

# Simulación CFD-DEM de un Clasificador de Polvo de Flujo Cruzado

**Resumen:** El clasificador de polvo de flujo cruzado es un equipo de clasificación que trabaja por vía seca. El uso de este tipo de dispositivos está siendo evaluado para reemplazar los métodos húmedos de clasificación en la producción de arena de trituración. Una manera de entender el mecanismo de clasificación dentro del equipo es a través de simulación numérica. En éste trabajo se simula el proceso de clasificación de polvo mediante fluidodinámica computacional (CFD). La interacción entre partículas es modelada mediante un método de elementos discretos (DEM). Las respuestas obtenidas por simulación se comparan con resultados experimentales publicados obteniéndose una muy buena concordancia.

**Palabras Claves:** CFD-DEM; Clasificación de Polvo; Arenas de Trituración; Simulación.

**Abstract:** The cross-flow air classifier is a dry process device. The use of such separators is being evaluated to replace the wet classification methods in the production of manufactured sand. One method to understand the classification mechanism inside the equipment is by numerical simulation. In this work, the powder classification process is simulated by computational fluid dynamics (CFD). The particle-particle interaction is modeled by a discrete element method (DEM). The responses obtained by simulation are compared with published experimental data and the results showed a very good agreement.

**Keywords:** CFD-DEM; Dust Classification; Manufactured Sands; Simulation.

**Horacio A. Petit, Mirta R. Barbosa**

Cificen-Conicet, Pinto 339, Tandil, Argentina.

Fio-Unicen, Avda. Del Valle 5737, Olavarría, Argentina.

Mail: hpetit@fio.unicen.edu.ar

## INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Los agregados finos para la producción de hormigón han sido conformados históricamente por arenas naturales extraídas de lechos de ríos y/o depósitos naturales. Sin embargo estas fuentes están en extinción o su explotación requiere de costos cada vez más elevados. Una alternativa para la producción de agregados finos es el uso de arenas de trituración para reemplazar a las arenas naturales, Pettingell (2008), Morrow (2011).

La distribución de tamaño de partículas (DT) de las arenas de trituración hace que se requiera de un tratamiento previo antes su utilización como agregado fino. El principal problema es que estas arenas presentan un exceso de polvo (partículas con tamaño menor a 75  $\mu\text{m}$ ). Además, la forma de las partículas de las arenas trituradas son angulares mientras que las de las naturales son redondeadas. Una manera de corregir la forma de las partículas en las arenas trituradas es mediante molienda, pero esto genera un mayor contenido de polvo, Kari et. al. (2014), Cepuritis et. al (2015).

El método de eliminación de polvo en arenas de trituración más usado en la actualidad es el lavado con agua. El proceso de lavado elimina el polvo de manera efectiva pero como consecuencia se generan problemas como el tratamiento y secado del lodo efluente. Además, el proceso requiere de una alta disponibilidad de agua que no es recuperada completamente. Debido a estos problemas el proceso de lavado es cada vez menos aplicado y se lo considera dañino para el medio ambiente, Pettingell (2008), Kari et al. (2014).

Una alternativa al proceso de lavado es la clasificación por vía seca o clasificación por aire. Se basa en usar las fuerzas de gravedad, centrífugas y el arrastre del aire sobre las partículas para clasificarlas por tamaño, Shapiro y Galperín (2005). Esta tecnología

permite controlar el tamaño de partícula en los productos así como también tener un control en la polución que se genera en industrias que trabajan con material particulado fino. En los últimos años se han desarrollado distintos tipos de clasificadores algunos de los cuales son aplicados a la industria de agregados, Johansson y Evertsson (2012), Johansson y Evertsson (2014), Li et al. (2015).

Uno de los separadores capaces de controlar la cantidad de polvo en las arenas de trituración es el separador de flujo cruzado. El material a clasificar ingresa por la parte superior del clasificador a través de una tolva de dosificación. Al ingresar a la cámara, un chorro de aire a flujo cruzado separa las partículas y las clasifica por tamaños, Wang et al. (2001). Una de las ventajas de éste equipo es que el material puede ser clasificado en más de una fracción con un moderado consumo de energía.

Una manera de poder visualizar y comprender el mecanismo de clasificación dentro del equipo es mediante la fluidodinámica computacional o CFD (Computational Fluid Dynamics). Esta herramienta resuelve las ecuaciones que modelan el comportamiento de los fluidos mediante una discretización de las ecuaciones diferenciales en derivadas parciales y de modelos de turbulencia específicos para cada sistema. Otra herramienta utilizada para la simulación de flujos bifásicos el método de elementos discretos o DEM (Discrete Element Method). Este método modela la interacción entre partículas. La combinación de las técnicas de CFD-DEM hacen posible la simulación de flujos bifásicos complejos dentro de clasificadores de polvo, haciendo posible de observar y comprender el mecanismo de clasificación, Traoré et al. (2014), Zhou et al. (2014), Alobaid et al. (2014).

El objetivo de este trabajo es simular el proceso de

clasificación de material particulado dentro de un clasificador de flujo cruzado. Las simulaciones se llevan a cabo mediante las técnicas combinadas de CFD-DEM. Las respuestas obtenidas se validan con datos experimentales de la literatura, Wang et al. (2001). Los resultados obtenidos se analizan para poder comprender el mecanismo de clasificación dentro del equipo.

## METODOLOGÍA

### Descripción del Clasificador de Flujo Cruzado

Un esquema del clasificador de flujo cruzado puede verse en la Figura 1. El material sólido a clasificar ingresa por la parte superior a través de una tolva de dosificación (Punto 1). Una vez dentro de la cámara de clasificación, las partículas son interceptadas por un chorro de aire proveniente de una hendidija (Punto 2). La corriente de aire a flujo cruzado transporta las partículas describiendo diferentes trayectorias dependiendo de las fuerzas que actúen sobre ellas. El flujo de aire escapa de la cámara por un tubo de salida (Punto 3). Las partículas son separadas en tres fracciones mediante los deflectores de separación DS1 y DS2 (Punto 4). Las partículas más grandes son afectadas por la gravedad y caen en la tolva de colección F1 (Punto 5). Las partículas más finas son más afectadas por el arrastre del aire y se colectan en las tolvas F2 y F3. Es posible que algunas de las partículas de polvo escapen con el aire por el tubo de salida. El clasificador consta de guías para llevar el flujo de aire hasta el tubo de salida (Punto 6). Hay una pequeña abertura entre los deflectores secundarios y la pared del clasificador que permite la colección de las partículas más finas en F3, (Punto 7). Esta abertura no es tomada en cuenta para las simulaciones.

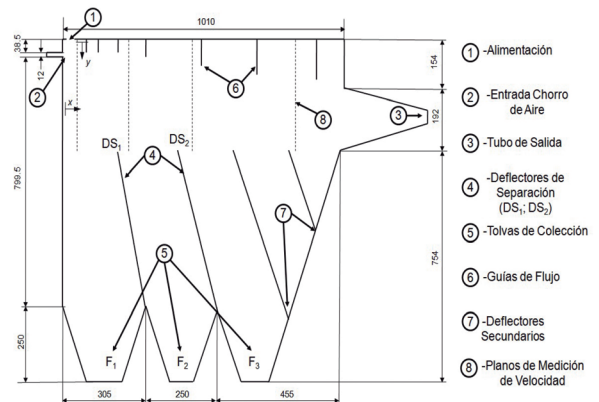


Figura 1: Esquema del clasificador de flujo cruzado, Wang et. al (2001). Unidades en mm.

### Descripción del Proceso Experimental

Trabajos disponibles en literatura reportan datos experimentales referidos a la clasificación de esferas de vidrio de densidad 2650 Kg/m<sup>3</sup> y un rango de tamaños entre 0.05 a 1.1 mm, Wang et al. (2001), von Hafenbradt et al. (1997). El rango de velocidades entre los cuáles se realizó la clasificación es de 8 a 12 m/s y un caudal de sólidos de 0.1 a 4.5 Kg/m<sup>3</sup>. También se informa la velocidad del flujo medida en planos ubicados a diferentes distancias de la entrada de aire, (Véase Figura 1). La granulometría de la alimentación es conocida, así como también la de las fracciones colectadas en las distintas tolvas.

### Descripción del Proceso de Simulación

Las simulaciones se llevaron a cabo mediante el método Euleriano-Lagrangiano. El aire se trató como una fase continua y su comportamiento está modelado por las leyes de Navier-Stokes y continuidad para flujos incompresibles, Blazek (2001), Tu et al. (2008). El dominio fue simplificado para poder llevar a cabo una simulación en dos dimensiones. Tres mallas de

15000, 35000 y 58000 elementos fueron utilizadas para probar la independencia de la solución. Las mallas fueron creadas por el método multibloque como se ve en la Figura 2. El modelo de turbulencia utilizado fue el del tensor de esfuerzos de Reynolds (RSM), con funciones de pared escalables. Las condiciones de borde impuestas fueron las de velocidad en la entrada (Velocity Inlet) y presión a la salida (Pressure Outlet). Los esquemas numéricos utilizados para la resolución del problema de flujo pueden verse en la Tabla 1.

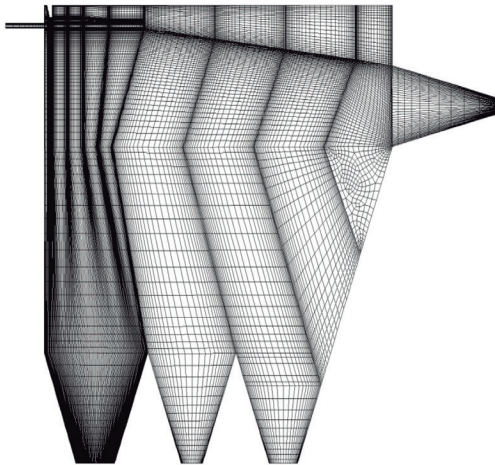


Figura 2: Malla multibloque utilizada para las simulaciones.

| Ecuación de Transporte        | Esquema                |
|-------------------------------|------------------------|
| Algoritmo velocidad-presión   | SIMPLEC                |
| Gradiente                     | LSCB                   |
| Presión                       | Segundo Orden          |
| Momentum                      | Segundo Orden (upwind) |
| Energía cinética turbulenta   | Segundo Orden (upwind) |
| Tasa de disipación turbulenta | Segundo Orden (upwind) |
| Tensores de Reynolds          | Segundo Orden (upwind) |
| Temporal                      | Segundo Orden (upwind) |
| Seguimiento de partículas     | Implícito              |

Tabla 1: Ecuaciones de transporte y esquemas usados para su resolución.

Las simulaciones se realizaron para una velocidad de entrada de aire de 10 m/s y un contenido de polvo

de 1.5 Kg/m<sup>3</sup>. Una enumeración de los casos estudiados se presenta en la Tabla 3 donde se muestran el número de casos, la velocidad de entrada de aire (VIN), el número de elementos de la malla y el caudal de sólidos (C). Los Casos 1 a 3 se utilizaron para conocer la cantidad de elementos mínima para el modelado del flujo de aire dentro del separador. El Caso 4 se utilizó para simular las experiencias publicadas y comparar los resultados de las granulometrías obtenidas.

| Caso | V <sub>IN</sub> (m/s) | Nº Elem. | C (kg/m <sup>3</sup> ) |
|------|-----------------------|----------|------------------------|
| 1    | 10                    | 15000    | --                     |
| 2    | 10                    | 35000    | --                     |
| 3    | 10                    | 58000    | --                     |
| 4    | 10                    | 35000    | 1,5                    |

Tabla 3: Casos de estudio realizados.

### Caracterización del Desempeño del Clasificador

El proceso de clasificación dentro del separador puede ser caracterizado mediante las granulometrías del polvo obtenido en cada tolva. En la Figura 3a se presenta la distribución de tamaño de partícula o distribución acumulada pasante. A esta distribución se la denomina QM(x) y representa la fracción en masa de la población que está compuesta por partículas menores que x, King (2012), Rhodes (2008). La Figura 3b muestra la función de densidad en masa versus el tamaño de partícula. La función de densidad de distribución en masa qM(x) representa la fracción de la población que consiste en partículas con tamaños comprendidos entre x y x+dx. Ambas distribuciones están relacionadas por:

$$q_M(x) = \frac{dQ_M(x)}{dx} \tag{1}$$

La utilidad de la función de densidad es que el máximo de la función coincide con la moda de la distribución, de esta manera es posible caracterizar a la población a través de un solo parámetro.

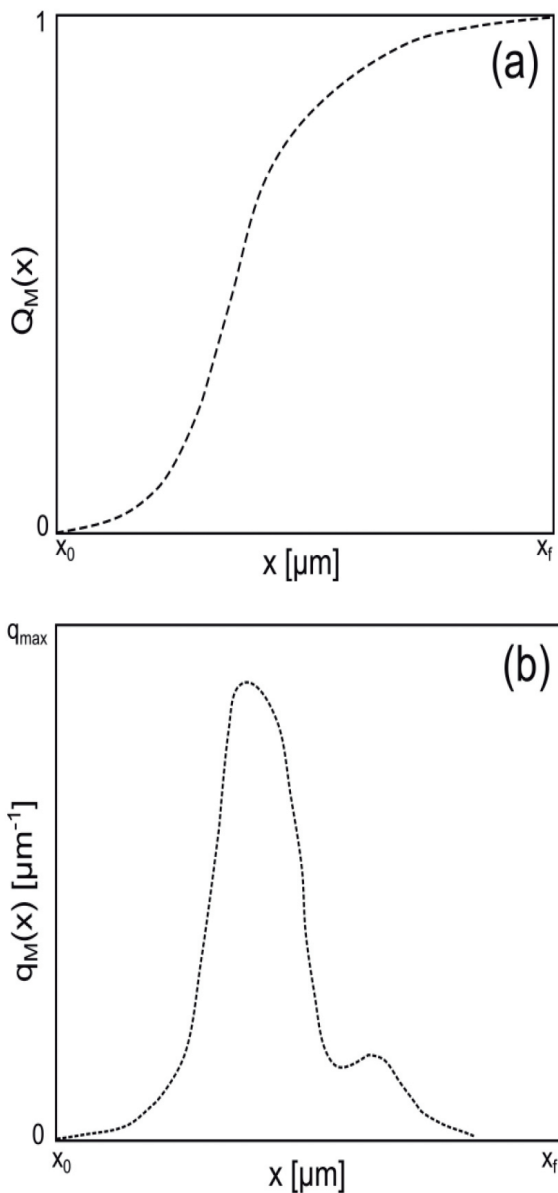
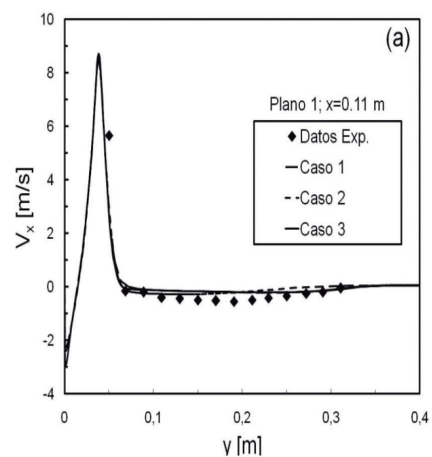


Figura 3: Caracterización de la población: a) Distribución acumulada pasante; b) Función de densidad de distribución.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Independencia de malla y simulación del flujo de aire

La variación de la componente x de la velocidad,  $V_x$ , con la distancia al límite superior del clasificador, y, fue medida experimentalmente en diferentes planos normales al flujo. Los planos están situados a 0.11, 0.31, 0.36 y 0.56 m de la rendija de entrada de aire (Véase Figura 1. Punto 8). En la Figura 4 se presenta la comparación entre los datos experimentales y los resultados de las simulaciones de los Casos 1 a 3. Los resultados de la simulación concuerdan con los datos experimentales. La simulación sobreestima la máxima velocidad en los Planos 1 a 3 y un valor menor para el máximo del Plano 4. Las diferencias entre las predicciones aumenta con la distancia a la hendidura de entrada. Sin embargo, como se ve en las Figuras 4c y 4d, un aumento en la cantidad de elementos de malla no garantiza una mejor aproximación a los resultados experimentales. La comparación de los resultados garantiza que una malla de 35000 elementos como la usada en el Caso 2 es capaz de simular el flujo de aire dentro del separador con un mínimo error y es la seleccionada para las simulaciones siguientes.



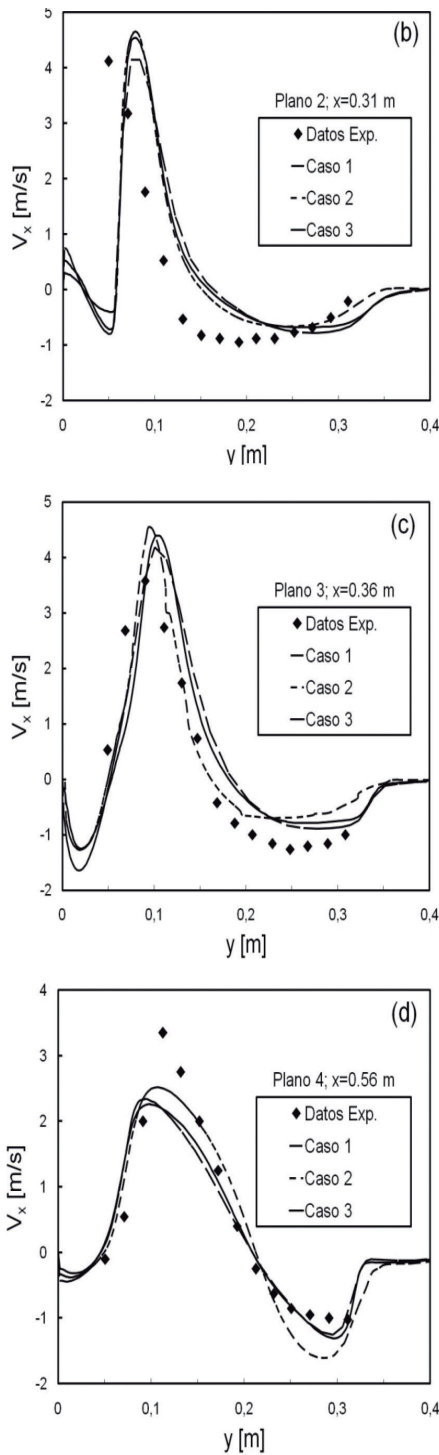


Figura 4: Comparación entre la componente x de la velocidad estimada con la experimental: a) Plano 1; b) Plano 2; c) Plano 3; d) Plano 4 (Véase Figura 1).

La magnitud de la velocidad de flujo para una velocidad de entrada de 10 m/s se muestra en la Figura 5. Se observa claramente la trayectoria del flujo y las zonas de máxima y mínima velocidad del aire. También se observan zonas de recirculación o remolinos entre las guías de flujo. Este fenómeno ocurre en distintos tipos de clasificadores y afectan al proceso de clasificación, Wang et al. (2001), Li et al. (2015). Los remolinos en las zonas de recirculación captan las partículas más finas y las transportan corriente arriba influyendo en la selectividad de la clasificación.

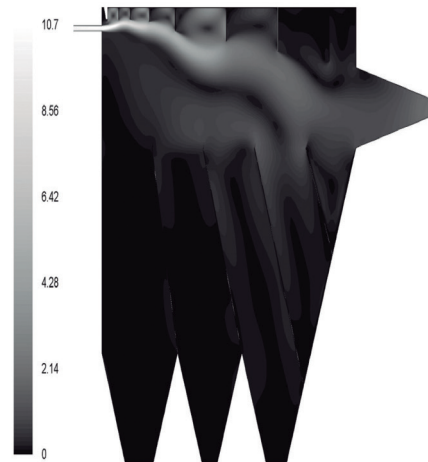


Figura 5: Representación de la magnitud de la velocidad (m/s) dentro del clasificador para una velocidad de entrada de 10 m/s.

### Comparación con Datos Granulométricos

En la Figura 6 se presenta una descripción gráfica de la simulación del proceso de clasificación. Se muestra la posición instantánea de las partículas inyectadas al clasificador para el Caso 4 luego de terminada la inyección. El tamaño de las partículas se describe mediante una escala de colores. Se observa que las partículas de mayor tamaño, entre 700 y 1100  $\mu\text{m}$  se asientan en la tolva de colección F1. Partículas con tamaños entre 700 y 500  $\mu\text{m}$  en F2 y las menores que 500  $\mu\text{m}$  alcanzan la

tolva F3. Se aprecia la influencia de los remolinos que se producen en las zonas de recirculación. Una parte de las partículas de polvo, de tamaño menor a  $75 \mu\text{m}$ , son atrapadas en los remolinos y se dispersan dentro de la cámara. Como consecuencia, partículas de este tamaño pueden encontrarse en las tolvas F1 y F2.

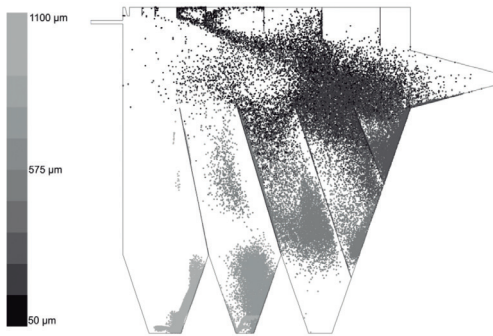


Figura 6: Posición instantánea de las partículas dentro del clasificador para una velocidad de entrada de 10 m/s.

En la Figura 7 se representan los resultados experimentales y de simulación en términos de la distribución acumulada pasante para los materiales colectados en las diferentes tolvas.

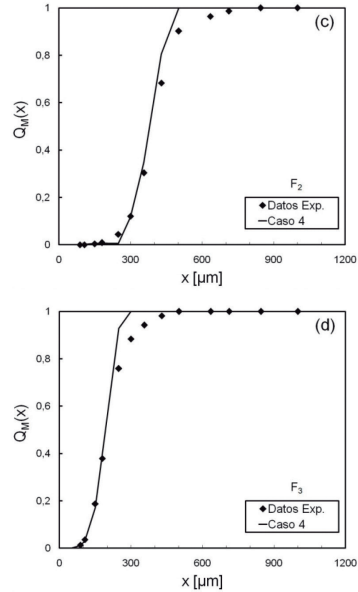
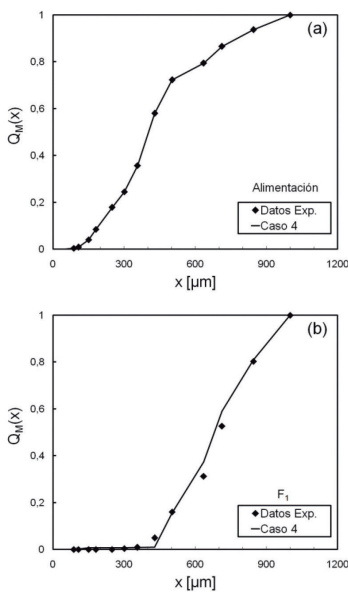


Figura 7: Distribuciones acumuladas pasantes para los materiales colectados en las tolvas a 10 m/s.

La Figura 7a representa la granulometría original usada para los estudios experimentales y la usada para de la simulación. Ambas coinciden totalmente. Las Figuras 7b a 7d representan las distribuciones acumuladas para las distintas tolvas de colección. Se aprecia una muy buena concordancia entre los datos estimados y los experimentales. La granulometría estimada para la tolva F1, (Figura 7b), sobreestima de manera leve la cantidad de partículas en el rango de 500 a 900  $\mu\text{m}$ . El mismo efecto se observa de forma acentuada en las tolvas F2 y F3 a partir de 500 y 300  $\mu\text{m}$  respectivamente. Contrariamente, las simulaciones predicen un menor contenido de partículas en el rango de 400 a 500  $\mu\text{m}$  en F1 y de 200 a 300  $\mu\text{m}$  en F2.

Los resultados del Caso 4 también pueden compararse mediante la función de densidad de distribución presentada en la Figura 8. La Figura 8a presenta los datos correspondientes a la alimentación y las Figuras 8b a 8d los de las tolvas de colección. Las curvas de función de densidad revelan mayores diferencias entre

los datos estimados y los calculados a partir de datos experimentales. La comparación de los resultados de F1 (Figura 8b), confirman la sobreestimación de partículas en el rango de 500 a 900  $\mu\text{m}$ . Sin embargo ambas curvas revelan los máximos para la distribución, uno cerca de los 500  $\mu\text{m}$  y otro cerca de 700  $\mu\text{m}$ . En el caso de F2 (Figura 8c), las distribuciones son muy similares salvo por la diferencia en magnitud y tamaño de partícula donde se encuentran sus máximos. Además, la simulación no estima la presencia de partículas mayores a 600  $\mu\text{m}$  en F2 y 300  $\mu\text{m}$  para F3 (Figuras 8c y 8d).

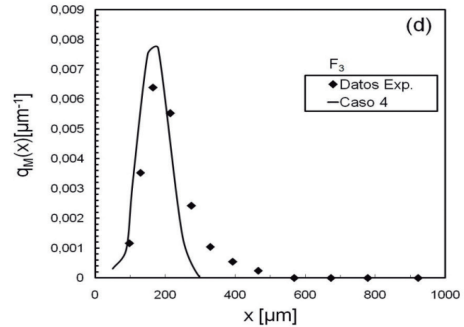
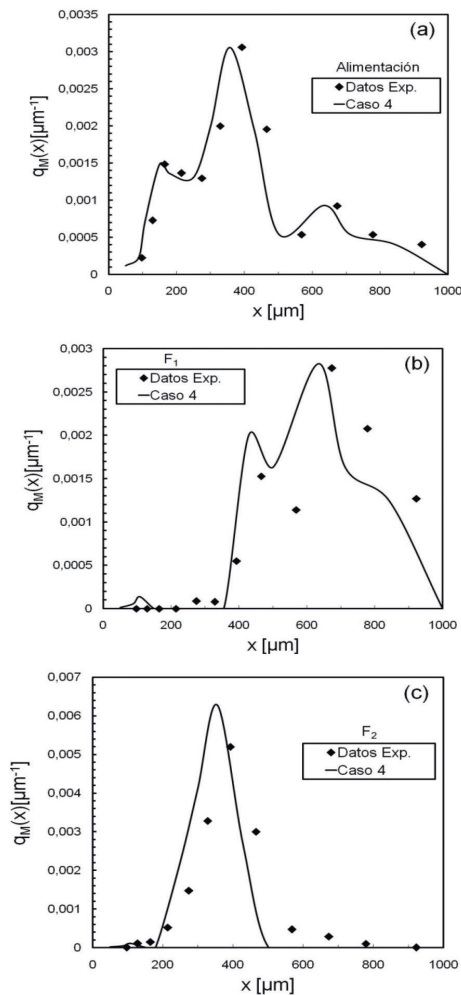


Figura 8: Funciones de densidad para los materiales colectados en las tolvas a 10 m/s.

A pesar de las diferencias mencionadas, los resultados de la simulación del Caso 4 presentan una muy buena descripción de los datos experimentales. Esto valida el uso de la herramienta CFD-DEM para la estimación del comportamiento del clasificador en diferentes condiciones de operación.

## CONCLUSIONES

El uso de las técnicas CFD-DEM aportó importante información sobre el comportamiento del flujo dentro de un clasificador de flujo cruzado.

Una malla de 35000 elementos es suficiente para la correcta representación del flujo de aire dentro del separador. Se encontró muy buena concordancia entre las simulaciones y los resultados de velocidad experimentales.

Las simulaciones revelaron la existencia de zonas de remolinos entre las guías de flujo. Estas zonas afectan el proceso de clasificación.

Se pudo visualizar y comprender el mecanismo de clasificación mediante el uso de la herramienta DEM. Las granulometrías de los materiales colectados en las diferentes tolvas concuerdan con las reportadas mediante métodos experimentales.



## REFERENCIAS

- Pettingell, H. (2008). *An effective dry sand manufacturing process from Japan potential to replace natural sand entirely in concrete*. *Quarry Management Magazine*. 1-6.
- Morrow, D. (2011). *Why Manufactured Sand?*, Metso's customer magazine for the mining and construction industries-results: *Minerals & Aggregates*. 26-27.
- Kari, A. Danielsen, S. Johannes, W. (2014). *Review report on dry and wet classification of filler materials for concrete*. *COIN Project report 52*.
- Cepuritis, R. Jacobsen, S. Onnela, T. (2015). *Sand production with VSI crushing and air classification: Optimizing fines grading for concrete production with micro-proportioning*. *Minerals Engineering*. 78. 1-14.
- Shapiro, M. Galperin, V. (2005). *Air classification of solid particles: a review*. *Pneumatic Conveying and Handling of Particulate Solids*. 44. 279-285.
- Johansson, R. Evertsson, M. (2012). *An empirical study of a gravitational air classifier*. *Physical Separation*. 31. 10-16.
- Johansson, R. Evertsson, M. (2012). *CFD simulation of a gravitational air classifier*. *Computational Modelling*. 33. 20-26.
- Johansson, R. Evertsson, M. (2014). *CFD simulation of a centrifugal air classifier used in the aggregate industry*. *Computational Modeling*. 63. 149-156.
- Li, Y. Zhang, X. Shen, X. Li, H. Gao, K. (2015). *Experiment and simulation study on optimized structure of a gravitational air classifier*. *International Journal of Mineral Processing*. 141. 44-50.
- Wang, Q. M. Melaaen, C. De Silva, S. R. (2001). *Investigation and simulation of a cross-flow air classifier*. *Powder Technology*. 120. 273-280.
- Traoré, P. Laurentie, J.-C. Dascalescu, L. (2014). *An efficient 4 way coupling CFD-DEM model for dense gas-solid particulate flows simulations*. *Computers & Fluids*.
- Zhou, F. Hu, S. Liu, Y. Liu, C. Xia, T. (2014). *CFD-DEM simulation of the pneumatic conveying of fine particles through a horizontal slit*. *Particuology*. 16. 196-205.
- Alobaid, F. Baraki, N. Epple, B. *Investigation into improving the efficiency and accuracy of CFD-DEM simulations*. *Particuology*. 16. 41-53.
- Von Hafenbradl, F. Da Silva, S. Anja, B. (1997). *The Development of a Cross-Flow Air Classifier*, *Postec Newsletter*. 16. 33-34.
- Blazek, J. (2001). *Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications*, Elsevier.
- Tu, J. Yeoh, G. H. Liu, C. (2008). *Computational Fluid Dynamics: A Practical Approach*, Elsevier.
- King, R. P. (2012). *Modeling and Simulation on Mineral Processing Systems. Second Edition*. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration.
- Rhodes, M. (2008). *Introduction to Particle Technology. Second Edition*. John Wiley and Sons.