



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECÁNICA
DE LAS
INGENIERÍAS

FoDAMI

MODELO DEL CHORRO DE AIRE APLICADO A LA CLASIFICACIÓN DE ARENA DE TRITURACIÓN

Horacio A. Petit* y Mirta R. Barbosa

Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires.
Avda. A. del Valle 5737, 7400 - Olavarría, Argentina.

CIFICEN-CONICET.

E-mail: hpetit@fio.unicen.edu.ar, mbarbosa@fio.unicen.edu.ar

RESUMEN

El actual ritmo de construcción demanda gran producción de hormigón. Esta actividad genera como desechos enormes cantidades de arena granítica con gran dispersión de tamaño de partícula. La arena puede ser utilizada como áridos en la fabricación de hormigón si se separan los finos contenidos (diámetro de partícula, $DP < 70 \mu\text{m}$). A su vez, el polvo fino resultante de la separación puede emplearse, en proporciones controladas, como filler del hormigón para mejorar su resistencia [1]. Considerando la gran cantidad de arena a tratar, uno de los separadores más adecuados resulta el denominado "cross-flow" [2]. Este separador consiste en una cámara donde el polvo cae por gravedad y es cruzado por un chorro de aire a gran velocidad.

El tipo, forma y velocidad del chorro condicionan la eficiencia del equipo y la distribución de tamaños de la arena clasificada. Sin embargo, la complejidad y turbulencia del sistema fluidodinámico hacen que los modelos convencionales fallen al predecir los parámetros de flujo [3]. Una alternativa para estudiar el fenómeno del chorro es la Fluidodinámica Computacional (CFD). Esta herramienta permite determinar los parámetros característicos del flujo como velocidades, presiones, y variables propias de la turbulencia como producción de energía turbulenta, disipación y oscilaciones en las velocidades.

En este trabajo se aplica CFD al estudio del flujo en chorro. Las simulaciones realizadas permiten visualizar el flujo en gran detalle. Se pueden observar los perfiles de velocidades, tanto dentro del chorro como en el fluido inmediatamente circundante. Los resultados muestran muy buen acuerdo entre los valores obtenidos a partir de las simulaciones y datos experimentales. Se realiza además un análisis de modelos presentes en la literatura y su aplicación en el diseño de separadores.

Palabras Claves: Separador, Cross-flow, Jet-flow, CFD.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECÁNICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

1. INTRODUCCIÓN

La separación y clasificación de sólidos particulados a partir del flujo bifásico aire-sólido ha despertado gran interés por su presente y potencial aplicación en sistemas industriales. Ejemplos de estos materiales son cerámicos y magnéticos, nuevos tipos de ultra-conductores y tóner para impresoras, entre otros. La eficiencia de los procesos de molienda y la finura del producto están estrechamente relacionadas con los procesos de separación. La necesidad de producir polvos de tamaño de partícula controlado ha impulsado el desarrollo y actual perfeccionamiento de los sistemas de separación. Una problemática típica en la que se utilizan estos separadores es en el aprovechamiento de arena granítica para producir hormigón. Muchos países están perdiendo sus recursos de arenas naturales por extinción o esterilización, lo que lleva a la necesidad de aprovechar arena procesada en reemplazo de arena natural. En Argentina se generan grandes cantidades de arena granítica que actualmente se utiliza en muy baja proporción. Lo anterior se debe a que los productores de hormigón requieren arena con granulometría controlada, situación que no es satisfecha en el caso de arena granítica. Ésta tiene un exceso de material grueso por encima de los 2 mm y un excedente de material fino menor a 75 micrones llamado filler. Para poder ser utilizada la arena debe tener una cantidad menor a 7% de filler en peso ya que estas partículas tienen gran influencia en las propiedades físicas y estructurales del hormigón.

Muchos separadores de polvo aplican fuerzas centrífugas y/o inerciales, la eficiencia de estos depende de parámetros geométricos, parámetros de flujo, turbulencia e interacción de las partículas con el fluido y entre ellas mismas. Por estas razones los separadores de polvo son dispositivos con flujos altamente complejos. El conocimiento del comportamiento fluidodinámico, turbulencia, comportamiento de las partículas, etc., son muy importantes en su diseño. Uno de los dispositivos de mayor uso en la clasificación de polvo es el separador de flujo cruzado o "cross flow". Su funcionamiento consiste en un elemento dosificador de polvo que introduce el material en un flujo de aire a alta velocidad en dirección perpendicular a la del polvo (Figura 1). Como resultado, el material de mayor tamaño sigue una trayectoria influenciada mayoritariamente por la fuerza de gravedad y se acumula en una tolva de recolección en la parte inferior. El polvo fino, más sensible a las corrientes de aire, es arrastrado por el flujo de aire y se colecta en un filtro. La inyección de aire se lleva a cabo a través de un tubo o "nozzle", donde el aire entra con una determinada velocidad desde un espacio con pequeña de sección de flujo a una gran área de sección donde el fluido se encuentra casi estanco. El fenómeno descrito bajo estas características se conoce como flujo en jet, flujo en chorro o "jet flow" [3]. Se considera dentro de los llamados flujos libres y matemáticamente pueden emplearse las ecuaciones de capa límite. Se trata de un flujo bidimensional que presenta un pequeño desplazamiento en la dirección transversal a medida



que avanza en la dirección longitudinal y un importante gradiente de velocidad en la dirección transversal. Este flujo puede ser laminar o turbulento. En ambos casos el chorro arrastra consigo una parte del fluido que lo rodea. En el caso turbulento se caracteriza por generar turbulencia en el medio circundante, la cual crece a lo largo del jet [4-5]. La posibilidad de contar con un buen modelado del flujo que entra al equipo proporciona una herramienta muy valiosa para el diseño del mismo. En el presente trabajo se realizan simulaciones del flujo en chorro mediante volúmenes finitos. Se compara esta respuesta con datos experimentales y se analiza un modelo clásico para este sistema de flujo.

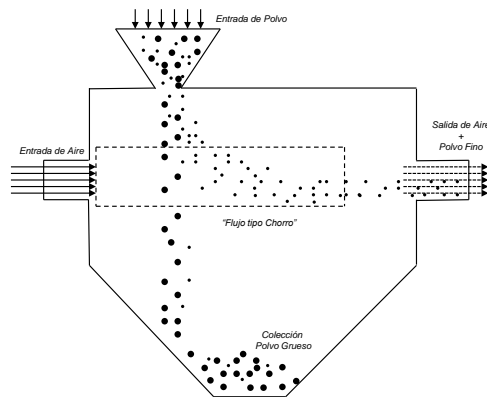


Figura 1. Esquema de un separador de flujo cruzado.

2. DESCRIPCIÓN MATEMÁTICA DEL FLUJO EN CHORRO

Observaciones experimentales indican que en la dirección axial, el flujo puede dividirse en dos partes según su comportamiento [3-4]. En la primera, cercana al orificio y llamada zona de desarrollo la velocidad se mantiene prácticamente constante en el valor de la velocidad de entrada u_0 . Esta zona se conoce como núcleo potencial (Figura 2). En la segunda región, de flujo desarrollado, la turbulencia penetra a lo largo de todo el eje vertical y . La distribución de velocidades horizontales, $u(x, y)$, tiene una forma del tipo gaussiana respecto del eje vertical, en la que la velocidad varía desde un máximo en el centro, $u_m = f(x)$, hasta hacerse nula en los límites del dominio. Esta zona es también conocida como zona de velocidad propia o "selfsimilar" por su característico perfil de velocidades [4]. Si se adimensionaliza la componente x de la velocidad mediante $u^* = u/u_m$ y el eje mediante $y^* = y/b_{1/2}$ se obtiene la forma característica del perfil que se mantiene en toda la zona (Figura 3) [6]. El parámetro $b_{1/2} = y|_{u=u_m/2}$ es la distancia al centro del chorro en la cual la velocidad axial es la mitad de la velocidad máxima [5]. Este tipo de flujo puede ser descrito mediante las ecuaciones de Navier-Stokes y de continuidad. En coordenadas cartesianas y para fluidos incompresibles e isotérmicos se pueden escribir según las ecuaciones (1) y (2) [3,5].



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECÁNICA
DE LAS
INGENIERÍAS

FoDAMI

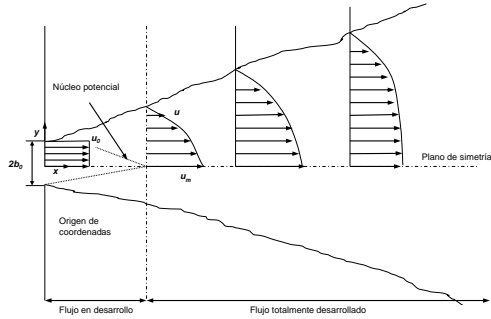


Figura 2. Esquema de flujo en chorro plano.

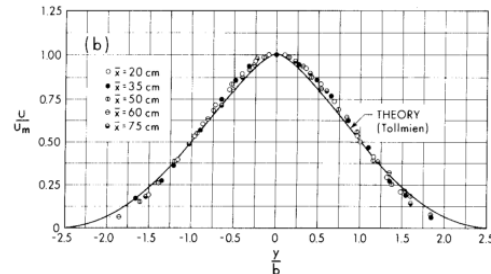


Figura 3. Perfil de velocidades adimensional en la zona de flujo desarrollado.

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_i \partial x_j} - \frac{\partial (u'_i u'_j)}{\partial x_j} \quad (2)$$

En las que $x_1 = x$ es el eje horizontal, $x_2 = y$ es el eje vertical en la dirección de la altura del orificio. Además $\bar{u}_i = u, v$ y $u'_i = u', v'$ son las componentes media y de fluctuación de las velocidades en los ejes x e y respectivamente dadas por la descomposición de la velocidad instantánea [5]:

$$u_i = \bar{u}_i + u'_i \quad (3)$$

La presión media en cualquier punto se indica con \bar{P} , ν y ρ son la viscosidad cinemática y la densidad del fluido, respectivamente. Simplificando los términos y combinando las ecuaciones anteriores, se obtienen las ecuaciones básicas de movimiento para el chorro plano libre [3].

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \tau^{(t)} \quad (4)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (5)$$

donde $\tau^{(t)}$ es el tensor de esfuerzos de Reynolds.



1.1 Soluciones a las ecuaciones de movimiento.

En el presente trabajo se toma la solución de Tollmien para las ecuaciones de movimiento [7]. Esta se obtiene reemplazando el esfuerzo de corte por la ecuación de longitud de mezcla de Prandtl, ecuación (6).

$$\tau^{(t)} = \rho l^2 \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 \quad (6)$$

Utilizando análisis dimensional y la función potencial se llega a una ecuación diferencial que, resuelta numéricamente, permite obtener la ecuación de la velocidad máxima en función de la distancia al orificio del que se eyecta el chorro [3]:

$$\frac{u_m}{u_0} = \frac{d}{\sqrt{x/b_0}} \quad (7)$$

El parámetro d en la ecuación fue validado experimentalmente por Abramovich [8] y tiene un valor $d = 3.78$. La forma característica del perfil de velocidades para la zona de flujo desarrollado esta dada por la ecuación (8).

$$\frac{u}{u_m} = e^{-\bar{a}(y/x)^2} \quad (8)$$

El parámetro experimental tiene un rango de valores de $70.7 < \bar{a} < 75.0$ [3]. El valor usado en este trabajo es el valor medio de ese rango.

2. MODELADO DE FLUJOS TURBULENTOS MEDIANTE CFD

El flujo tipo chorro se puede considerar como transiente, isotérmico, incompresible y altamente turbulento. Las ecuaciones de Navier-Stokes y de continuidad ya descriptas se usan descomponiendo la velocidad en un valor medio y otro fluctuante. El modelo de turbulencia usado es del tensor de esfuerzos de Reynolds o RSTM (Reynolds Stress Turbulence Model). Asume un comportamiento isotrópico de la turbulencia y resuelve las ecuaciones de transporte para cada componente del tensor de esfuerzos turbulento [9]:

$$\tau_{ij} = -\rho \overline{u'_i u'_j} \quad (9)$$

Las ecuaciones de transporte para cada componente están dadas por:

$$\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial t} + \bar{u}_k \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_k} = -\tau_{ik} \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_k} - \tau_{jk} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_k} + \epsilon_{ij} - \prod_{ij} + \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\nu \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_k} + C_{ijk} \right] \quad (10)$$

Para completar la ecuación se requieren modelos para los términos empleados. El primero de ellos es el tensor de disipación que puede ser modelado mediante la ecuación de Kolmogorov [10]:



$$\epsilon_{ij} = 2\mu \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \frac{\partial u'_j}{\partial x_k} \right) = \frac{2}{3} \rho \epsilon \delta_{ij} \quad (11)$$

donde la tasa de disipación escalar se obtiene de una ecuación de transporte:

$$\rho \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} \tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + C_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] \quad (12)$$

$\mu_T = \rho C_\mu k^2 / \epsilon$ es la viscosidad de remolino y $k = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i}$ es la energía cinética turbulenta. En el caso que se requiera el valor de la energía cerca de una frontera, se utiliza la ecuación de transporte:

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \epsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (13)$$

El segundo término que debe ser modelado es el tensor de correlación de la deformación de presión (Pressure-Strain Correlation Tensor):

$$\prod_{ij} = \overline{p' \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u'_j}{\partial x_i} \right)} \quad (14)$$

Este tensor redistribuye la energía cinética turbulenta en los componentes normales del tensor de esfuerzos de Reynolds. El último término es el tensor de transporte turbulento:

$$C_{ijk} = \overline{\rho u'_i u'_j u'_k} + \overline{p' u'_i} \delta_{jk} + \overline{p' u'_j} \delta_{ik} \quad (15)$$

Donde p' es la presión fluctuante y δ es la delta de Kronecker. Los coeficientes usados en estos modelos son $C_{\epsilon 1} = 1.44$, $C_{\epsilon 2} = 1.92$, $\sigma_\epsilon = 1.0$, $C_\mu = 0.09$, $\sigma_k = 0.82$.

2.1 Descripción del dominio, elementos y mado.

En este trabajo se realiza la simulación CFD de un chorro plano libre en condiciones similares a la experiencia de Forthman [6]. El dominio utilizado para la simulación se presenta en la Figura 4. Debido a la simetría del sistema en una de las direcciones principales se optó por utilizar una simulación del tipo 2D. Esto permite ahorrar costo computacional y aún así obtener datos precisos. El borde inferior representa al eje x el cual se considera de simetría para poder realizar la simulación con un menor costo computacional. El flujo de aire ingresa desde la frontera izquierda a 35 m/s por un orificio de altura $b_0 = 1.5 \cdot 10^{-2} \text{ m}$. El flujo es libre en las fronteras derecha y superior. La frontera izquierda y el borde superior del tubo se consideran paredes sólidas lisas. El mado es del tipo mapeado con un total de 8000 elementos cuadrilaterales. Se tuvo especial cuidado en refinar la malla en las zonas donde se encuentran los mayores gradientes de velocidad (Figura 4). El primer nodo tiene una distancia a la pared de $y^+ \sim 15$. Este es un valor estándar requerido para un correcto uso de las funciones de pared escalables (Scalable Wall Functions), para el caso de utilizar mayores distancias, surge la



necesidad de densificar el mallado en la dirección perpendicular a la pared. Simulaciones con mayor número de elementos no condujeron a una mejor resolución del sistema, por lo que las soluciones mostradas se consideran independientes de la malla. La simulación es del tipo transiente con un paso de 5 veces el recomendado por la condición CFL, $\Delta t = 1.10^{-5}$ seg. Se utiliza un método de segundo orden implícito para la discretización temporal. La duración del evento total es de 0.2 segundos donde se considera que el sistema alcanza el estado estacionario. Los perfiles de velocidades mostrados son valores alisados en un rango de tiempo $\Delta t_{al} = 1.10^{-3}$ seg.

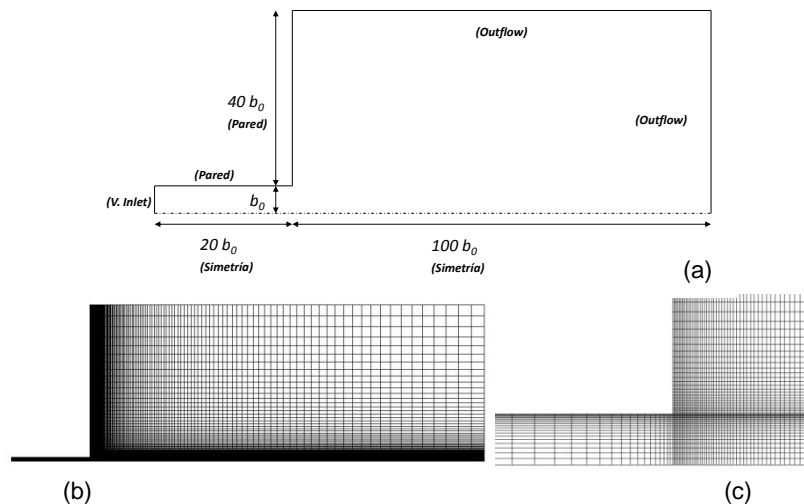


Figura 4. (a) Dominio utilizado para la simulación de flujo de fluidos, (b) Malla utilizada para la simulación, (c) Refinamiento de malla en zona de entrada.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 5 muestra los perfiles de la componente u de la velocidad obtenidos a partir de simulaciones en las condiciones descritas, versus la distancia y , transversal al chorro. Se puede observar que a medida que aumenta la distancia al orificio de salida la velocidad máxima se mantiene aproximadamente constante hasta valores de x de 0.2 y luego disminuye de manera gradual. Esto puede atribuirse a que pequeños valores de la coordenada x corresponden a la zona de flujo en desarrollo, donde la velocidad de entrada permanece casi constante. Se observa también que el chorro penetra cada vez más en el flujo estanco creando una perturbación en el mismo. Para valores de x mayores a 30 cm comienza a manifestarse un efecto de succión en el gas que rodea al chorro principal mediante la aparición de una contribución negativa de pequeña magnitud, antes de que el fluido se encuentre en reposo completo. De manera similar, la componente v de la velocidad se muestra como una función de y (Figura 6). Se puede apreciar que el aporte de esta componente es positivo en la zona inmediata al eje de simetría, pero cambia de signo para mayores valores de y antes de



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECÁNICA
DE LAS
INGENIERÍAS

FoDAMI

disminuir a cero en la zona de flujo estanco. Los valores negativos de v se deben al efecto de succión que se produce por la disminución en la presión estática del fluido en movimiento en la zona central del chorro. Los valores de la velocidad v en el orificio de entrada se consideran despreciables,

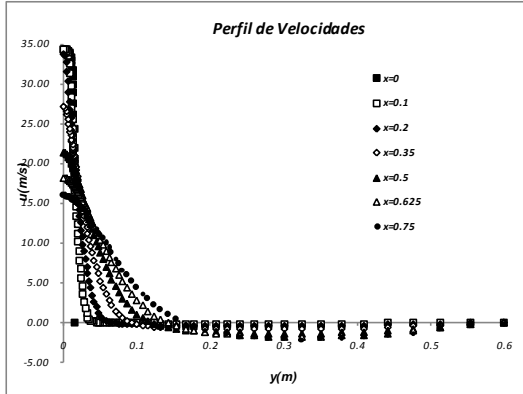


Figura 5. Componente x de la velocidad obtenidos mediante simulación.

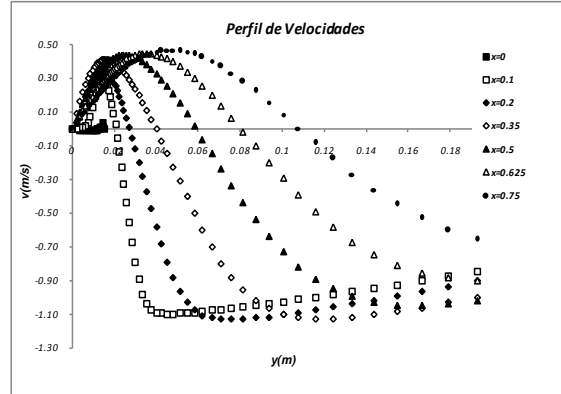


Figura 6. Componente y de la velocidad obtenidos mediante simulación.

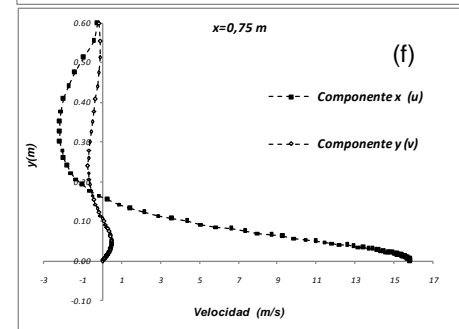
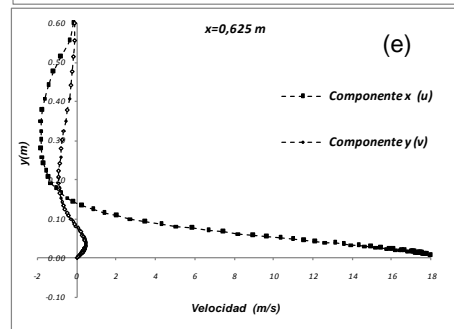
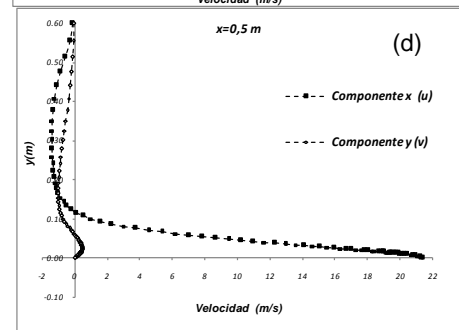
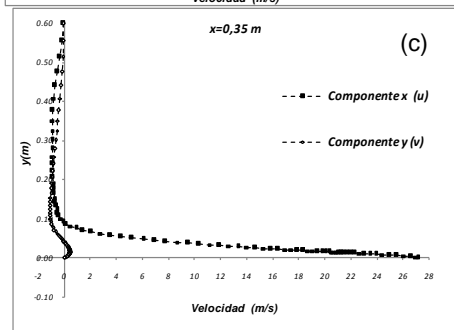
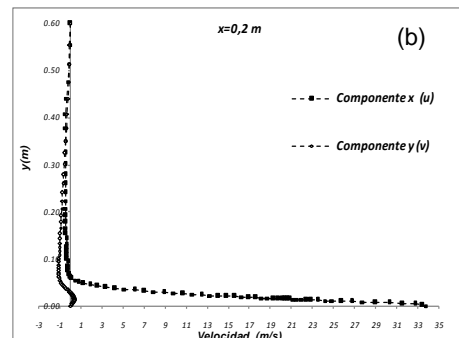
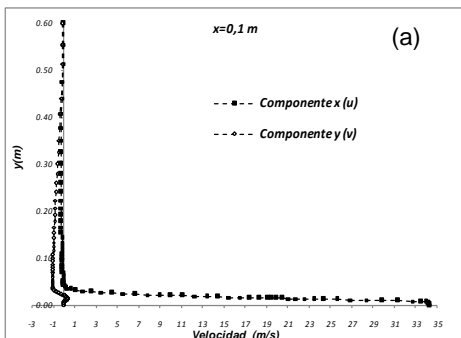


Figura 7. Comparación de las componentes de la velocidad, u y v , obtenidas por simulación.



lo que concuerda con el flujo unidireccional según el eje x que se tiene previamente.

La comparación de los valores de las componentes de la velocidad u y v , Figura 7, muestra que la segunda es mucho menor en zonas cercanas al eje de simetría. En esta zona predomina el flujo tipo en chorro en la dirección x . Sin embargo, fuera de la zona principal, la componente v es mayor en magnitud. En esta región el aire, que inicialmente estaba estanco, comienza a moverse debido a la succión. Fundamentalmente lo hace en la dirección de y negativa.

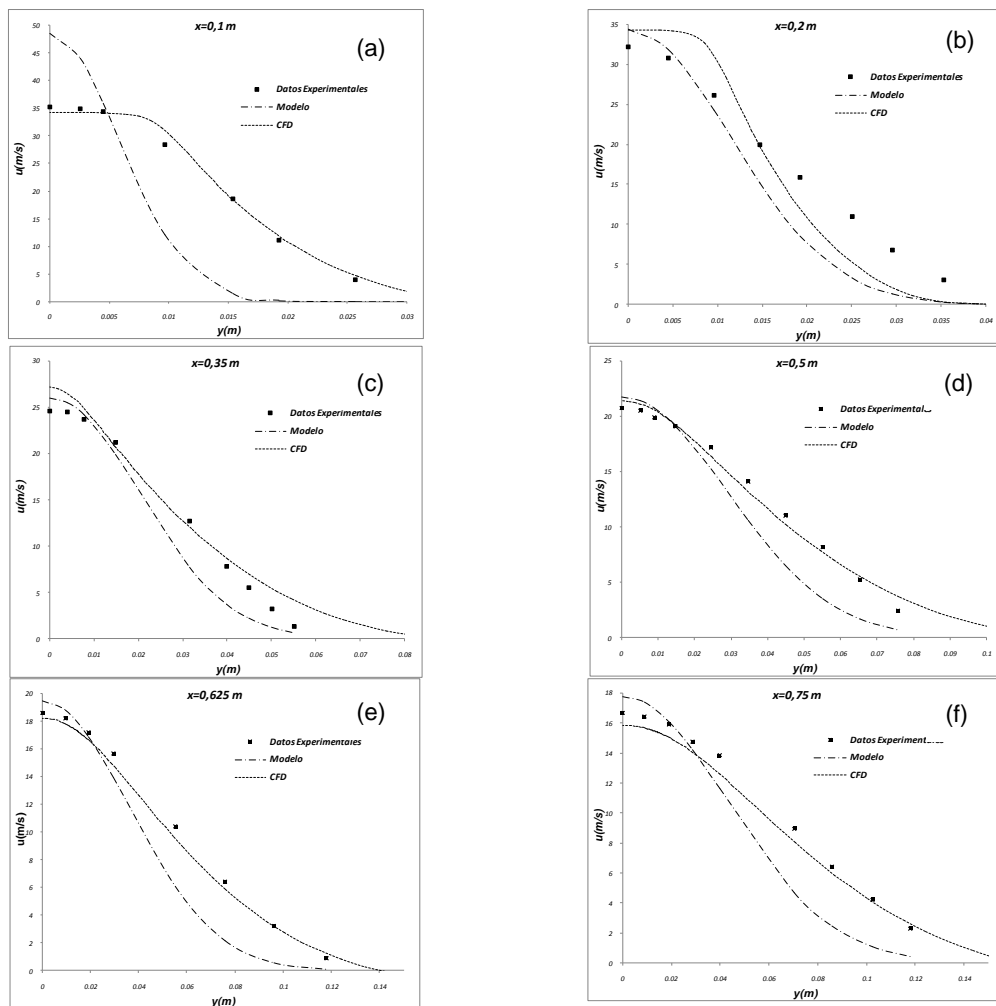


Figura 8. Comparación de modelo con datos experimentales y obtenidos mediante simulación.

La Figura 8 muestra valores experimentales para la velocidad u obtenidos por Forthman y se los compara con los obtenidos mediante simulación numérica y el modelo de Tollmien. Este modelo predice bien el comportamiento del chorro para grandes valores de x pero falla en la



zona de flujo en desarrollo. Esto es debido a que la Ecuación (7) queda indeterminada para valores cercanos a $x = 0$. Por otra parte los valores obtenidos por simulación son capaces de lograr un mejor ajuste en todo el rango estudiado. La calidad de este ajuste mejora a medida que aumenta el valor de x . Sin embargo, tiene una leve divergencia con los valores experimentales en la zona de transición entre núcleo potencial y flujo desarrollado. Lo descripto anteriormente se condice con la comparación presentada en la Figura 9, donde se presenta la relación de los máximos de velocidad en función de la distancia al orificio. Se observa que los resultados de las simulaciones son prácticamente coincidentes con los experimentales. Cabe destacar que predicen una mayor longitud de la zona potencial, debido a que la velocidad de entrada permanece constante para mayores valores de x .

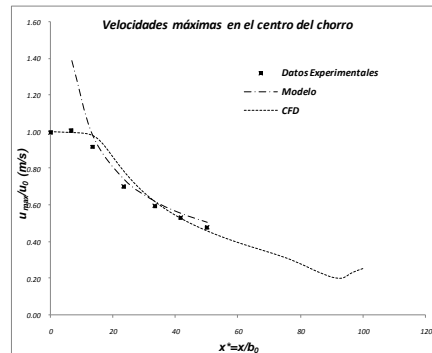


Figura 9. Comparación de velocidades experimentales en el centro del chorro con datos de simulación y modelados.

Los valores adimensionales de u se muestran en la Figura 10. Se aprecia que adoptan la distribución gaussiana en la zona de flujo desarrollado. Para la zona de flujo potencial el modelo no es válido.

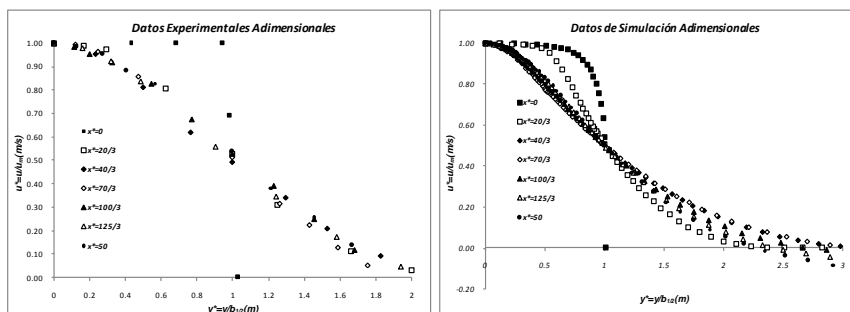


Figura 10. Datos adimensionalizados: (a) datos experimentales, (b) obtenidos por simulación numérica.

La Figura 11 representa los perfiles de velocidad, en módulo; obtenidos mediante simulaciones CFD para diferentes distancias al orificio de salida. La línea punteada se determina como el límite ente el movimiento propio del chorro y la zona de influencia que su movimiento genera. Esta representación concuerda con la información reportada en la literatura a partir de datos experimentales [3,7].

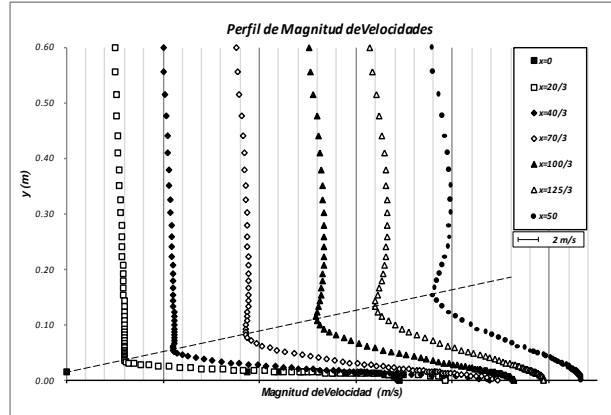


Figura 11. Modulo de la velocidad para distintos valores de x obtenidos mediante simulación.

4. CONCLUSIONES

La buena calidad de las simulaciones obtenidas con CFD se manifiesta en la comparación con los datos experimentales. Ésta condición se mantiene para todo el rango de x estudiado, a diferencia del modelo de Tollmien, que logra un buen ajuste sólo en la zona de flujo desarrollado.

El estudio del flujo en chorro resulta una herramienta útil en el modelado matemático del separador de sólidos. Se demuestra que en la zona de flujo potencial el uso del modelo de Tollmien conduce a un error considerable.

Como resultado de este estudio, se pone de manifiesto la existencia de una zona de predominio de movimiento en la dirección del chorro y otra secundaria en dirección y . Ésta última es influenciada por la succión que se genera.

NOMENCLATURA

x, y	Ejes de coordenadas cartesianas.
u, v	Componentes instantáneas de la velocidad en direcciones x e y .
\bar{u}, \bar{v}	Componentes alisadas de la velocidad en direcciones x e y .
u', v'	Componentes fluctuantes de la velocidad en direcciones x e y .
u_m, v_m	Componentes fluctuantes de la velocidad en direcciones x e y .
\bar{P}	Presión alisada para cualquier punto del dominio.
P'	Fluctuación en la presión para cualquier punto del dominio.
$\tau_{ij}^{(t)}$	Tensor de esfuerzos turbulentos.
l	Longitud de mezcla.
ϵ	Tasa de disipación de energía turbulenta.
ϵ_{ij}	Tensor de disipación de energía turbulenta.
k	Energía cinética turbulenta.
Π_{ij}	Tensor de deformación de correlación de presión.
C_{ijk}	Tensor de deformación de correlación de presión.
μ_T	Viscosidad de remolino.
$C_{\epsilon 1}, C_{\epsilon 2}, \sigma_{\epsilon}, C_{\mu}, \sigma_k$	Constantes del modelo de turbulencia RSTM.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECÁNICA
DE LAS
INGENIERÍAS

FoDAMI

ρ	Densidad del fluido.
ν	Viscosidad cinemática del fluido.
Re	Número de Reynolds.
b_0	Medio espesor de la boca del chorro.
$b_{1/2}$	Valor de y para el cual la velocidad u es la mitad de la del centro.
$b_{+/-}$	Distancia sobre el eje y a la cual la velocidad v cambia de signo.
d	Constante del modelo de Tollmien.
\bar{a}	Constante del modelo de Tollmien.
y^+	Distancia a la pared en unidades viscosas.
Δt	Paso temporal.
Δt_{al}	Intervalo de tiempo para el alisado de variables turbulentas.
δ	Delta de Kronecker.

REFERENCIAS

- [1] Dry Engineered Sand Solutions. 2012.
- [2] Q. Wang, M. C. Melaaen, S. R. De Silva, "Investigation and simulation of a cross-flow air classifier". Powder Technology, 120 (2001) 273-280.
- [3] N. Najaratnam, "Turbulent Jets". Elsevier 1976.
- [4] M. Ruiz Méndez, S. Vanegas Pinzón, "Modelamiento mediante la dinámica de fluidos computacional de un chorro plano libre". VI Congreso Colombiano de Elementos Finitos y Modelamiento Numérico, Colombia, 2002.
- [5] R. Bird, "Fenómenos de Transporte", 2da. Ed, Wiley, Mexico, 2006.
- [6] E. Forthman, "Turbulent Jet Expansion", N.A.C.A , 1936.
- [7] W. Tollmien, "Berechnung turbulenter Ausbreitungsvorgänge", N.A.C.A ; 1945.
- [8] G. N. Abramovich, "The theory of Turbulent Jets", M.I.T Press, 1963.
- [9] J. Blazek, "Computational fluid dynamics: Principles and applications", Elsevier, 2001.
- [10] S. K. Shukla, P. Shukla, P. Ghosh, "The effects of modeling of velocity fluctuations on prediction of collection efficiency of cyclone separators", Applied Mathematical Modelling, 37 (2013) 5774-5789.