura 4.8:** Distancia versus tiempo colapso de arena en aire.

Al igual que lo visto en el gráfico de velocidad versus tiempo (Figura 4.6), se puede ver que para el periodo comprendido entre los 0.3 y 0.5 segundos se tiene un desplazamiento en el tiempo lineal, es decir, velocidad constante (Figura 4.8).

- Caso 2, experimento de larga duración debido al material y al fluido ambiente utilizado (arenas en ambientes pseudoplásticos), condición de doble flujo



**Figura 4.9:** Velocidad versus tiempo columna de arena en cmc2.



**Figura 4.10:** Distancia versus tiempo columna de arena en cmc2.

En el marco de este trabajo, este caso se produce exclusivamente para las arenas ensayadas en fluidos pseudoplásticos. Se puede apreciar que existe un avance inicial, correspondiente al material en contacto con la base de acrílico, el cual se desarrolla de forma paulatina hasta que el flujo secundario se une al flujo principal generando un aumento importante en la velocidad del frente. El flujo secundario que se menciona en estos casos, corresponde al avance que presenta la superficie libre de la columna (zona superior de la columna inicialmente en contacto con la compuerta), el cual debido al aumento en la viscosidad para los medios pseudoplásticos se acopla al flujo principal (el flujo basal) en un periodo de tiempo desfasado con respecto a la velocidad basal, lo que produce esta especie de “empujón” del flujo (Figura 4.10 entre los 4.8 y los 5.8 segundos).

Finalmente, los resultados pueden ser resumidos en la siguiente tabla:

**Tabla 4.1:** Velocidades representativas obtenidas por distintos métodos.

Experimento	Velocidad de inflexión ( $V_1$ )	Velocidad de pendiente ( $V_2$ )	Diferencia Porcentual
Aire - Acero 17	0.600	0.615	3%
Aire - Acero 21	0.665	0.691	4%
Aire - Acero 25	0.725	0.744	3%
Agua - Acero 17	0.430	0.443	3%
Agua - Acero 21	0.490	0.481	2%
Agua - Acero 25	0.585	0.575	2%
CMC1 - Acero 17	0.465	0.477	3%
CMC1 - Acero 21	0.550	0.586	7%
CMC1 - Acero 25	0.630	0.633	0%
CMC2 - Acero 17	0.460	0.443	4%
CMC2 - Acero 21	0.540	0.518	4%
CMC2 - Acero 25	0.610	0.619	1%
Aire - Arena 17	0.450	0.470	4%
Aire - Arena 21	0.600	0.587	2%
Aire - Arena 25	0.725	0.738	2%

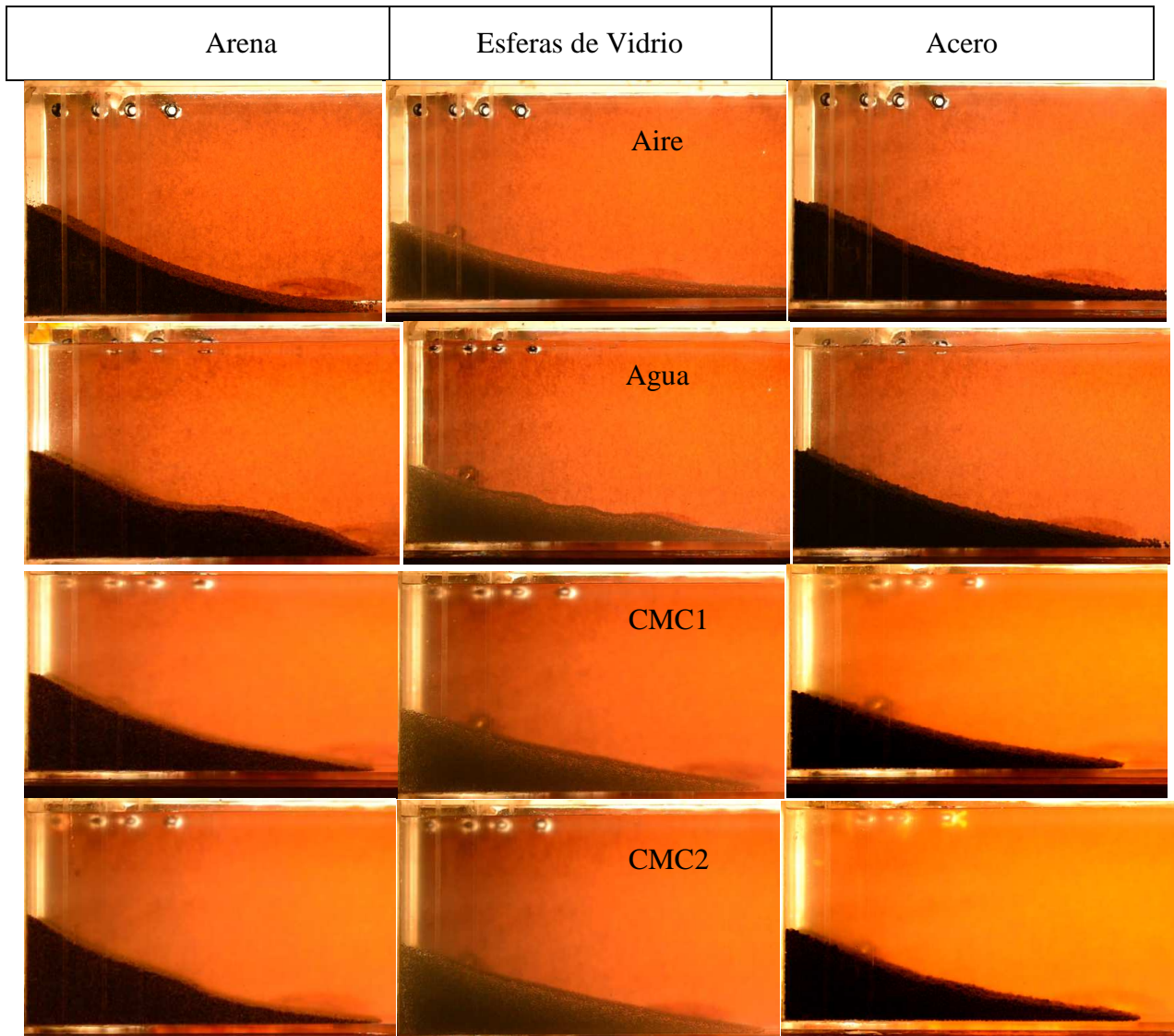
Agua - Arena 17	0.290	0.302	4%
Agua - Arena 21	0.325	0.319	2%
Agua - Arena 25	0.400	0.392	2%
CMC1 - Arena 17	0.150	0.021	86%
CMC1 - Arena 21	0.180	0.174	3%
CMC1 - Arena 25	0.280	0.265	5%
CMC2 - Arena 17	0.125	0.017	87%
CMC2 - Arena 21	0.155	0.137	12%
CMC2 - Arena 25	0.200	0.182	9%
Aire - Vidrio 17	1.150	1.197	4%
Aire - Vidrio 21	1.200	1.157	4%
Aire - Vidrio 25	1.500	1.518	1%
Agua - Vidrio 17	0.450	0.440	2%
Agua - Vidrio 21	0.550	0.568	3%
Agua - Vidrio 25	0.600	0.603	1%
CMC1 - Vidrio 17	0.340	0.326	4%
CMC1 - Vidrio 21	0.310	0.289	7%
CMC1 - Vidrio 25	0.450	0.490	9%
CMC2 - Vidrio 17	0.340	0.347	2%
CMC2 - Vidrio 21	0.275	0.292	6%
CMC2 - Vidrio 25	0.400	0.425	6%

En la Tabla 4.1 podemos apreciar las diferencias al considerar la velocidad de inflexión como el punto máximo en un gráfico de velocidad versus tiempo y el considerarlas en base a la pendiente que se crea en la curva de distancia versus tiempo. Se puede apreciar que para el caso de las partículas de acero y de las esferas de vidrio, las diferencias entre estos métodos se mueven en el orden del 5 %. Dicho esto, el valor a utilizar corresponde a la velocidad de inflexión. Se sabe que la velocidad de inflexión es un máximo para la velocidad del experimento, por lo tanto se utiliza la velocidad de pendiente simplemente para corroborar la magnitud del valor obtenido para la velocidad de inflexión.

Un caso distinto se produce para las arenas en los fluidos no newtonianos. Si revisamos los resultados obtenidos para las arenas en fluidos pseudoplásticos, veremos que en ellos existe mucho ruido en la lectura (Figura 4.3 y 4.4), lo que produce que el cálculo de la velocidad de inflexión en base a una media móvil sea menos preciso que el cálculo en base a la pendiente. Esto no quiere decir que el valor obtenido con la pendiente sea siempre el representativo del ensayo, considerando que el cálculo de la pendiente tiene mucha relación con una apreciación visual (considerando que los ensayos no newtonianos para partículas de arena generan mucho ruido dentro de sus resultados, el producir una recta para la obtención de la pendiente queda muy sujeta a la elección de los dos puntos considerados para armar dicha recta, y por ende, se puede tener cambios importantes en los resultados de dicha pendiente en base a la apreciación visual que se tenga de los resultados), puede darse el caso donde la velocidad en base a la pendiente entregue resultados bastante errados, por lo que el valor a respetar depende de la calidad de la medición de cada video y es el motivo que lleva a calcular la velocidad por dos medios distintos.

### 4.3 Formas Finales del Ensayo

Una vez concluido los ensayos se puede apreciar una forma final del material la cual es característica para cada caso, por lo que se desea analizar de qué dependen las formas finales del ensayo de colapso. A continuación, se presentan en la Figura 4.11 con este propósito, las cuales se agrupan en base al tipo de material granular y de fluido ambiente en el cual se encuentran respectivamente (de izquierda a derecha cambia el material y de arriba hacia abajo cambia el medio).



**Figura 4.11:** Formas finales de ensayo para distintos materiales y fluidos ambientes

Se puede apreciar que la forma final que adoptan las partículas tiene directa relación con el tipo de fluido ambiente al cual son sometidas. A modo de ejemplo, es posible apreciar que en las partículas colapsadas en aire suelen presentar una curva en su forma final, mientras que en los fluidos pseudoplásticos la condición de reposo se asemeja a una recta con un cambio de pendiente intermedio.

## Capítulo 5

# Análisis de Resultados

### 5.1 Parámetros Adimensionales

Para poder analizar de mejor manera el fenómeno en estudio se necesita transformar las variables involucradas en números adimensionales que nos permitan realizar comparaciones. En particular, hay dos tipos de resultados adimensionales que queremos analizar: El primer grupo se obtiene de adimensionalizar los gráficos de distancia versus tiempo mientras que el segundo grupo de números adimensionales a analizar corresponden a aquellos adimensionales calculados en base a sus propiedades y que analizan distintos tipos de fuerzas, adimensionales que utilizan la velocidad obtenida dentro de sus cálculos como lo son el número de Reynolds, el número de Froude y el número de Arquímedes.

Para adimensionalizar los gráficos de distancia versus tiempo se deben definir las formas adimensionales de distancia y de tiempo respectivamente. Para adimensionalizar el parámetro del tiempo normalizamos los valores obtenidos en base al parámetro que llamaremos tiempo característico de colapso el cual se define como la raíz de la altura de columna ( $h$ ) dividido por la gravedad ( $t_o = (h/g')^{1/2}$ ), la cual para este estudio esta modificada en base a la diferencia de densidades ( $g' = g \frac{\rho_f - \rho_p}{\rho_p}$ ), donde  $\rho_f$  corresponde a la densidad del fluido ambiente y  $\rho_p$  la densidad del material granular. Para adimensionalizar la distancia se trabaja con la distancia efectiva recorrida ( $x_f - x_o$ ) normalizada tanto por la distancia basal de la columna de material granular como por la altura de la columna, por lo que se pueden obtener dos adimensionalizaciones distintas para la distancia recorrida:

- Distancia adimensionalizada por la base de la columna:

$$X_{adim} = \frac{x_f - x_o}{x_o} \quad (5.1)$$

- Distancia adimensionalizada por la altura inicial de la columna:

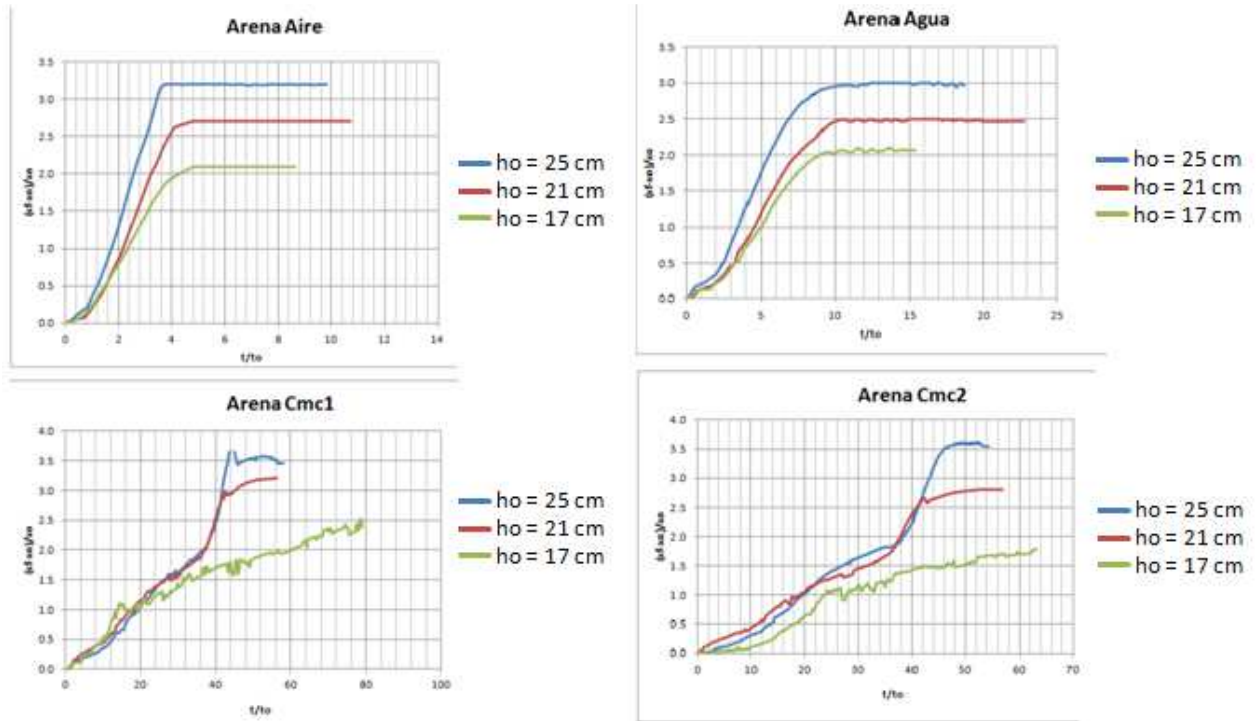
$$X_{adim}' = \frac{x_f - x_o}{h_o} \quad (5.2)$$

En donde ( $x_f - x_o$ ) corresponde a la distancia recorrida por el frente de material granular medido desde la compuerta (avance efectivo).

### 5.1.1 Análisis del Desplazamiento

A continuación, se presentan los gráficos adimensionales de desplazamiento y tiempo para distintos materiales granulares.

- Análisis para Arenas (Figuras 5.1 y 5.2):

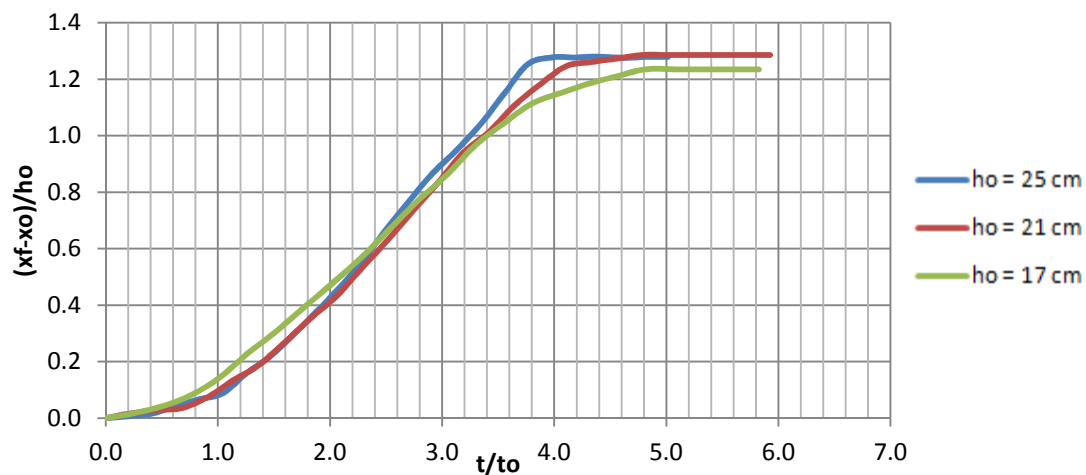


**Figura 5.1:** Desplazamientos adimensionales para arenas en función del tiempo adimensionalizado.

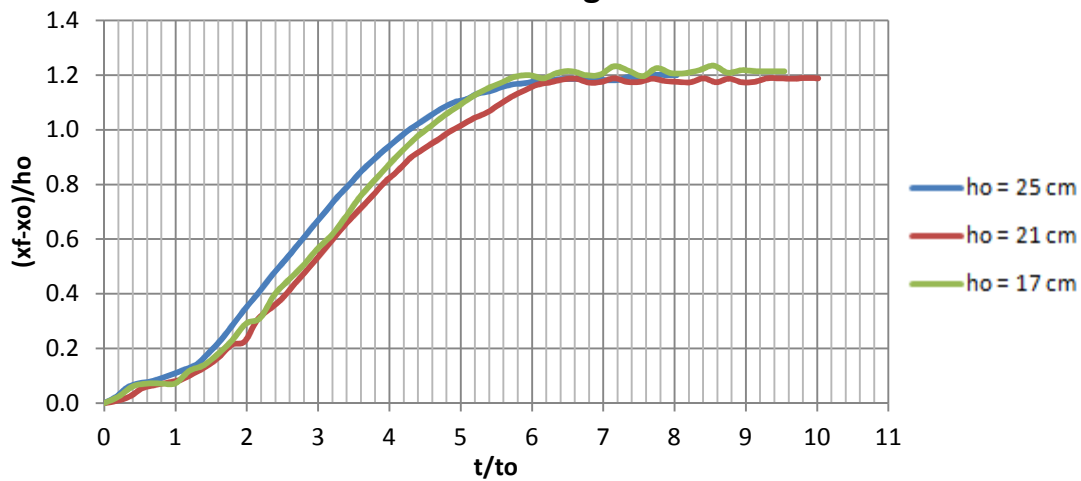
Al analizar estos resultados se puede percatar que, al igual que en los gráficos dimensionales, los mayores tiempos se obtienen en los casos de los experimentos realizados en fluidos pseudoplásticos y la magnitud de sus diferencias sigue siendo la misma. En el caso de los gráficos dimensionales (Figura 4.1 a 4.4), los ensayos en aire presentaban una duración que se mueve alrededor de los 0.5 segundos, mientras que en agua se tenía el doble (alrededor de 1 segundo). En los fluidos pseudoplásticos las duraciones de los ensayos podían llegar a ser más de 10 veces el tiempo que demora en aire (vale decir, que la duración de los ensayos con fluidos ambientes pseudoplásticos para las arenas supera los 5 segundos). Estas diferencias se mantienen en los casos adimensionales.

Debido a que este análisis no genera ninguna diferencia en particular con respecto a lo observado en los gráficos dimensionales, se analiza este mismo ensayo, pero esta vez adimensionalizando la distancia recorrida por la altura inicial de la columna (Figura 5.2).

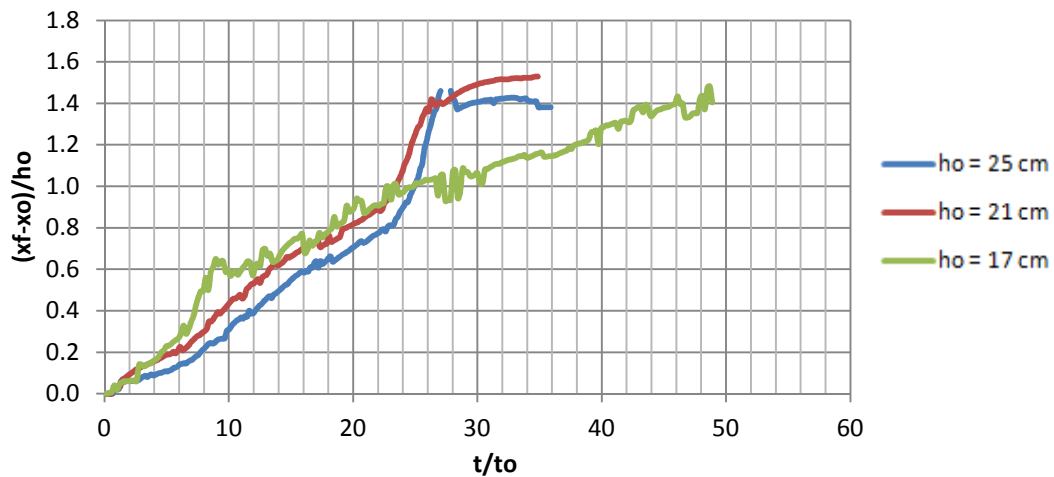
### Arena Aire



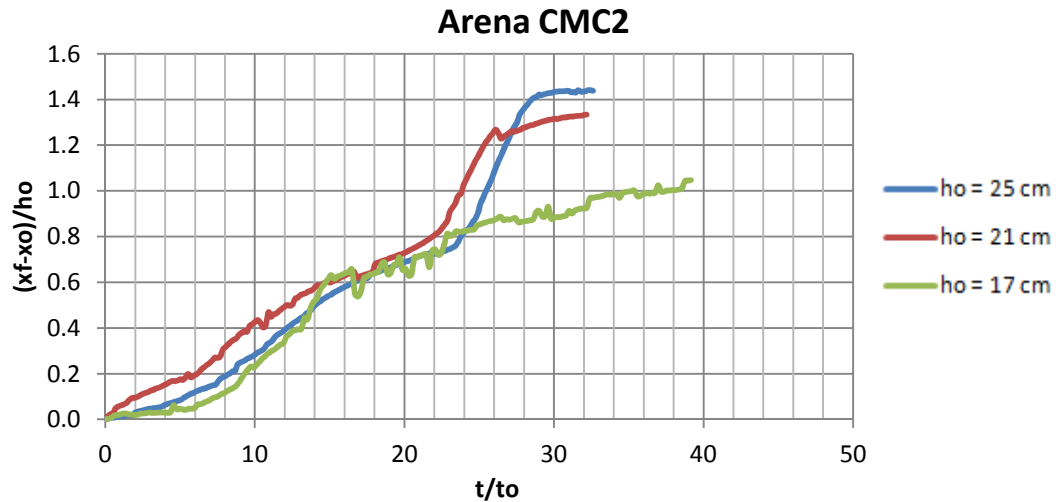
### Arena Agua



### Arena CMC1







**Figura 5.2:** Distancia adimensional por altura de columna vs tiempo para distintos fluidos ambientes en arena.

Al analizar los resultados normalizados por la altura se puede apreciar que para los medios newtonianos las curvas tienden a colapsar en una. En el caso de los fluidos pseudoplásticos se puede apreciar que, para las alturas de 21 y 25 centímetros, las curvas tienden a acercarse entre ellas. Si analizamos el avance del fenómeno en estos ambientes pseudoplásticos, se puede apreciar que existe un tramo desde el inicio del colapso hasta el  $t/t_0$  cercano a 25 en donde las curvas presentadas tienden a colapsar en una, lo cual se pierde una vez el flujo secundario ejerce su influencia en el desarrollo del avance.

Una posible justificación para esta diferenciación tiene relación con el origen del flujo secundario. Al generar el colapso en medios pseudoplásticos mediante el levantamiento de una compuerta, el acto de levantar la compuerta genera un esfuerzo de corte en la zona en contacto con la compuerta misma, lo que provoca que se generen zonas capaces de soportar en cierta medida la caída del material granular. Este efecto se ve atenuado a medida que menor altura tiene la columna, debido a que los esfuerzos de corte generados al extraer la compuerta son mayores en base a la altura, dado que la compuerta adquiere mayor velocidad mientras se extrae (parte inicialmente en reposo y es retirada de manera manual lo más rápido posible). Si bien no se tienen análisis para la velocidad de la compuerta es posible asumir que esta aumenta de velocidad a medida que se extrae, ya sea hasta alcanzar una velocidad constante o simplemente aumentando hasta que se extrae por completo.

- Análisis para Esferas de Vidrio (Figuras 5.3 y 5.4):

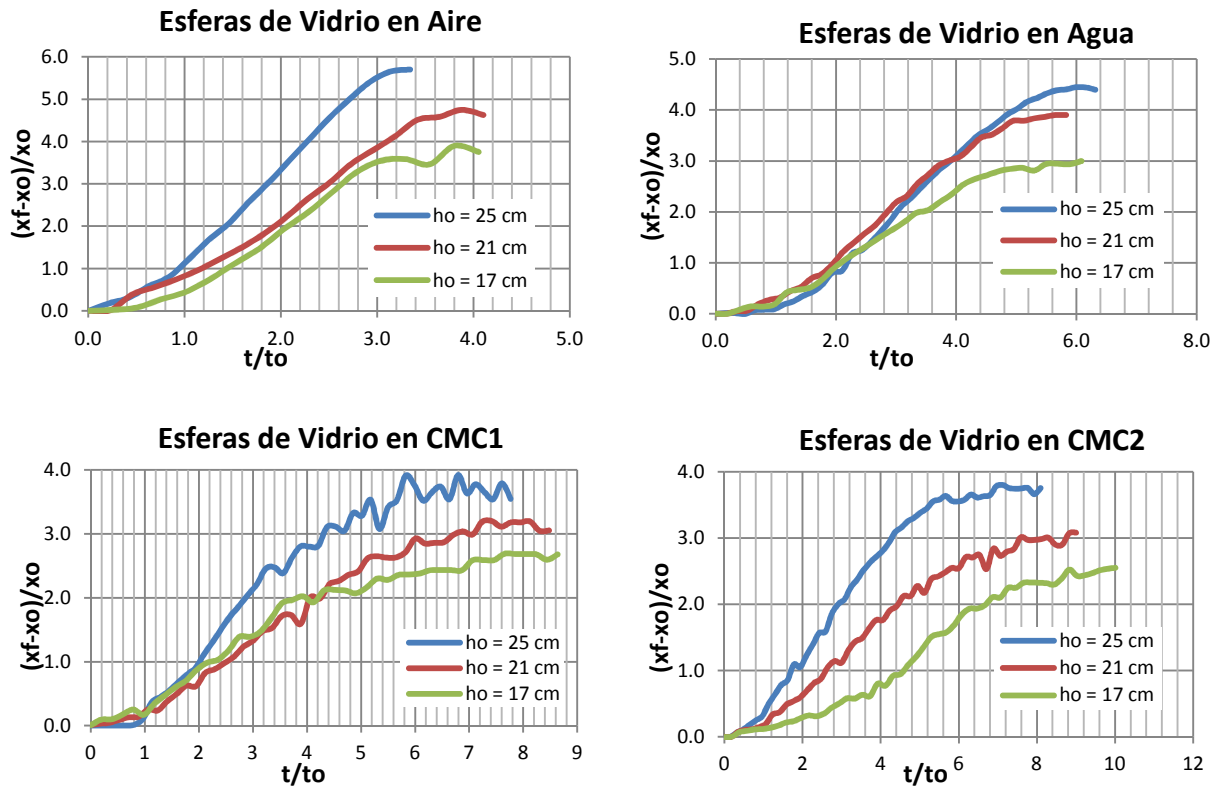
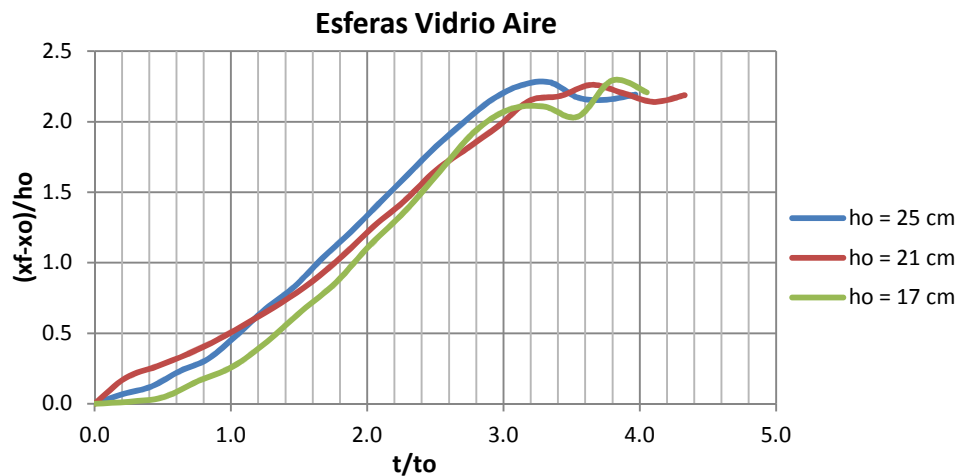
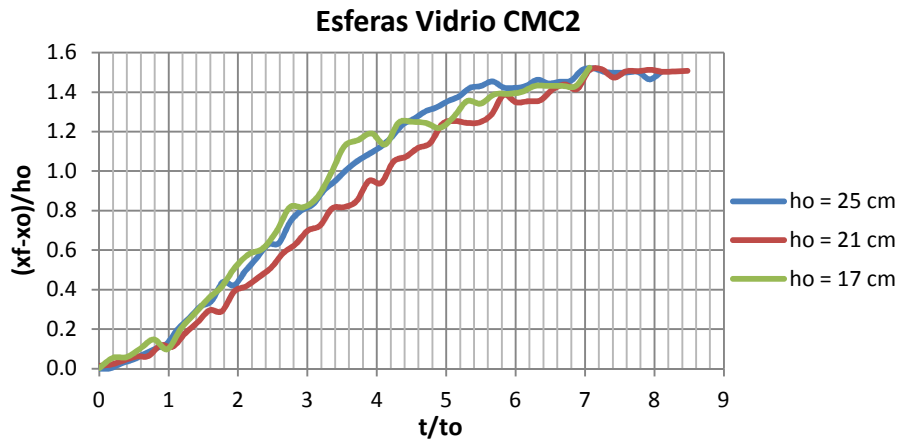
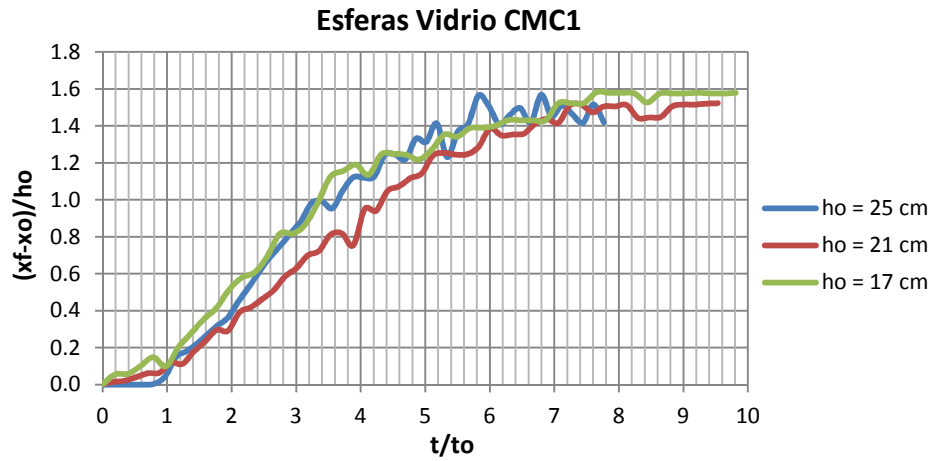
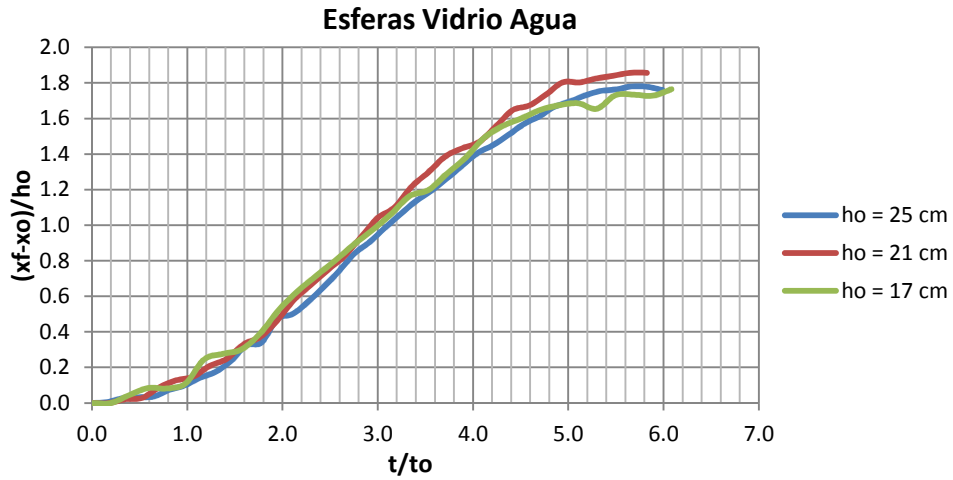


Figura 5.3: Distancia adimensionalizada vs tiempo para distintos fluidos ambientes en esferas de vidrio.

Análogo al caso visto en las arenas, los mayores tiempos se obtienen en los casos de los flujos pseudoplásticos (Figura 5.3). Al adimensionalizar los resultados es posible apreciar que los tiempos de duración del fenómeno no dependen de la altura de la columna. Este análisis es realizado normalizando la distancia por el largo basal de la columna, por lo que ahora se presentan los gráficos normalizando por la altura de columna para ver si existe alguna discrepancia:





**Figura 5.4:** Distancia adimensionada por altura de columna vs tiempo para distintos fluidos ambientes en esferas de vidrio.

Al analizar los resultados normalizados por la altura, se puede apreciar que, a diferencia de los resultados obtenidos para la arena, todas las curvas tienden a colapsar independiente del fluido ambiente al cual las esferas de vidrio estén sometidas.

- Análisis para Esferas de Acero (Figuras 5.5 y 5.6):

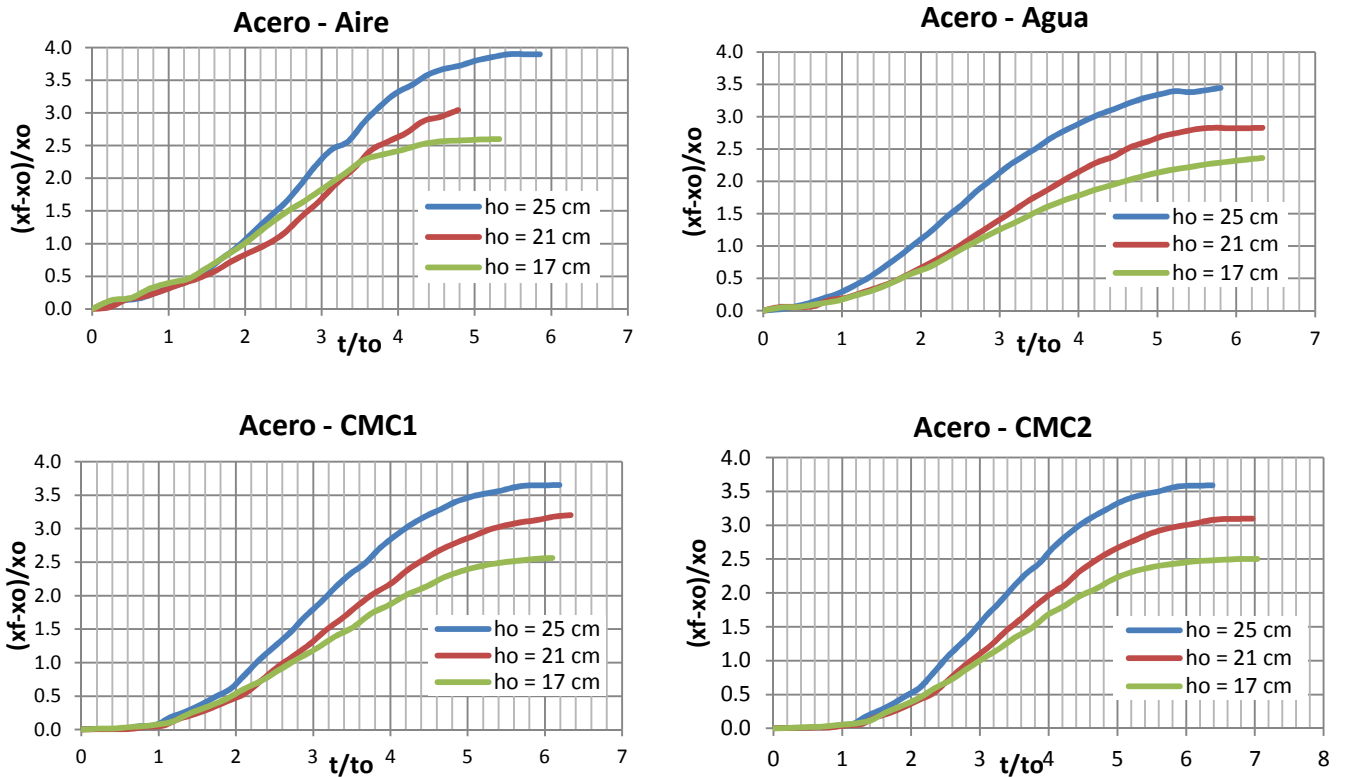
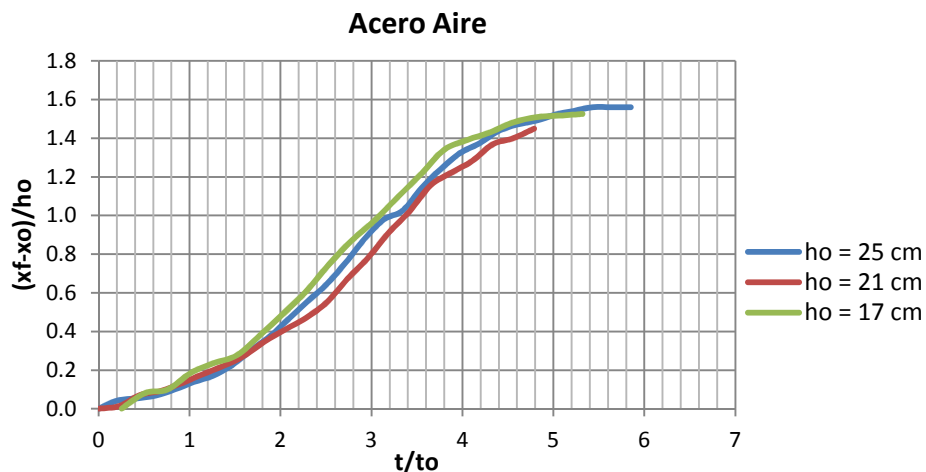
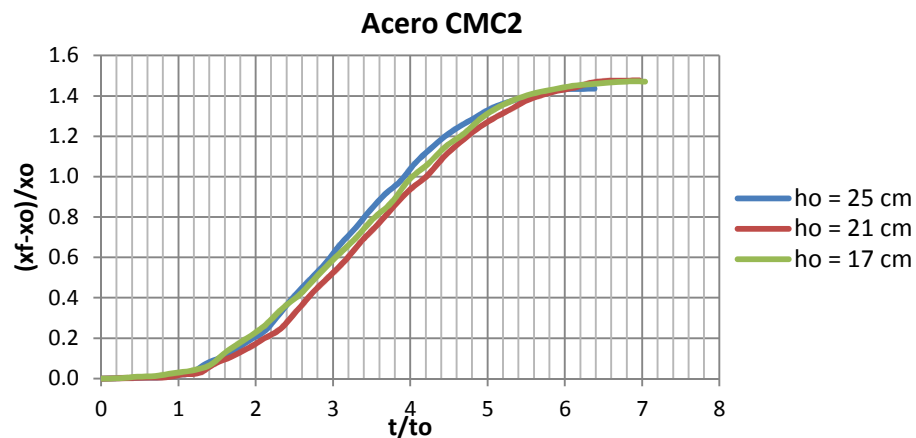
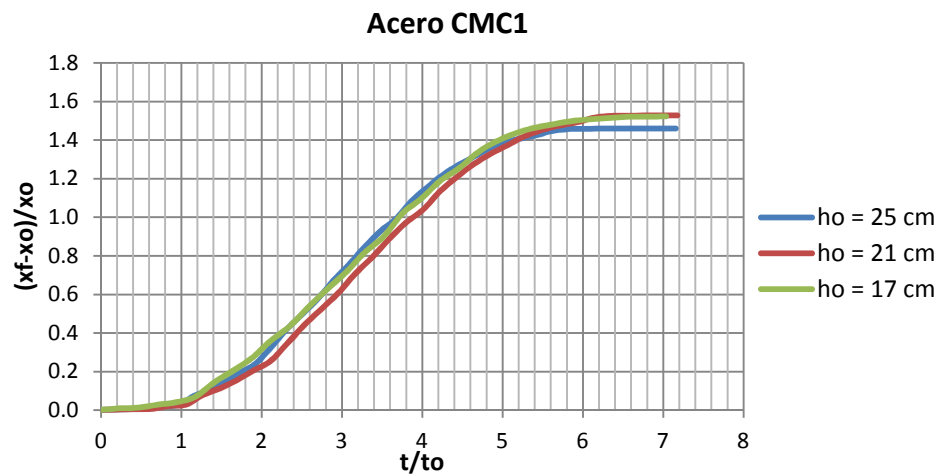
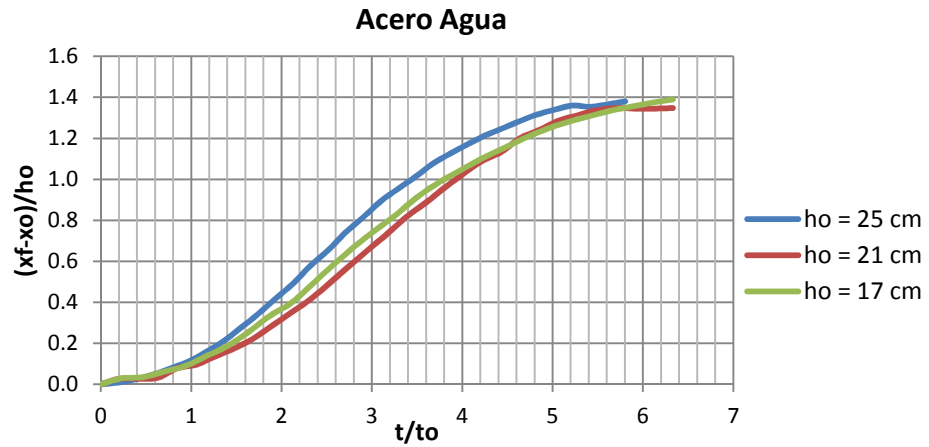


Figura 5.5: Distancia adimensional vs tiempo para distintos fluidos ambientes en acero.

En el caso del acero, al adimensionalizar el tiempo y la distancia se puede apreciar que existen muy pocas diferencias entre los distintos medios. En particular, se puede apreciar que el tiempo adimensionalizado ( $t/t_0$ ) que toma para describir todo el ensayo se mueve entre los  $t/t_0 = 5$  y los  $t/t_0 = 7$ .

En base a los resultados obtenidos para los tres materiales utilizados es posible apreciar que el material granular que se ve menos influenciado por el medio en el cual se trabaja corresponde al acero.



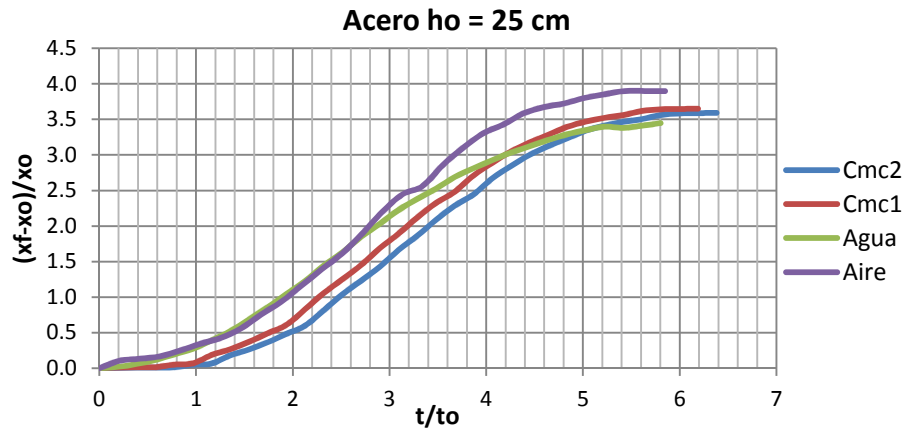


**Figura 5.6:** Distancia adimensional por altura de columna vs tiempo para distintos fluidos ambientes en acero.

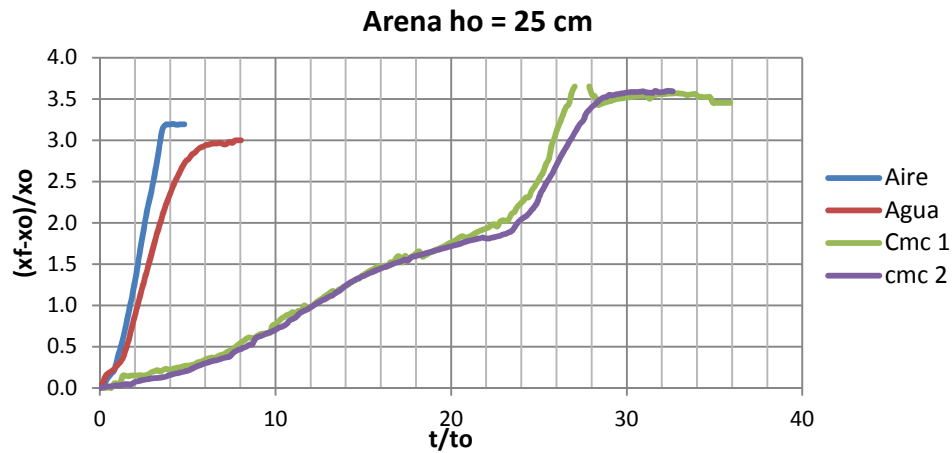
Al igual que en el caso de las esferas de vidrio, al analizar los resultados normalizados por la altura se puede apreciar que todas las curvas tienden a colapsar independiente del fluido ambiente al cual las partículas de acero estén sometidas.

- Análisis en base al Fluido Ambiente (Figuras 5.7, 5.8 y 5.9):

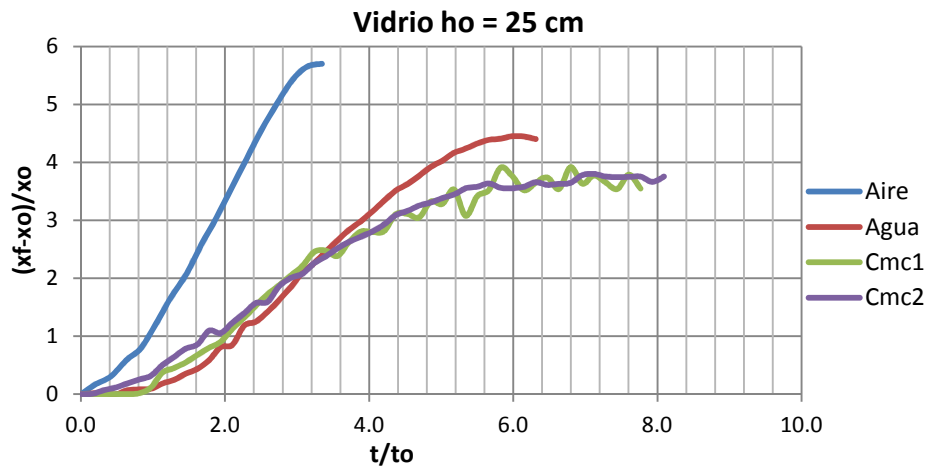
A continuación, se presentan los resultados obtenidos para los distintos fluidos ambientes manteniendo la altura de la columna en un valor constante de 25 centímetros (Figuras 5.7, 5.8 y 5.9):



**Figura 5.7:** Distancia vs tiempo adimensionados acero en distintos fluidos ambientes.



**Figura 5.8:** Distancia vs tiempo adimensionados arena en distintos fluidos ambientes.



**Figura 5.9:** Distancia vs tiempo adimensionados esferas de vidrio en distintos fluidos ambientes.

Otro tema a analizar es el comportamiento de los parámetros adimensionales al compararlos para un solo material en los distintos medios. Para el caso del acero se puede apreciar que todas las curvas son similares entre sí, lo que nos permite apreciar que el cambio de fluido ambiente es poco influyente en el desarrollo del colapso para las partículas de acero. En el caso de las arenas, la diferencia del medio influye mucho en sus resultados, como ya se dijo anteriormente. Finalmente, en el caso de las esferas de vidrio pasa un fenómeno interesante. Como se puede apreciar en la Figura 5.9, las curvas tienden a colapsar para el caso del agua y las mezclas no newtonianas, pero en el caso del aire esto no ocurre. La principal razón para esto se debe a la fricción que presentan las partículas de vidrio con el acrílico.

### 5.1.2 Análisis de Adimensionales

Además de los números adimensionales obtenidos para la distancia y el tiempo, también se pueden calcular mediante ecuaciones números adimensionales utilizando algún parámetro antes obtenido. En particular se hablará de tres adimensionales que tienen relación la mecánica de fluidos, como son el número de Arquímedes, el número de Froude y el número de Reynolds.

- Número de Arquímedes (Ar)

Se trata de un número adimensional que se atribuye al físico griego Arquímedes. Se trata de un número adimensional de la forma:

$$Ar = \frac{gl^3 \rho_l (\rho - \rho_l)}{\mu^2} \quad (5.3)$$

donde:

$g$  = aceleración gravitacional [ $m/s^2$ ]

$\rho_l$  = densidad del fluido [ $kg/m^3$ ]

$\rho$  = densidad de partícula [ $kg/m^3$ ]

$\mu$  = viscosidad dinámica [ $kg/s \cdot m$ ]

$l$  = largo característico [ $m$ ]

En general se utiliza en transferencia de movimiento y en particular en flotación, fluidización y movimientos debido a diferencias de densidad. Este número adimensional representa la relación existente entre las fuerzas gravitacionales y las fuerzas viscosas.

- Número de Froude (Fr)

Es un número adimensional que relaciona el efecto de las fuerzas de inercia y las fuerzas de gravedad que actúan sobre un fluido y debe su nombre al ingeniero hidrodinámico y arquitecto naval inglés William Froude. Este número es un parámetro importante siempre que la gravedad sea un factor de influencia en el movimiento de un fluido y se define como:

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{gl}} \quad (5.4)$$

- Número de Reynolds (Re)

El número de Reynolds se puede definir como la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas presentes en un fluido. Éste relaciona la densidad, viscosidad, velocidad y dimensión típica de un flujo en una expresión adimensional, que interviene en numerosos problemas de dinámica de fluidos y que se define como:

$$Re = \frac{\rho U d}{\mu} \quad (5.5)$$

El cual para fluidos no newtonianos se puede reescribir como:

$$Re = \frac{\rho_l U^{2-n} l^n}{K} \quad (5.6)$$

donde:

$U$  = velocidad del fluido [ $m/s$ ]  
 $\rho_l$  = densidad del fluido [ $kg/m^3$ ]  
 $k$  = índice de consistencia [ $Pa \cdot s^n$ ]  
 $n$  = índice de comportamiento de flujo [-]  
 $l$  = largo característico [ $m$ ]

Cabe destacar que la ecuación 5.6 es válida para tanto para los fluidos ambientes pseudoplásticos como para los newtonianos, en los cuales el índice de comportamiento de flujo ( $n$ ) toma un valor de 1 y el índice de consistencia ( $k$ ) pasa a ser la viscosidad dinámica del fluido, con lo que se recupera el número de Reynolds para fluidos newtonianos (ecuación 5.5).

Según diversos estudios (Lajeunesse et al., 2005, Lube et al., 2005), otro parámetro de interés que se debe considerar corresponde a la razón de aspecto ( $r$ ), la cual se define como la razón entre la altura de la columna de material granular y el largo basal de la misma columna en reposo.

$$r = \frac{h_0}{x_0} \quad (5.7)$$

Una vez calculados estos adimensionales, se deben comparar con algún otro adimensional de interés. Para este estudio, ese parámetro de interés corresponde a la distancia final adimensionalizada, pues es uno de los parámetros que mayor importancia tienen dentro de este fenómeno.

A continuación se presentan los gráficos que relacionan la distancia final adimensionalizada con los distintos números adimensionales introducidos. Para estos gráficos (Figuras 5.10 a 5.18) la nomenclatura utilizada para referirse a los datos presentados es una composición del material usado y el fluido ambiente en la cual se desarrolla el fenómeno, en donde las primeras tres letras de la leyenda corresponden al material utilizado y el resto al fluido ambiente.



- Número de Reynolds

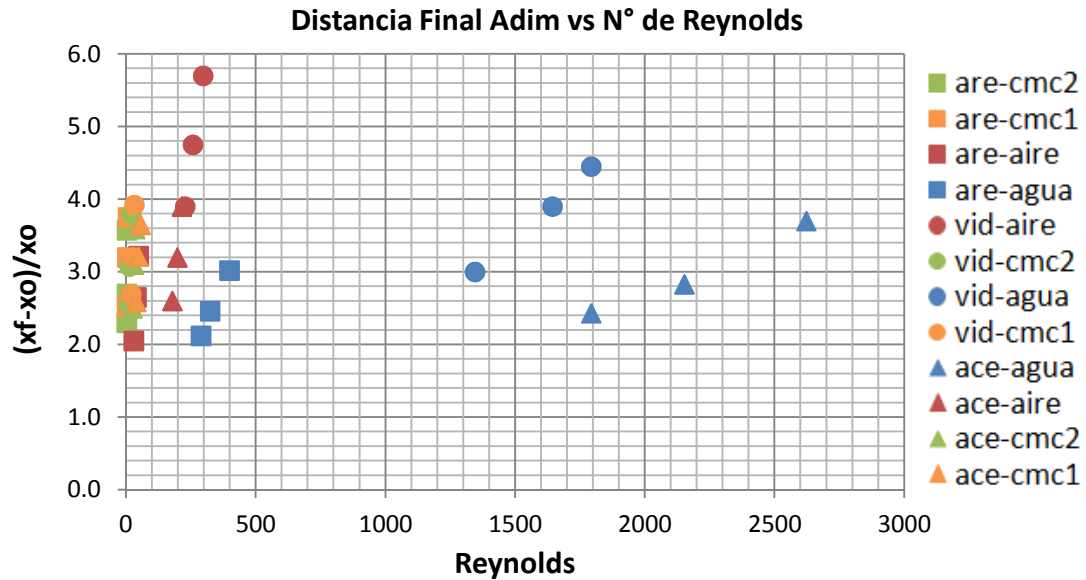


Figura 5.10: Distancia final adimensionada vs N° de Reynolds.

En la Figura 5.10 es difícil diferenciar los resultados obtenidos para las mezclas pseudoplásticas, por lo que se presenta nuevamente el mismo gráfico, pero en escala log – log.

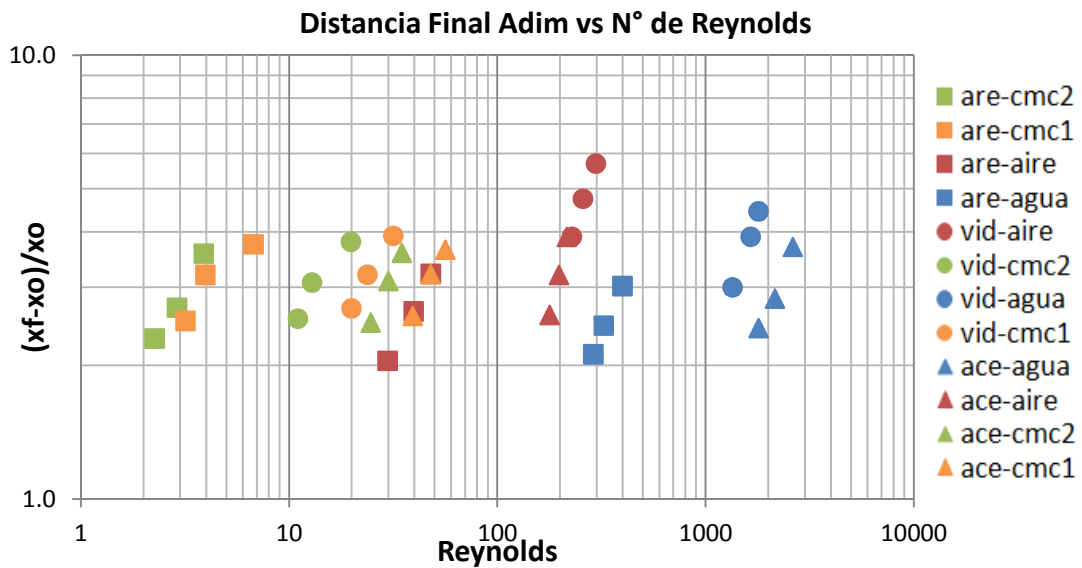
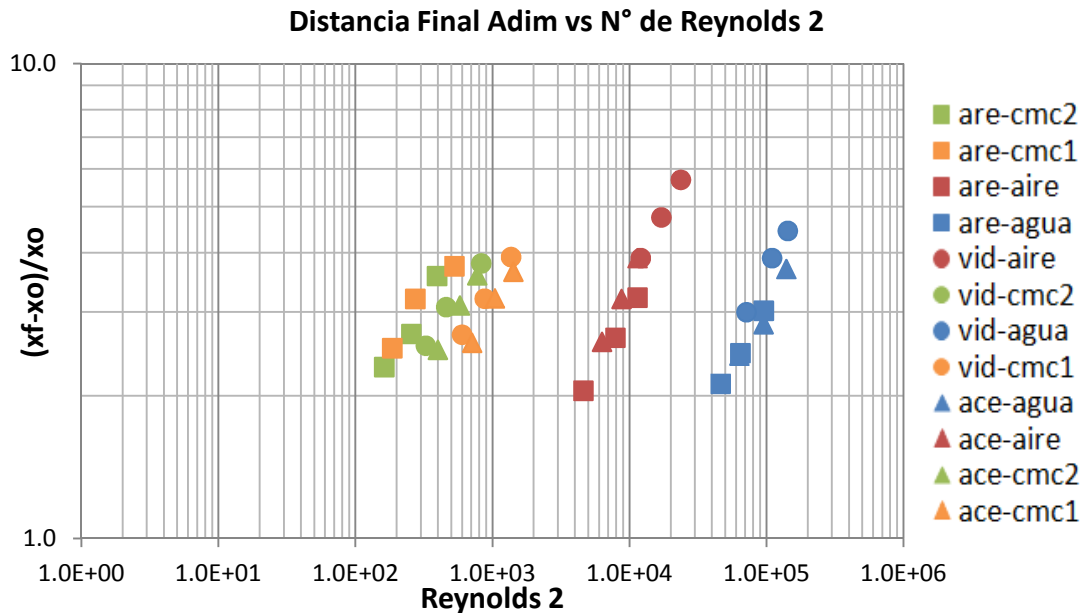


Figura 5.11: Distancia final adimensionada vs N° de Reynolds (log – log).

Antes de poder analizar la Figura 5.11, se debe explicar bien a qué corresponde este número de Reynolds. Como se mencionó anteriormente, la ecuación para el número de Reynolds tiene dentro de sus variables una distancia característica, la cual en este estudio puede ser tanto el diámetro de la partícula como la altura de la columna de material granular.

Para este caso, se considera como largo característico al diámetro de la partícula, por lo que para una misma partícula analizada en un mismo medio el único parámetro que varía corresponde a la

velocidad del flujo. Dicho esto, se puede apreciar que los resultados se ordenan de menor a mayor número de Reynolds en función de la viscosidad cinemática de las mezclas, en donde las mezclas con CMC2 presentan la mayor viscosidad cinemática (entre  $5$  y  $6 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ ) y se ubican en los valores más bajos de número de Reynolds, mientras que el fluido ambiente con menor viscosidad cinemática (el agua,  $1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ) obtiene los valores más altos de número de Reynolds.



**Figura 5.12 :** Distancia final adimensionalada vs N° de Reynolds<sub>2</sub>.

En la Figura 5.12, se utiliza un número adimensional denominado de manera arbitraria como Reynolds<sub>2</sub> ( $Re_2$ ), el cual corresponde al número de Reynolds obtenido cuando se considera como largo característico a la altura de la columna de material granular ( $Re_2 = \frac{\rho_l U^{2-n} H^n}{K}$ ). Al realizar el cambio del largo característico desde el diámetro de la partícula a la altura de la columna, básicamente lo que se obtiene es una disminución en la magnitud del número adimensional producto de la reducción en la magnitud de una de sus variables. Debido a que las alturas ensayadas son las mismas independiente del fluido ambiente o material granular utilizado, se puede apreciar como al realizar este cambio las partículas en medios newtonianos tienden a juntarse en lo que parece ser una única recta para cada fluido ambiente (se debe tener cuidado con esta única “recta”, puesto que se está trabajando con un gráfico en escala log - log).

- Número de Froude

Análogo a lo antes realizado para el número de Reynolds, se presenta a continuación un análisis para la distancia final adimensionalada versus el número de Froude, en donde el número de Reynolds es calculado en base a la velocidad de inflexión.

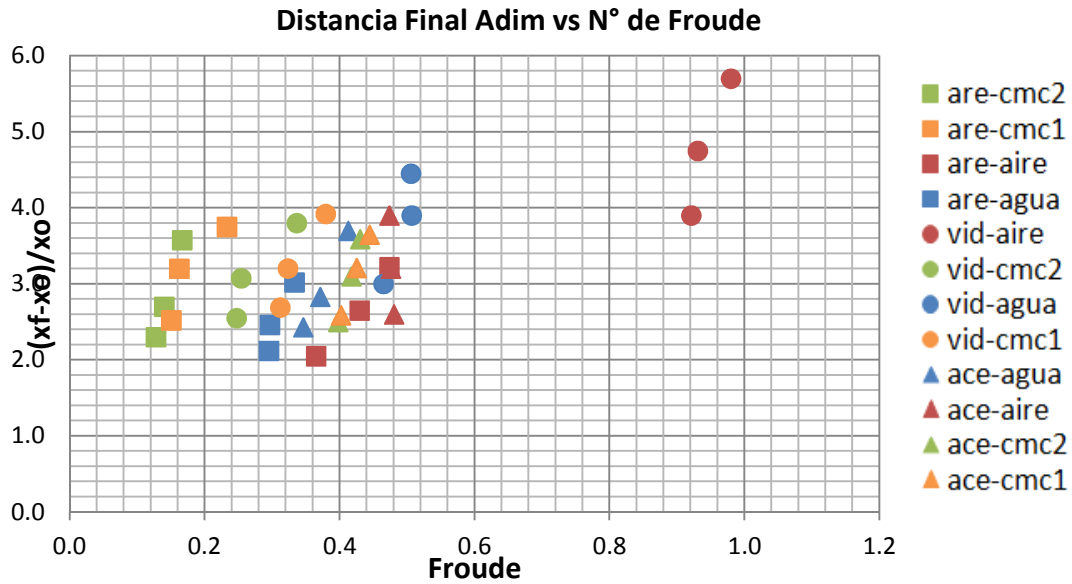


Figura 5.13: Distancia final adimensionada vs N° de Froude.

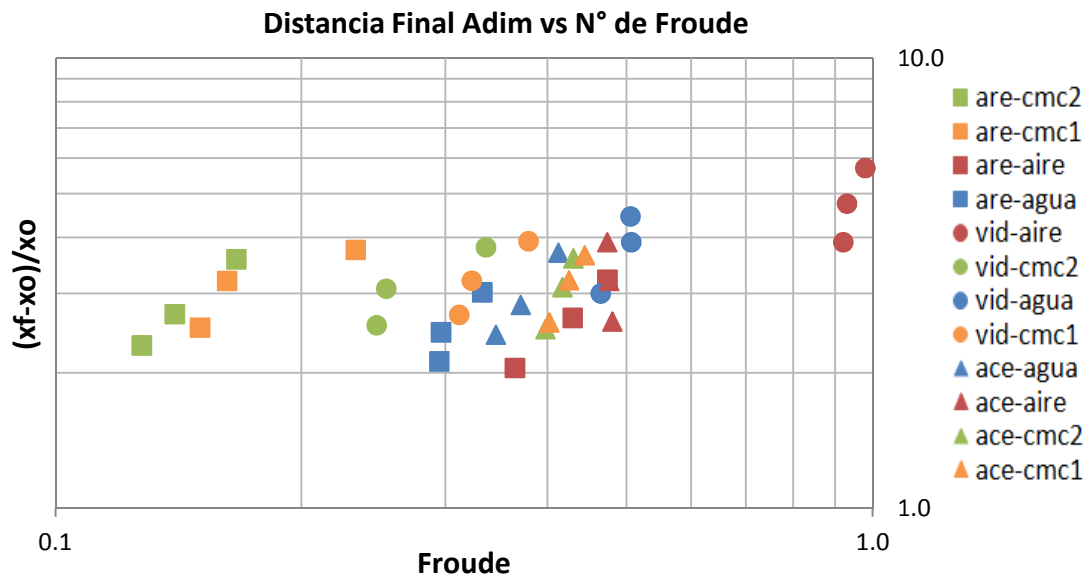


Figura 5.14: Distancia final adimensionada vs N° de Froude (log – log).

Este número de Froude (Figura 5.14) corresponde al valor obtenido cuando el largo característico utilizado corresponde a la altura de la columna ( $Fr = \frac{U}{\sqrt{gh}}$ ). En este caso es difícil encontrar un comportamiento claro por lo que se analiza el caso en donde el largo característico utilizado corresponde al diámetro de la partícula (Figura 5.15 y 5.16), con lo que se tiene:

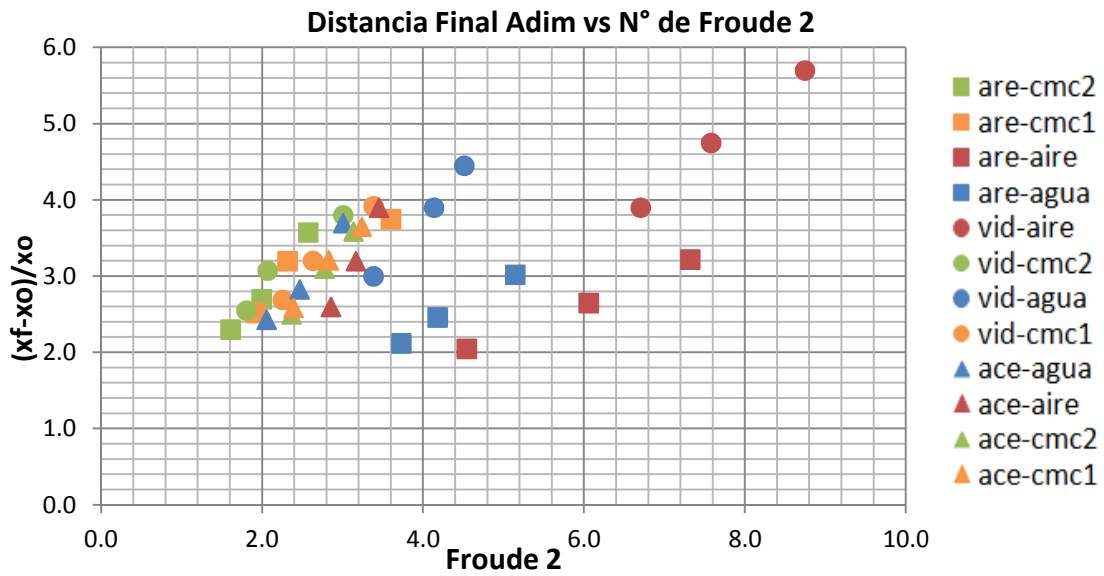


Figura 5.15: Distancia final adimensionada vs N° de Froude<sub>2</sub>.

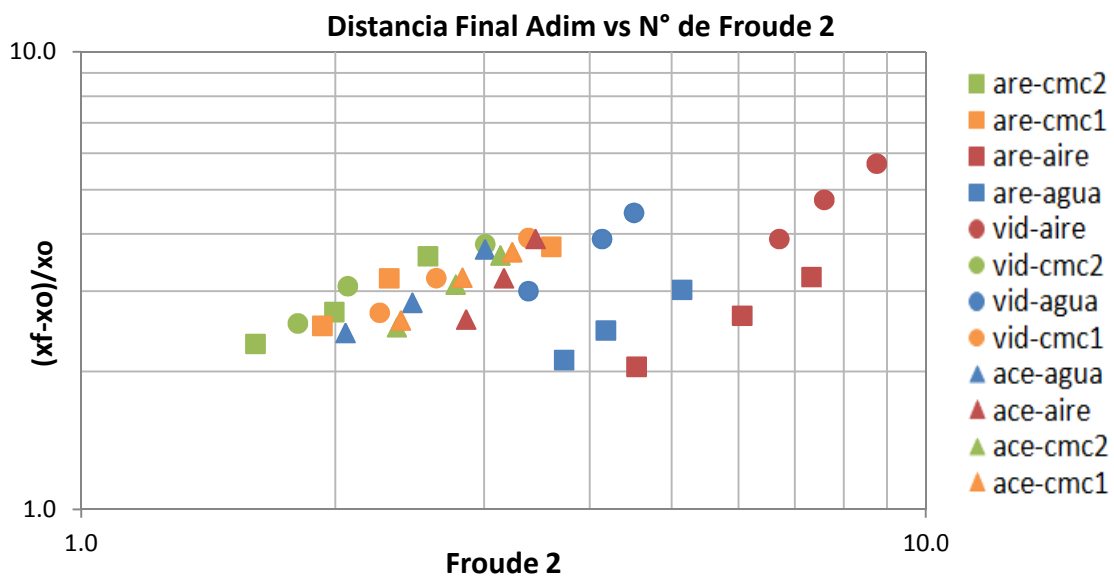


Figura 5.16: Distancia final adimensionada vs N° de Froude<sub>2</sub> (log – log).

En este caso (Figura 5.16) es más fácil apreciar el comportamiento de la distancia final para el número de Froude. Esto debido a la limitación de variables en el número de Froude, ya que al fijar el diámetro de la partícula, se tiene que el comportamiento para el número de Froude<sub>2</sub> ( $Fr_2 = \frac{U}{\sqrt{gd}}$ ) es directo del comportamiento en base a la velocidad, con lo cual no es difícil deducir que a mayor velocidad de inflexión mayor distancia máxima alcanzada.

Otro parámetro adimensional que genera dos interpretaciones corresponde al número de Arquímedes (Figuras 5.17 y 5.18).

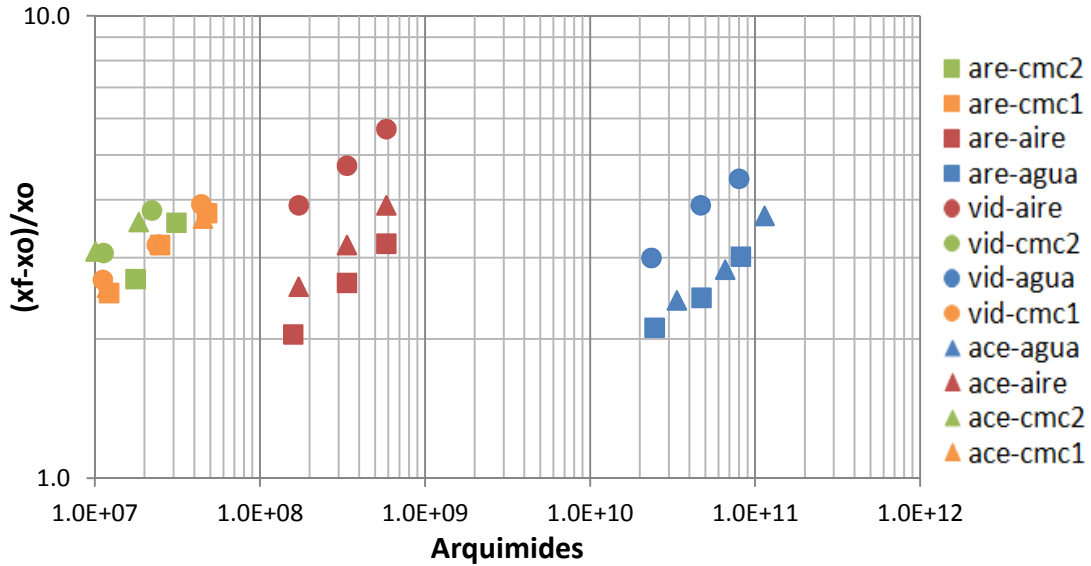


Figura 5.17: Distancia final adimensionada vs N° de Arquímedes (log – log).

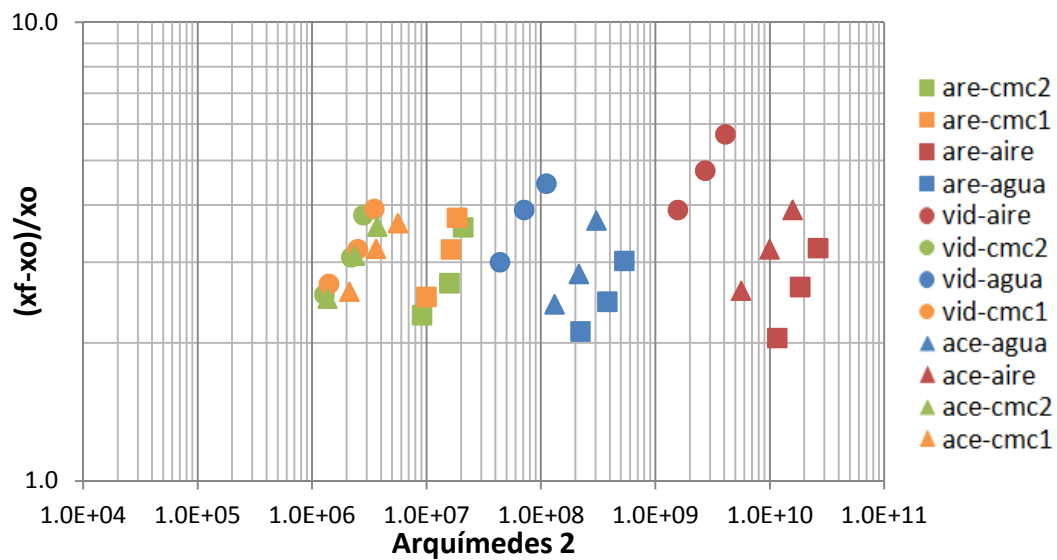


Figura 5.18: Distancia final adimensionada vs N° de Arquímedes<sub>2</sub> (log – log).

La primera gráfica analizada corresponde al parámetro calculado en base a la ecuación (5.3) mientras, mientras que la segunda gráfica nos presenta un “Arquímedes 2”, el cual es un valor que se obtiene al comparar las fuerzas gravitacionales con las fuerzas viscosas, en la forma:

$$Ar_2 = \frac{gl^3(\rho - \rho_l)}{\mu U l} \quad (5.8)$$

donde:

$g$  = aceleración gravitacional [ $m/s^2$ ]

$\rho_l$  = densidad del fluido [ $kg/m^3$ ]

$\rho$  = densidad del cuerpo [ $kg/m^3$ ]

$\mu$  = viscosidad dinámica [ $kg/s \cdot m$ ]  
 $l$  = longitud característica de un cuerpo [ $m$ ]  
 $U$  = velocidad del frente [ $m/s$ ]

De las Figuras 5.17 y 5.18 es posible apreciar que los parámetros analizados suelen ser afectados en mayor medida por la viscosidad del medio que por el tamaño de la partícula (esto se aprecia pues las partículas tienden a agruparse dentro del gráfico en base a la viscosidad del fluido ambiente independiente del tamaño de la partícula).

Finalmente se estudia la relación entre la distancia final adimensionada y la razón de aspecto ( $r$ ), la cual se conoce como la relación entre la altura de la columna y el largo basal de la misma.

De Lube et al., (2011), se sabe que existe una relación entre la distancia final adimensionada y la razón de aspecto puede expresarse como:

$$\frac{x_f}{x_o} = \alpha r^m \quad (5.9)$$

donde  $r$  corresponde a la razón de aspecto. En las figuras 5.19, 5.20, 5.21 y 5.22 se presenta la relación entre la distancia final adimensionada y  $r$  para distintos fluidos ambientes, y en base a ellas se generan líneas de tendencia para analizar el comportamiento de lo que sería el parámetro  $\alpha$  y  $m$  de la ecuación (5.9).

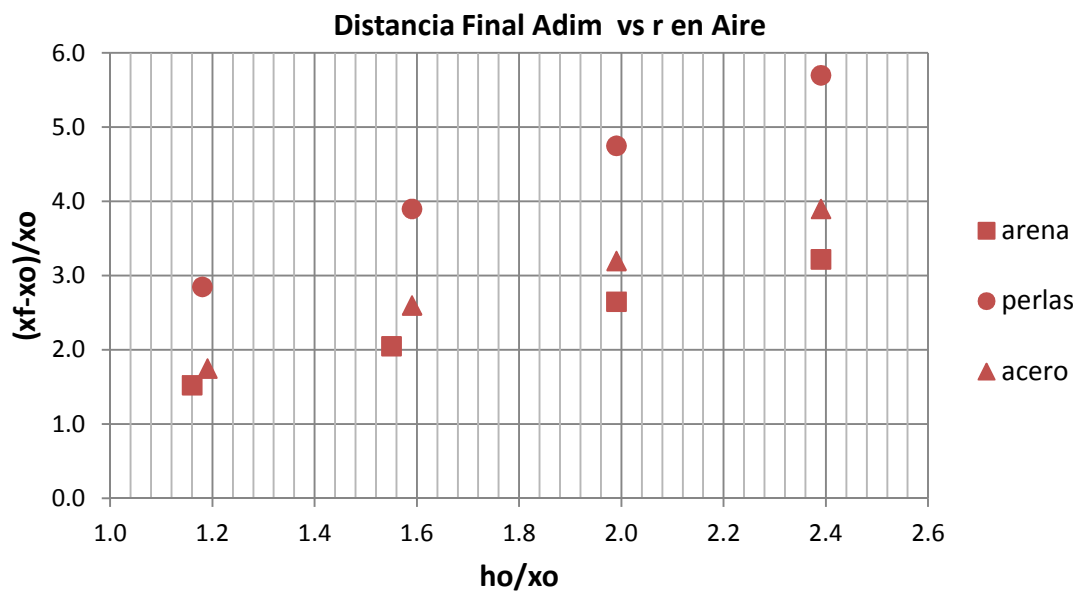
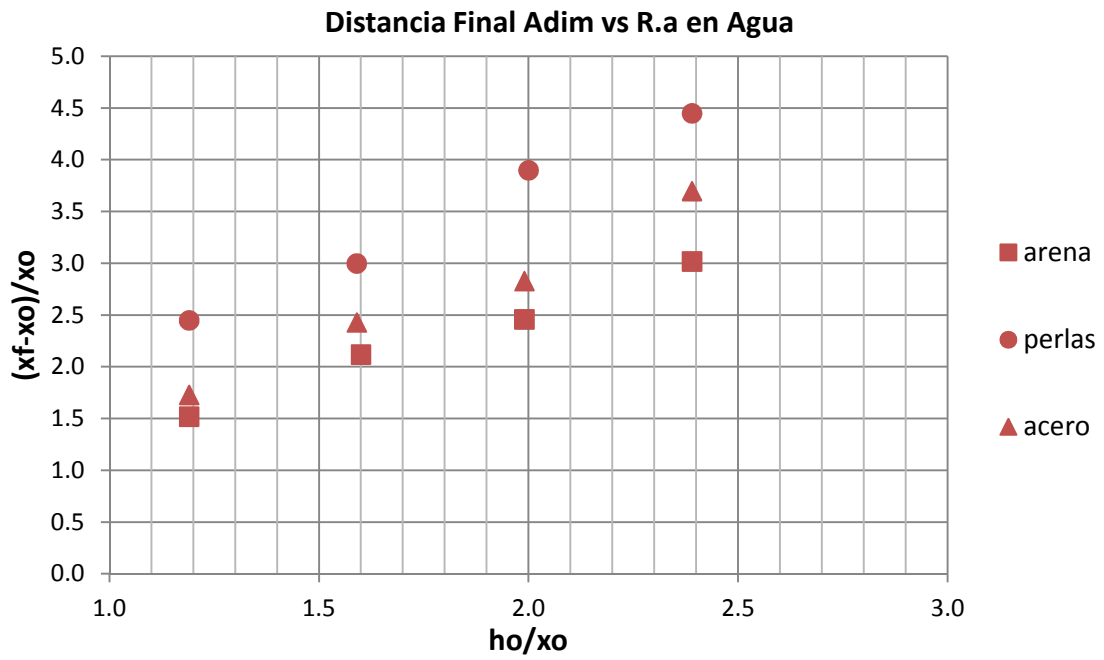
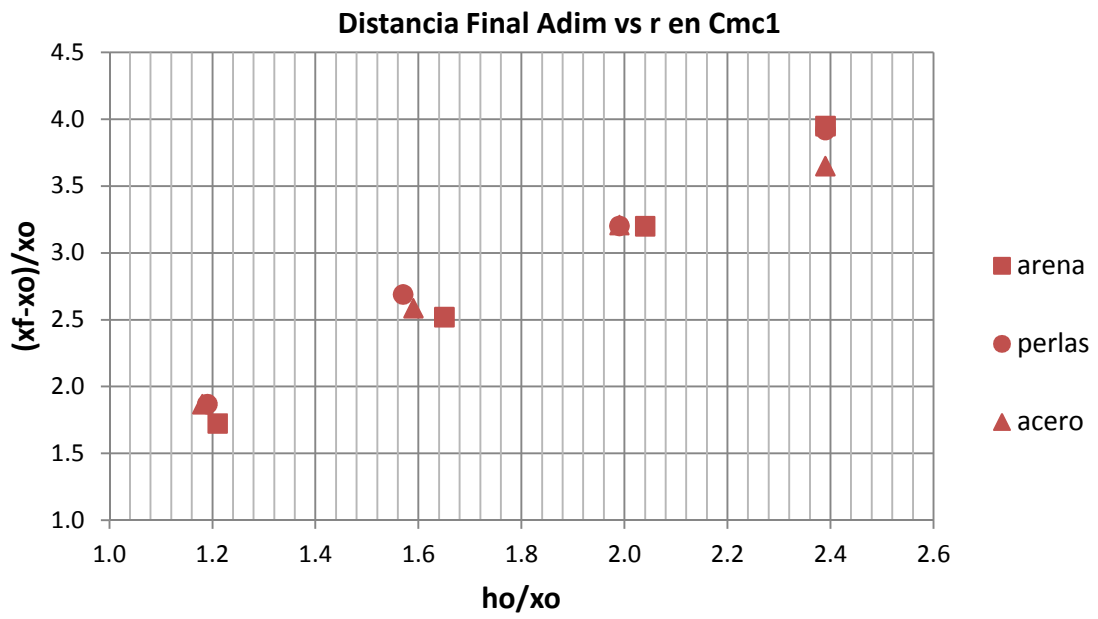


Figura 5.19: Distancia Final Adimensionada vs ho/xo en aire.



**Figura 5.20:** Distancia Final Adimensionada vs ho/xo en agua.



**Figura 5.21:** Distancia Final Adimensionada vs ho/xo en cmc1.

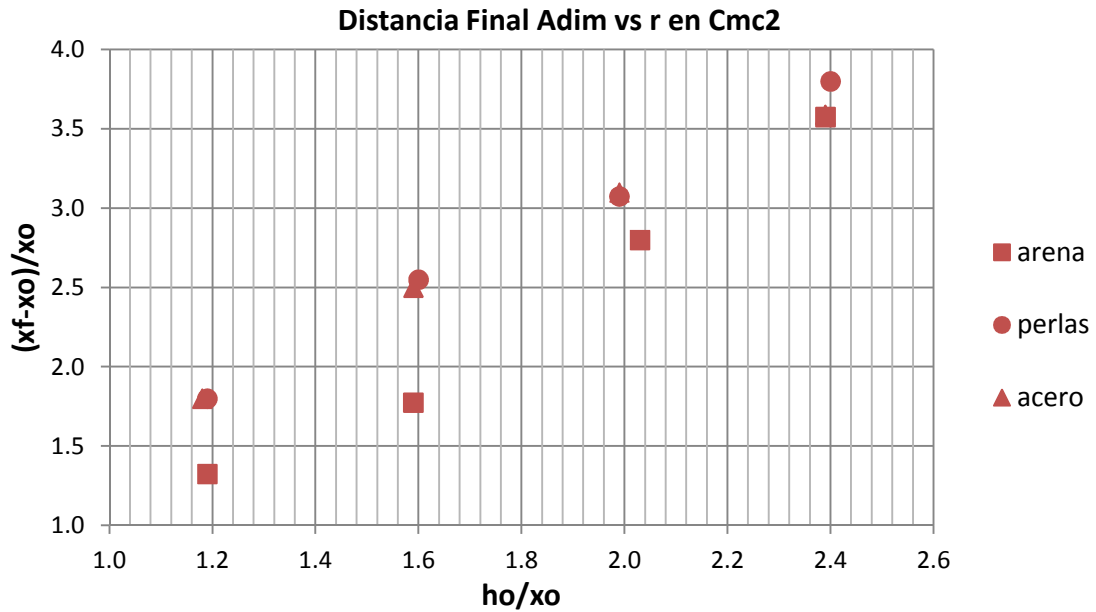


Figura 5.22: Distancia Final Adimensionada vs ho/xo en cmc2.

Tabla 5.1: Parametro  $\alpha$  de ecuación (5.9) obtenido en base figuras 5.19 a 5.22.

	Agua	Aire	CMC1	CMC2
<b>Arena</b>	1.3038	1.3061	1.3702	0.9829
<b>Vidrio</b>	2.069	2.4435	1.6034	1.5167
<b>Acero</b>	1.4488	1.471	1.6247	1.5531

Tabla 5.2: Parametro  $m$  de ecuación (5.9) obtenido en base figuras 5.19 a 5.22.

	Agua	Aire	CMC1	CMC2
<b>Arena</b>	0.9596	1.0324	1.2069	1.4559
<b>Vidrio</b>	0.8811	0.9746	1.0333	1.0492
<b>Acero</b>	1.0476	1.1358	0.9578	0.9836

En términos generales, en la medida que variamos el fluido ambiente los parámetros  $\alpha$  y  $m$  expresados en la ecuación (5.8) cambian significativamente. Más aún, si se analizan las potencias ( $m$ ) obtenidas para cada caso estudiado utilizando como material granular la arena, se puede apreciar que los valores de  $m$  aumentan a medida que nos movemos desde el medio de menor viscosidad cinemática (agua) al medio de mayor viscosidad cinemática (CMC2) (Tabla 5.2).



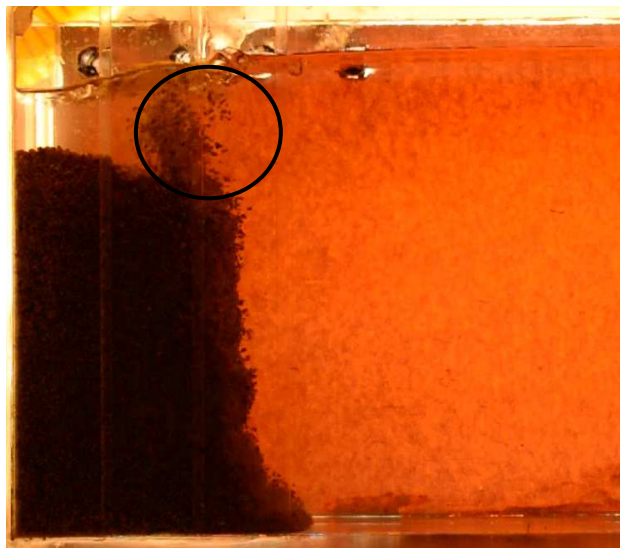
## 5.2 Análisis del Fenómeno de Colapso

El colapso de material granular basado en el principio de rompimiento de presa ha sido estudiado ampliamente para medios newtonianos, en los cuales una vez generado el colapso se espera que presente una forma final cóncava, como se muestra en la Figura 5.23, en la que se observa que el material se extiende hasta alcanzar el reposo formando una especie de curvatura (Roche et al, 2010; para partículas no fluidizadas).



**Figura 5.23:** Condición final colapso de arena en aire.

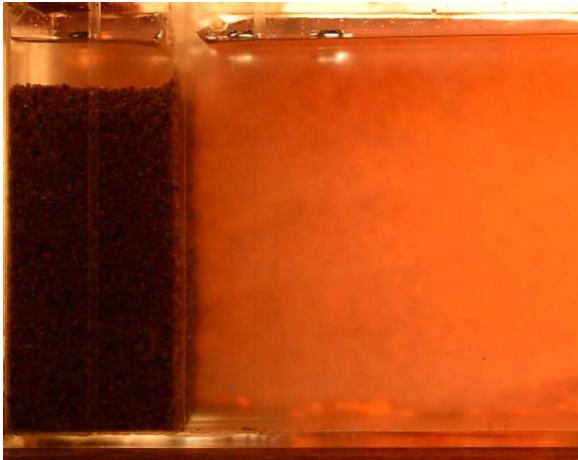
En términos generales, en este trabajo se obtiene este resultado para todos los materiales trabajados cuando el fluido ambiente corresponde al aire. Cuando el fluido ambiente en la generación de este ensayo corresponde a alguno de los otros fluidos trabajados con viscosidad mayor a la del aire, la abertura de la compuerta genera un esfuerzo de corte entre la compuerta de acrílico y el fluido ambiente, lo que afecta de manera significativa el colapso de material granular (Figura 5.24).



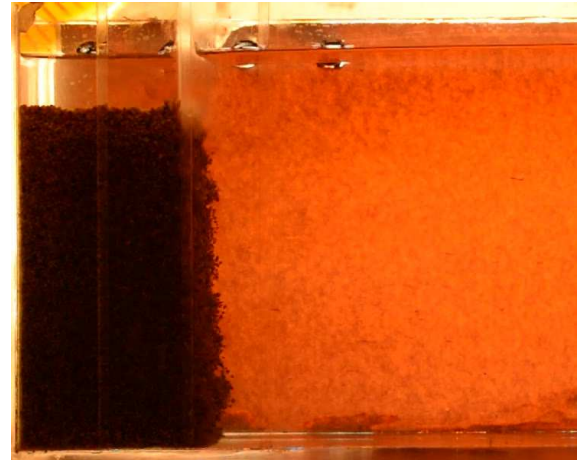
**Figura 5.24:** Efecto del esfuerzo de corte en la columna de material granular.

Se puede apreciar en la Figura 5.24 como el levantar la compuerta tiende a generar un pequeño flujo hacia arriba en la superficie libre de la arena en contacto con la compuerta. Para el resto de los materiales, este fenómeno también sucede, pero debido a que las partículas son de mayor peso y tamaño este efecto se atenúa en ellas.

El factor viscosidad también influye en este fenómeno, en particular en el caso de las arenas las viscosidades de los medios pseudoplásticos son suficientemente altas como para sostener parcialmente este material granular (cuando se habla de “sostener” a las partículas de arena, se está haciendo referencia a la relación entre la viscosidad del fluido ambiente y la velocidad de sedimentación de las partículas, en donde a mayor viscosidad menor velocidad de sedimentación). Para poder ver esto se presentan las Figuras 5.25 y 5.26, en donde se presenta el inicio del colapso para un fluido pseudoplástico (cmc2) y para un fluido newtoniano (agua)

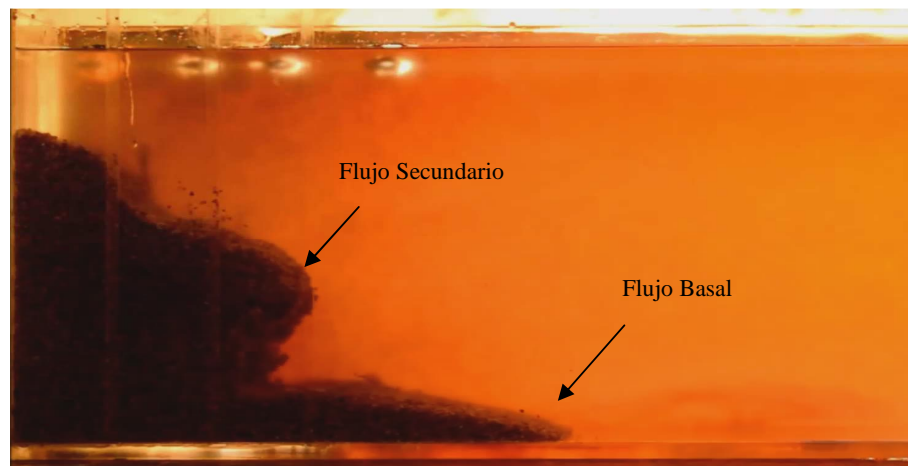


**Figura 5.25:** Inicio de colapso en CMC2.



**Figura 5.26:** Inicio de colapso en agua.

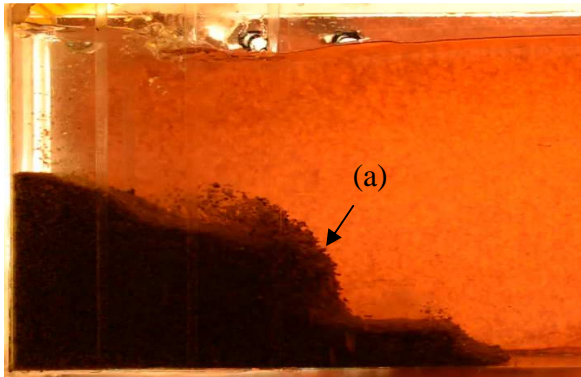
Se puede apreciar que para el caso del medio pseudoplástico, la columna de material granular permanece básicamente sin movimiento (se debe señalar que estas imágenes corresponden al desarrollo del colapso a los 0.1 segundos de haber levantado la compuerta). La alta viscosidad genera un mayor esfuerzo de corte y una menor velocidad de sedimentación, lo que permite que se dé un flujo secundario (el cual definimos como el flujo de la superficie libre de la columna en contacto con la compuerta antes del inicio del experimento) para las arenas en medios pseudoplásticos (Figura 5.27).



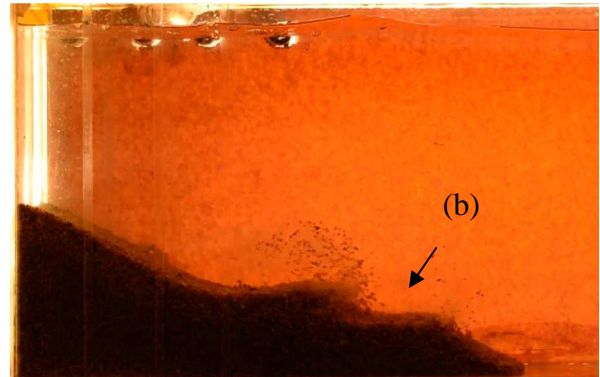
**Figura 5.27:** Desarrollo del colapso para arenas en ambientes pseudoplásticos.

En el caso del agua se genera un fenómeno similar para la arena, pero debido a que la viscosidad del agua es menor a la viscosidad de los medios pseudoplásticos utilizados, estos flujos no

alcanzan a interactuar entre sí, fenómeno que si sucede para la arena en medios pseudoplásticos (Figuras 5.28 y 5.29).

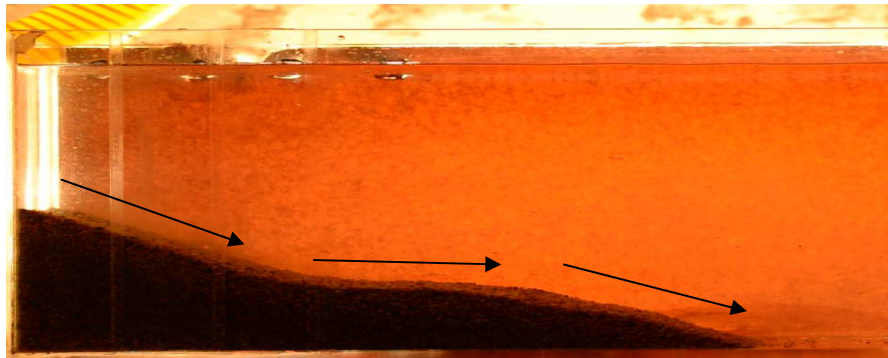


**Figura 5.28:** Desarrollo del colapso para arena en agua (1).



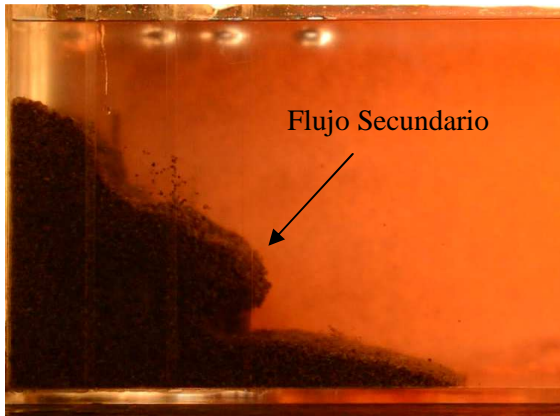
**Figura 5.29:** Desarrollo del colapso para arena en agua (2).

En estas imágenes se puede apreciar que el flujo secundario (ver punto (a) en Figura 5.28) no alcanza a influenciar en el frente basal (la transición desde (a) hasta (b) se produce sin influir de manera significativa en la distancia que recorre el flujo en contacto con la base), por lo tanto, la forma final en este caso termina siendo una mezcla entre una curva con una recta, en donde se produce una zona en la cual el material granular presenta una forma horizontal (Figura 5.30).

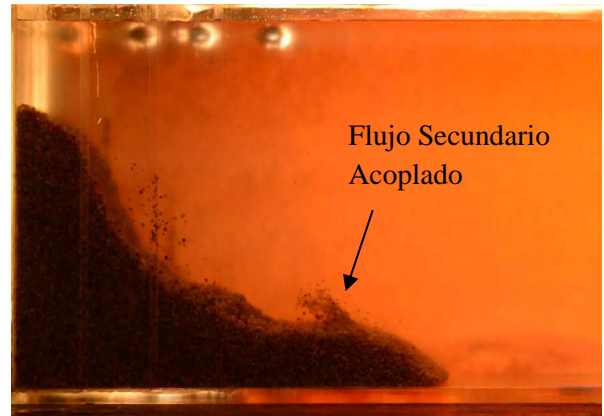


**Figura 5.30:** Condición final colapso de columna de arena en agua.

En el caso de los fluidos pseudoplásticos, el flujo secundario se acopla con el flujo principal (el flujo secundario alcanza al flujo basal, generando un nuevo flujo horizontal), provocando un aumento importante en la distancia que alcanza el frente, así como en su velocidad (Figuras 5.31 y 5.32).



**Figura 5.31:** Desarrollo del colapso para arena en CMC2 (1).



**Figura 5.32:** Desarrollo del colapso para arena en CMC2 (2).

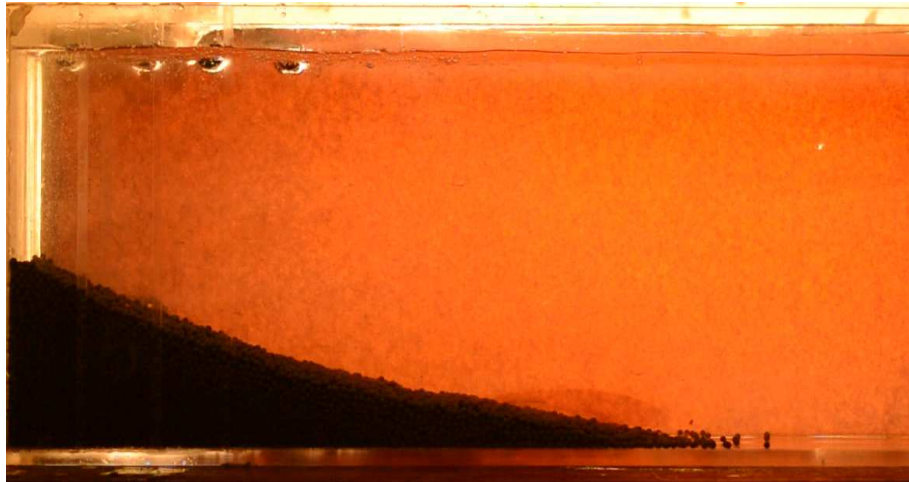


**Figura 5.33:** Condición final colapso de columna de arena en CMC2.

Como se puede ver en las Figuras 5.31 y 5.32, para los fluidos pseudoplásticos este flujo superficial también existe, pero como este si influye en el avance final del frente no se producen variadas pendientes en su forma final (Figura 5.33). Esta forma final del ensayo es muy similar al caso con aire (Figura 5.23), con la diferencia que en el flujo de material granular en ambientes pseudoplásticos no presenta formas tan suaves en su pendiente debido al flujo secundario que se produce en estos casos.



**Figura 5.34:** Condición final colapso de columna de esferas de vidrio en CMC2.



**Figura 5.35:** Condición final colapso de columna de esferas de acero en CMC2.

En los otros materiales ensayados (esferas de vidrio (Figura 5.34) y acero (Figura 5.35)) los fluidos pseudoplásticos no son capaces de soportar a estas partículas (el esfuerzo de corte generado por sus viscosidades respectivas no es suficiente para mantener a las partículas de la superficie libre de la columna en suspensión) por lo cual no se logra generar un flujo secundario, lo que significa que las formas finales que se obtienen de estos ensayos son iguales a las que se esperan para los materiales granulares en aire.

## Capítulo 6

### Conclusiones

El estudio realizado del colapso de material granular conformados por fluidos newtonianos y pseudoplásticos permite apreciar una serie de fenómenos que se presentan al realizar el ensayo cambiando la viscosidad del medio en el que se desarrolla el colapso.

Se realizaron ensayos utilizando como material granular arena, esferas de acero y esferas de vidrio. Al analizar las diferencias entre las esferas de vidrio, las partículas de acero y las arenas; se puede apreciar una gran diferencia en el comportamiento de las arenas con respecto a las dos anteriores. El tema de las arenas comportándose diferente a lo observado en el colapso de los otros materiales granulares utilizados (acero y vidrio) se ha visto en este trabajo, especialmente cuando el colapso del material se realiza en un medio pseudoplástico.

Uno de los fenómenos que más llama la atención en el colapso de arenas en fluidos ambientes pseudoplásticos es la presencia de dos frentes avanzando a medida que se desarrolla el colapso del material granular. Estos flujos corresponden al material granular desplazándose en la base de acrílico y al flujo de material granular que avanza en condiciones de superficie libre (es decir, el material que se encuentra en la parte más alta de la columna). Para arenas, el flujo secundario se presenta de dos maneras: en el caso del agua, se produce un flujo secundario superficial que es menor al flujo principal (basal), por lo que no afectan el alcance total del material granular de forma especial. En los fluidos pseudoplásticos la arena presenta un avance en dos fases, en donde el flujo superficial tiene una gran importancia en el desplazamiento final del material, pues al acoplarse al material basal induce un aumento importante de la velocidad, lo que se produce una vez que el esfuerzo de corte pierde su capacidad de soportar al flujo de la zona superior. Este fenómeno se atribuye a la viscosidad, la cual al aumentar en valor nos genera una mayor magnitud en el esfuerzo de corte que se genera al retirar la compuerta, además de generar menores tiempos de sedimentación.

Dentro de las 3 diferencias importantes que existen entre las arenas y los otros materiales granulares utilizados se tiene el hecho de que la arena utilizada es poco uniforme mientras las partículas de acero y de vidrio son muy uniformes. Los otros dos factores que diferencian a las arenas de las otras partículas tienen relación con la forma de estas partículas. Mientras que las arenas presentan una forma irregular las otras partículas son esferas casi perfectas en términos de redondez y esfericidad. Esto genera dos diferencias importantes, la primera sería el roce que presenta la arena con el acrílico y la segunda el contacto partícula – partícula que existe entre materiales granulares esféricos y angulados con variaciones de tamaño.

De los ensayos realizados en acero, se puede destacar que los resultados obtenidos para ellos varían muy poco entre sí al cambiar el fluido ambiente en el cual se desarrolla el colapso. Esto

nos viene a decir que, contrario al caso de la arena, el fluido ambiente tiene poca relevancia en el desarrollo del colapso de material granular. Esta situación, contraria a lo visto anteriormente para las arenas, se puede atribuir a la gran diferencia de densidades existentes entre la arena y el acero, siendo el acero cercano a 3 veces más denso que la arena. Debido a esto, el esfuerzo de corte generado en los fluidos viscosos no es suficientemente grande en magnitud como para generar un impacto en el desarrollo del colapso, pues no es capaz de soportar a las partículas de acero en la superficie de la columna, y generar con esto un flujo secundario. Finalmente, si consideramos las que partículas de vidrio no sufren este fenómeno del flujo secundario, podemos entonces comprender que el peso específico de las partículas no es tan relevante, puesto que la diferencia entre el peso específico de la arena y el peso específico de las partículas de vidrio utilizadas es muy pequeña. Dicho esto, si consideramos las similitudes y diferencias entre los materiales ensayados, se puede decir que es la baja uniformidad de la arena el factor principal que permite que se genere el flujo secundario antes mencionado, puesto que, al ser una arena poco uniforme, presenta mayor interacción entre partículas y deja una menor cantidad de vacío.

En base a todos los análisis realizados para los distintos fluidos ambientes, y en particular al mirar los resultados obtenidos para la relación entre la distancia final del frente y la razón de aspecto, se puede concluir que los factores más relevantes dentro de los parámetros estudiados en este trabajo corresponden a la viscosidad del fluido ambiente y la uniformidad del material granular a colapsar.

# Bibliografía

- 1- Lajaunesse E., Monnier J. B. and Homsy G. M. (2005), Granular slumping on a horizontal surface, *Physics of Fluids* 17, 103302.
- 2- Lube G., Huppert H. E., Sparks R. Stephen, and Freundt A. (2005), Collapses of two-dimensional granular columns, *Physical Review* 72.
- 3- Lube G., Huppert H. E., Sparks R. Stephen, and Freundt A. (2011), Granular column collapses down rough, inclined channels, *Journal of Fluid Mechanics* 675, 347 - 368.
- 4- Lube G., Huppert H. E., Sparks R. Stephen, and Hallworth M. (2004), Axisymmetric collapses of granular columns, *Journal of Fluid Mechanics* 508, 175- 199.
- 5- Mangency-Castelnau A., Bouchut F. Vilotte J. P. (2005), On the use of Saint Venant equations to simulate the spreading of a granular mass, *Journal of Geophysical Research* 110, B09103.
- 6- Meruane C., Tamburrino A. and Roche O. (2010), On the role of the ambient fluid on gravitational granular flow dynamics, *Journal of Fluid Mechanics* 648, 381 - 404.
- 7- Roche O., Attali M., Mangeney A., and Lucas A. (2011), On the run-out distance of geophysical gravitational flows: Insight from fluidized granular collapse experiments, *Earth and Planetary Science Letters* 331, 375 – 385.
- 8- Roche O., Montserrat S., Niño Y. and Tamburrino A. (2008), Experimental observations of water-like behavior of initially fluidized dam break granular flows and their relevance for the propagation of ash-rich pyroclastic flows, *Journal of Geophysical Research* 113.
- 9- Rondon L., Pouliquen O., and Aussillous P. (2011), Granular collapse in a fluid: Role of the initial volume fraction, *Physics of Fluids* 23, 073301.
- 10- Savage S.B, Babaeib M.H, Dabros T. (2014), Modeling gravitational collapse of rectangular granular piles in air and water, *Mechanics Research Communications* 56, 1 – 10.