

Dinámica del proceso erosivo provocado por un jet plano vertical sobre un lecho de material granular

Mariela Bottelli⁽¹⁾, Marcelo Piva⁽²⁾, Roman Martino⁽²⁾, Agnes Paterson⁽¹⁾

(1) Departamento de Hidráulica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires.

(2) Grupo de Medios Porosos, Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires.

E-mail: mpiva@fi.uba.ar

RESUMEN: En este trabajo se investiga experimentalmente la acción erosiva de un jet o chorro hidrodinámico que penetra desde abajo hacia la superficie de un lecho formado por material no consolidado. En particular, se estudia la condición crítica para la cual el jet produce una fuerza de arrastre tal que logra la fluidización del lecho. Se presentan curvas que relacionan el caudal y la profundidad de la capa de sedimento en la condición de fluidización, para distintos diámetros de los granos de sedimento. Se presentan los resultados preliminares de un estudio sobre la influencia de la estratificación.

INTRODUCCIÓN

El fenómeno de un jet incidiendo verticalmente desde abajo en una capa de material granular aparece ligado a variados problemas prácticos y fundamentales, entre los que pueden citarse como ejemplos la rotura o pinchadura de conductos subterráneos a presión, la degradación de terreno útil debido a problemas de sifonaje o la degradación de terreno debido al desplazamiento ascendente de aguas (aguas de surgencia). Cuando en estas instancias se supera una condición de presión crítica, se observa un desplazamiento macroscópico del terreno seguido de una disminución dramática en la resistencia hidráulica del mismo. La licuación del terreno que se produce en estas condiciones se conoce con el nombre de fluidización. Previo a la ocurrencia de este fenómeno, el sistema es regido por las leyes de Darcy, donde el caudal es proporcional al gradiente de presiones. Generalmente, en situaciones naturales es el gradiente de presiones el que dirige el fenómeno, siendo el caudal una cantidad dependiente, que varía de acuerdo al estado de permeabilidad del suelo. En condiciones de laboratorio suelen invertirse los términos ya que el caudal es una magnitud más sencilla de controlar y puede ser convertida en la variable independiente. Esto sucede en el presente experimento donde el caudal que atraviesa el suelo controla un jet que emerge verticalmente de una ranura rectangular sobre la que se ha depositado una capa de sedimento de espesor variable.

En estas condiciones, se ha observado que para caudales menores al de fluidización, el flujo se estructura de un modo específico, dividiendo al lecho en dos zonas con dinámicas muy diferentes. Por un lado una zona cercana a la salida del chorro, donde las velocidades del flujo son elevadas. Allí la presión ejercida por el

chorro sobre el lecho produce un desplazamiento vertical de granos que aumenta el volumen libre disponible. En esa zona se genera una recirculación de fluido muy intensa con una frontera demarcada por la presencia de granos móviles y donde la fricción es importante. Por otro lado una zona externa de flujo radial al interior del lecho permeable, que debido a su baja velocidad no es capaz de mover granos y que por lo tanto puede modelizarse (en primera aproximación) como un flujo de Darcy.

Conforme se aumenta el caudal, la recirculación crece gradualmente y una vez alcanzada la condición umbral, la permeabilidad del suelo aumenta dramáticamente produciéndose una “canalización” o fluidización del suelo, cuya manifestación es la formación de un “cono” con vértice en el jet y que se extiende hasta la superficie del lecho granular. La frontera del cono de fluidización es difusa, y separa el exterior, formado por el lecho fijo y el interior, con granos en movimiento ascendente y descendente.

En este trabajo, se propone un estudio cuantitativo del proceso de fluidización por efecto del jet en condiciones controladas de caudal y parámetros que definen a lecho (espesor de la capa, tamaño de grano, etc). Para este objetivo se diseñó y construyó un dispositivo experimental de paredes transparentes en geometría 2D que facilita la visualización del fenómeno y la determinación de la dinámica del proceso a partir del tratamiento de imágenes. Se presentan los resultados de los primeros ensayos realizados sobre la evolución espacio-temporal de la capa de sedimento.

DISPOSITIVO EXPERIMENTAL Y METODOLOGÍA

El dispositivo experimental utilizado consta de un canal estrecho de paredes de vidrio y separadores de acrílico, de pequeñas dimensiones: 60 cm de largo, 2 cm de ancho y 60 cm de alto (ver Figura 1).

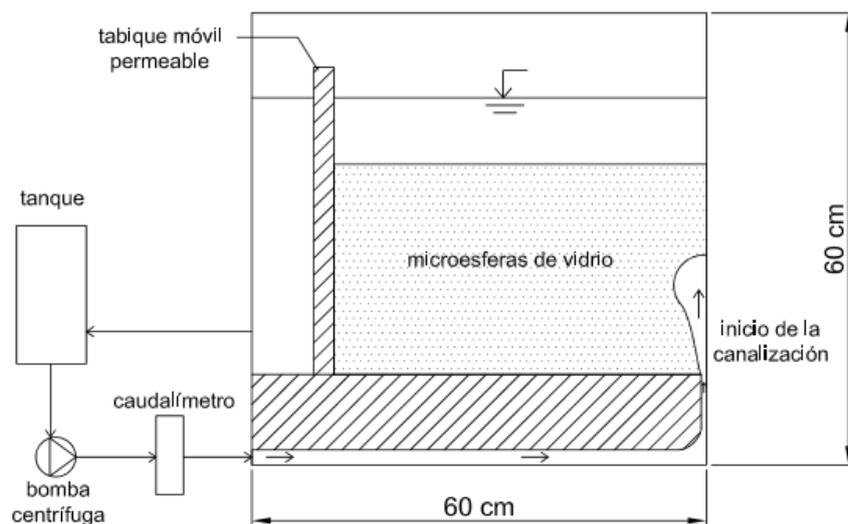


Figura 1.- Esquema frontal del dispositivo experimental

El agua se pone en circulación por medio de una bomba centrífuga que la impulsa a través de un circuito cerrado a superficie libre, desde un tanque de almacenamiento a través de una cañería de PVC que dispone de varias válvulas esclusas para el control del caudal. El fluido ingresa por un conducto en la parte inferior de la celda que presenta una curva a 90° y un afinamiento diseñado para generar el jet de pared. La boca de salida es una ranura vertical en el extremo derecho de la celda de 1mm de apertura y del ancho de la propia celda.

Como sedimento granular se utilizan microesferas de vidrio de diámetro uniforme que van de 1mm a 4mm.

En un experimento típico se evalúa la erosión interna del suelo por inspección visual directa dado que las paredes de la celda son transparentes.

Se realizaron experiencias para distintos diámetros y espesores de capa de sedimento de modo de obtener el caudal de fluidización y la evolución de la altura del vórtice (inicio de la canalización) para cada caso. Cada experiencia se inicia con un caudal nulo que se incrementa gradualmente a razón de $\Delta Q = 0.5 \text{ lpm}$ aproximadamente, manteniéndolo constante durante 3 minutos. Este proceso se repite hasta alcanzar la fluidización local del lecho, registrándose el caudal y la altura del vórtice (h_v) en cada etapa.

La Figura 2 muestra la configuración del jet para un caudal menor al de fluidización, Q_{fl} , y la evolución que se desencadena al alcanzarse Q_{fl} , para un diámetro de sedimento $d_s = 1.2 \text{ mm}$ y un espesor de capa $h_s = 16.8 \text{ cm}$.

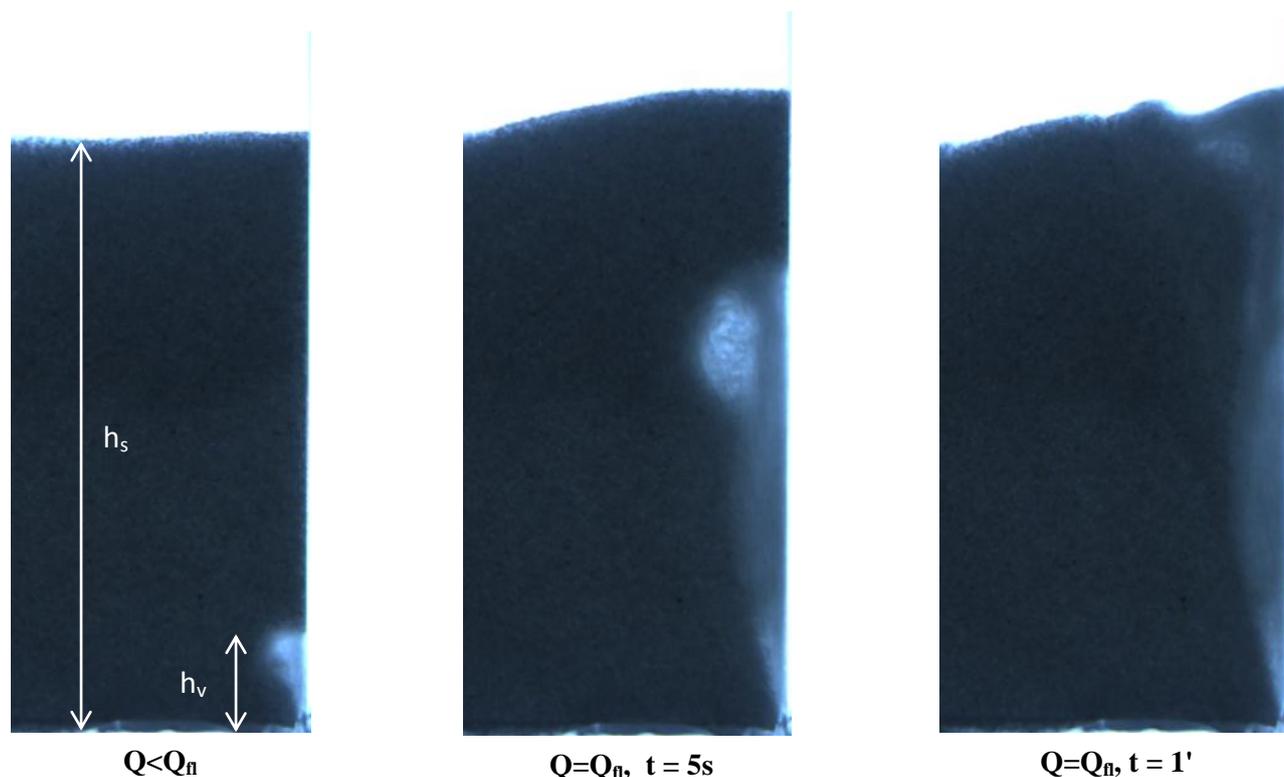


Figura 2.- Secuencia fotográfica que muestra el crecimiento del vórtice hasta la fluidización del lecho

En las experiencias, se varió el diámetro de las partículas d_s , de $d_s = 1.0\text{mm}$ a $d_s = 4.0\text{mm}$, y la profundidad de la capa de sedimento, h_s , en el rango $2\text{cm} < h_s < 35\text{cm}$. En la Tabla 1 se resumen las condiciones ensayadas.

Tabla 1.- Configuraciones ensayadas

	d_s [mm]			
	1.0	1.2	2.0	4.0
Espesor de capa de sedimento ensayadas, h_v [cm]	7.5	9	4	2
	8.7	10	5	2.8
	10	11	5.8	3.5
	11.2	11.4	7	4.5
	12.5	12.5	8	5
	13.3	13.5	8.7	5.6
	14.8	14	10	6.5
	16	15.7	11.2	6.6
	17.5	16.8	12	7.2
	19	18.5	13.1	8.5
	20.2	20	14	9.7
	23.5	21.5	13.8	10.9
	25.9	18	14.5	12
	27.1	20	15.5	13.5
	28.2	21	16.8	
	29.5	19.5	17.4	
	30.6	20.4	18.4	
	32.5	21.3	19.4	
	33.4	22.5	20.5	
	34.7	23.5	21.2	
	24.4	22.2		
	25.5			

A modo de ejemplo, se presenta la tabla de valores obtenida para un diámetro de sedimento $d_s = 1.2\text{mm}$ y un espesor $h_s = 20.4\text{cm}$ (ver Tabla 2). En este ensayo se aumentó gradualmente el caudal observándose la formación incipiente de un vórtice para un caudal $Q = 1.60\text{lpm}$. En estas condiciones el tamaño del vórtice, definido como la altura del mismo medida desde la boca de salida del jet hasta el punto superior fue de $h_v = 0.80\text{cm}$. A continuación se incrementó el caudal según el procedimiento ya descrito hasta alcanzar el valor $Q = 2.80\text{lpm}$, observándose que la altura de vórtice aumento a $h_v = 1.6\text{cm}$. Finalmente se procedió con el aumento gradual del caudal, hasta el inicio de la fluidización que ocurrió para $Q_{fl} = 3.50\text{lpm}$. En ese momento la altura de vórtice coincide con el espesor de la capa de sedimento ensayada, es decir $h_v(Q_{fl}) = h_s$.

Tabla 2.- Caudales y tamaño del vórtice para $h_s = 20.4\text{cm}$ ($d_s = 1.2\text{mm}$)

	Q [lpm]	h_v [cm]
	1.6	0.80
	2.80	1.6
$Q_{fl} =$	3.50	20.4

RESULTADOS

Los caudales de fluidización obtenidos para los distintos diámetros y espesores de capa de sedimento fueron volcados en la Figura 3.

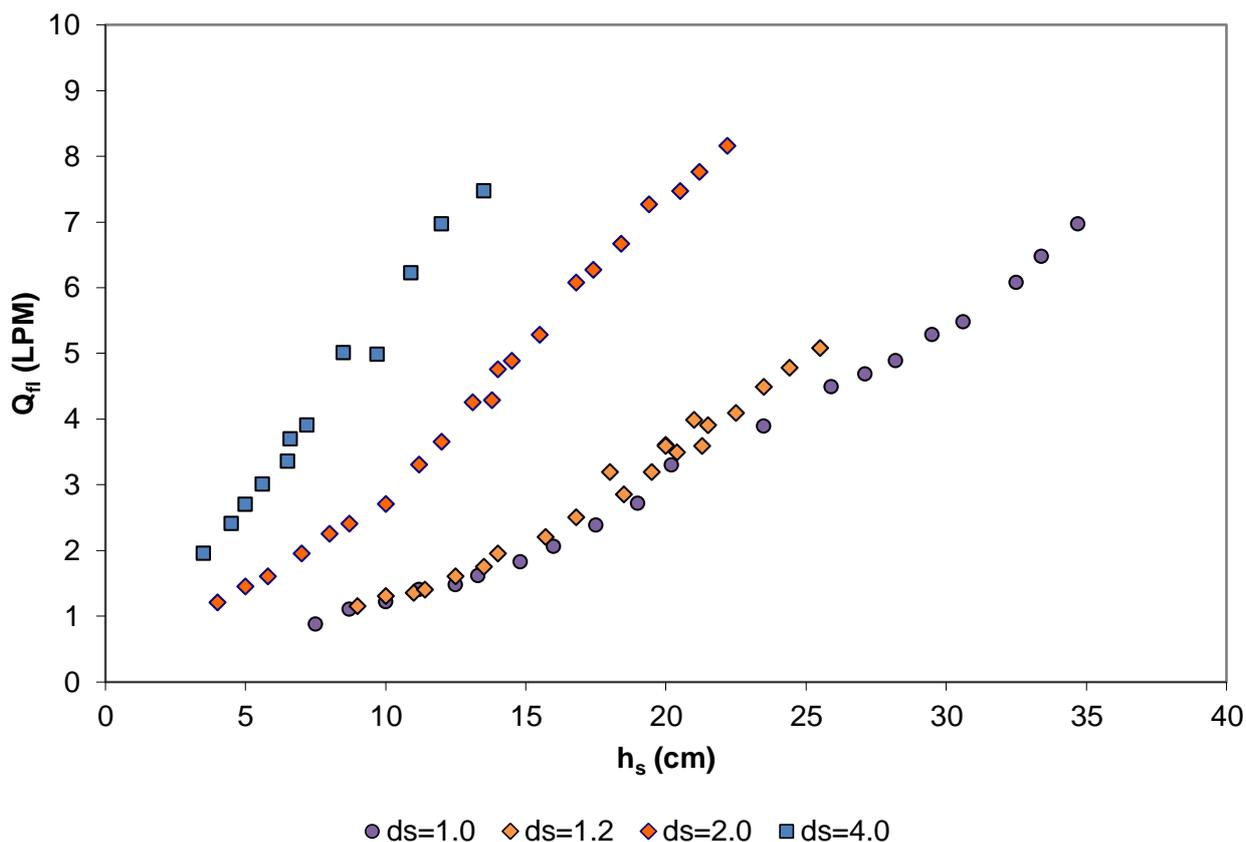


Figura 3.- Caudal de fluidización (Q_{fl}) vs. espesor de la capa de sedimento (h_s) para distintas granulometrías (d_s)

Se observa que, para un diámetro dado de sedimento, el caudal de fluidización aumenta con el espesor de la capa. Estos resultados difieren sensiblemente del correspondiente a experimentos de fluidización en tubos granulares donde el caudal de fluidización es independiente del espesor de la capa (R. Shankar Subramnian, 2013), mostrando la fuerte influencia que tiene la distribución inhomogénea de velocidad en el medio poroso dada por la inyección puntual del jet.

Por otro lado para una altura de capa fija, el caudal de fluidización aumenta sensiblemente con el diámetro del sedimento. Estas observaciones sugieren una forma sencilla de introducir el diámetro del sedimento en la construcción de una variable, que incluya la influencia de este parámetro en el fenómeno

En efecto la Figura 4 muestra que cuando se utiliza la variable $Y=h_s d_s$, los datos se agrupan alrededor de una curva única.

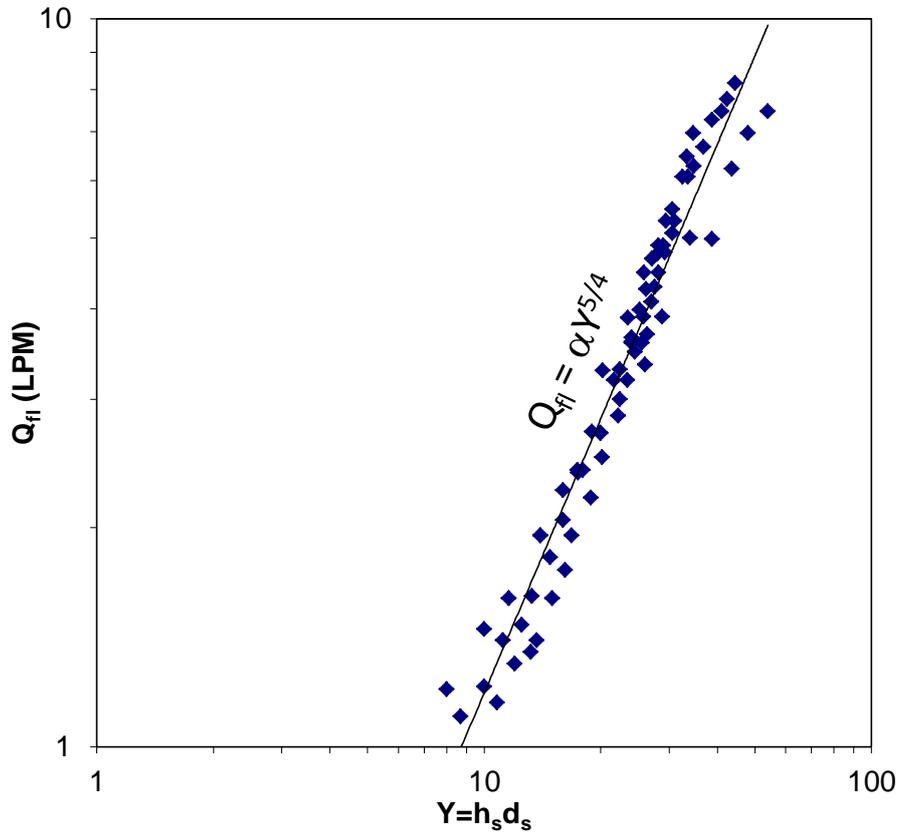


Figura 4.- Resultados obtenidos usando la expresión propuesta para el eje horizontal

La representación doble logarítmica permite deducir que el comportamiento es de tipo ley de potencia con la expresión:

$$Q_{fl}(h_s, d_s) = 0.664 * (d_s * h_s)^{\frac{5}{4}} \quad (1)$$

Por otro lado, en cuanto a la evolución de la altura del vórtice para cada ensayo, las Figuras 5 y 6 presentan los resultados obtenidos para los diámetros de sedimento de 1.0mm y 2.0mm respectivamente. En las mismas, cada línea representa un ensayo distinto para valores de d_s y h_s dados.

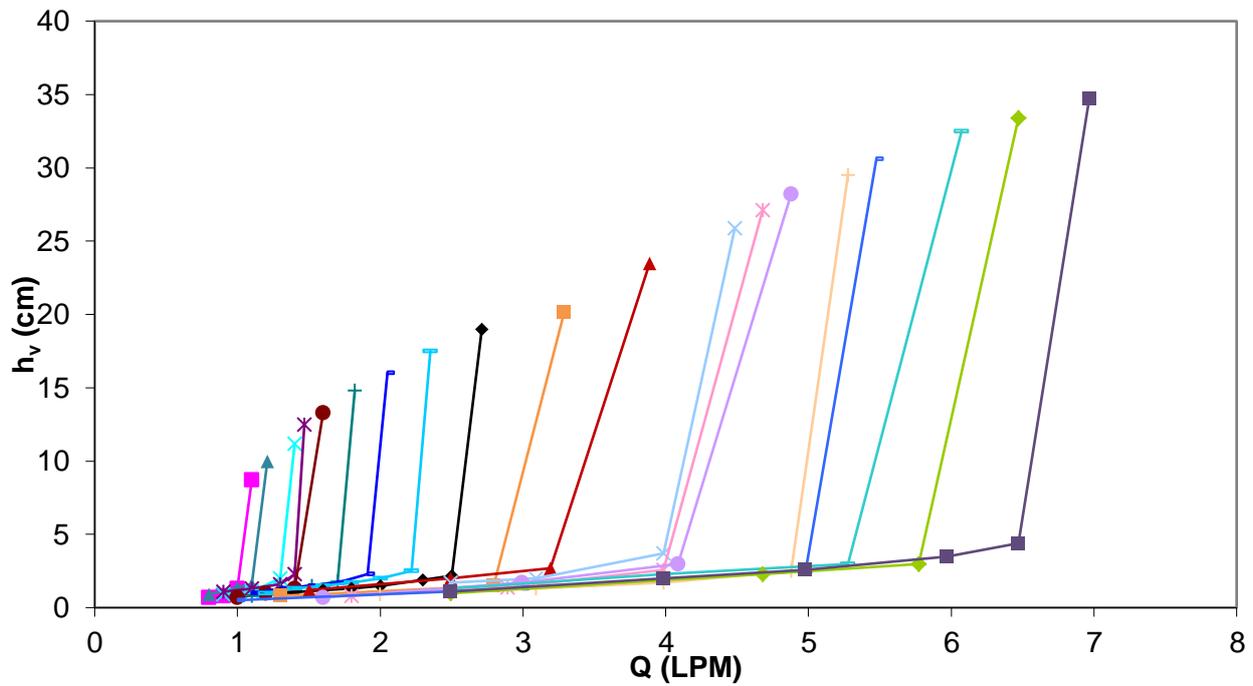


Figura 5.- Evolución de la altura del vórtice para un diámetro de sedimento de 1.0mm

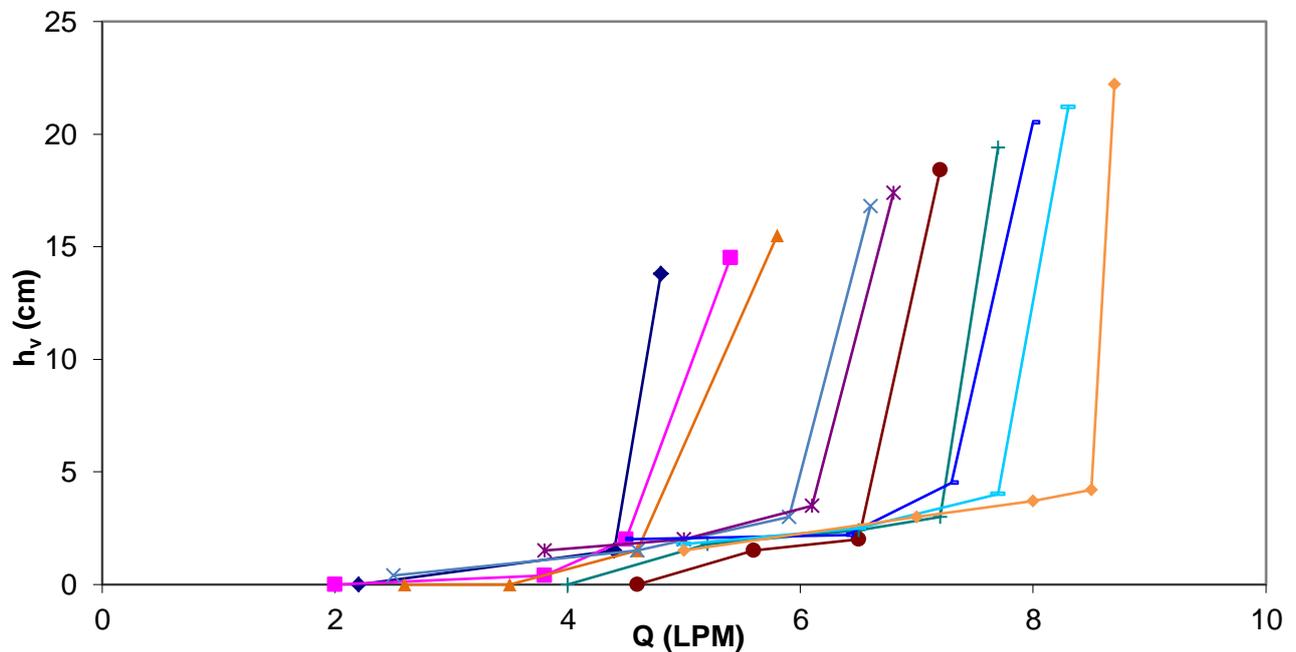


Figura 6.- Evolución de la altura del vórtice para un diámetro de sedimento de 2.0mm

En trabajos de investigación recientes (Thaha *et al.*, 2013) se ha considerado como una variable relevante a la relación $R = h_{vmax} / h_s$, definida como el cociente entre la altura de vórtice máxima previa a la fluidización y el espesor de la capa de sedimento, para una dada granulometría. La relación entre R y las variables relevantes de fenómeno no es del todo clara ya que se ha encontrado que presenta cierta dispersión cuando se analiza en términos del caudal Q o del espesor total de la capa de sedimentos. Por este motivo, para analizar la influencia del tamaño del grano hemos considerado, $\langle R \rangle$ el valor promedio de R sobre caudales y

espesores y su dispersión estándar. La Tabla 3 presenta los valores obtenidos para los dos diámetros de sedimento ensayados.

Tabla 3.- Relación altura de vórtice máxima vs. espesor de capa de sedimento

	<R>	Desvío Estándar
$d_s = 2\text{mm}$	16%	4%
$d_s = 1\text{mm}$	12%	3%

Puede observarse que en promedio la relación de la altura máxima del vórtice con la altura de la capa es menor al 20% para los dos diámetros. Este resultado contrasta con el valor del 50% reportado en la literatura (Thaha et al., 2013) en experimentos de fluidización de suelos por jet puntuales. La diferencia se atribuye a la influencia de las paredes laterales que confinan al jet impidiendo que pierda intensidad por dispersión lateral. Actualmente se investiga este fenómeno en experimentos con grado de confinamiento variable.

CONCLUSIONES

En este trabajo se han presentado los resultados de un estudio preliminar sobre el problema de la fluidización de un material granular por un jet vertical que incide sobre el lecho desde abajo. La configuración planteada describe situaciones de sifonaje en ámbitos donde el medio está fuertemente confinado lateralmente. Por el momento se han realizado ensayos para encontrar el caudal de fluidización en función del espesor de la capa de sedimentos y el tamaño del grano. Se ha podido construir una expresión que brinda el caudal de fluidización para un diámetro de sedimento y espesor de capa dados.

Un parámetro que según estudios citados resulta crítico a la hora de caracterizar el fenómeno de fluidización es la altura o tamaño del vórtice, h_v . En particular resulta importante la relación entre el tamaño del vórtice y la altura total de la capa. Los ensayos realizados muestran que esta relación es relativamente más pequeña que la reportada en otros estudios. Actualmente se está analizando la posibilidad de que este fenómeno se deba al fuerte confinamiento lateral impuesto al jet.

El estudio apunta al análisis del sifonaje en suelos estratificados, problema este más vinculado a situaciones de interés práctico para la ingeniería. Resulta de interés estudiar cómo se ven afectados los umbrales de fluidización en las condiciones de un suelo estratificado. En particular de un suelo multicapa, formado por varias capas constituidos por partículas de distintos diámetros.

En este sentido, se presenta el resultado de un ensayo preliminar, donde se han dispuesto dos capas formadas por microesferas de $d_s = 1.0\text{mm}$ (abajo) y $d_s = 4.0\text{mm}$ (arriba) respectivamente. El caudal de fluidización obtenido resultó muy superior al correspondiente al caso de no tenerse la capa superior de mayor diámetro. Asimismo una vez superado el umbral se observó una violenta reestructuración del sistema que induce la

separación de los dos suelos (ver Figura 7). El tamaño de la zona afectada depende de los espesores de las capas y del caudal.

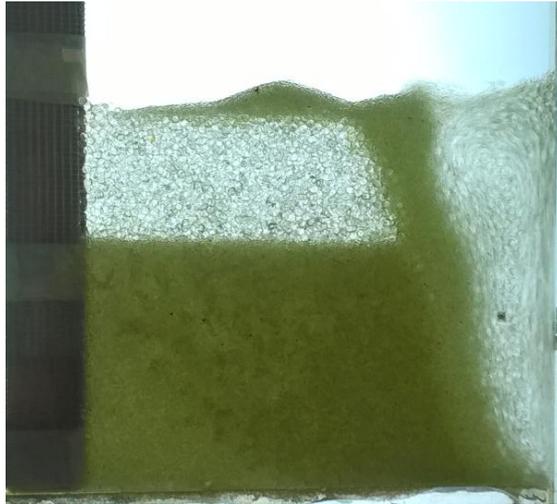


Figura 7.- Configuración obtenida luego de haberse alcanzado el Q_n . En color verde se observa el suelo de menor diámetro y en translúcido el de mayor.

Se pretende continuar el estudio de este fenómeno con ensayos que exploren la influencia de la estratificación. Debido al diseño del experimento, que permite una visualización directa del fenómeno, se estudiará, mediante tratamiento de imágenes, el fenómeno de separación de granulares provocado por el jet vertical.

REFERENCIAS - BIBLIOGRAFÍA

M. Arsyad Thaha, Radiana Triatmadja y A. Idha Dwipuspita, 2013. *The Hydraulic Behavior of Vertical Jet Sediment Bed Fluidization from the Vortex Growth Point of View*, Journal of Hydraulic Engineering.

R. Shankar Subramnian, 2013. *Flow through Packed and Fluidized Beds*. Department of Chemical and Biomolecular Engineering, Clarkson University.