



SIMULACION NUMERICA DE LA EROSION DE UN CHORRO VERTICAL SUMERGIDO USANDO UN MODELO EULERIANO DE UNA FASE.

Numerical Simulation of Vertical Jet Scour using a Single Phase Eulerian Model.

Mariana Mendina Gourgues (1) y Gabriel Usera Velasco (2)

(1) Dra. Profa., Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay

(2) Dr. Prof., Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay

Email para Correspondencia: mmendina@fing.edu.uy (P) Mariana Mendina

Resumen: El transporte de partículas en el seno de un fluido representa un complejo desafío dentro de la dinámica. La dificultad del abordaje se centra en dos causas principales: la complejidad de la interacción entre partículas y fluidos causada por la dinámica de retroalimentación entre las dos fases; y el amplio espectro de escalas involucradas en los diferentes casos de estudio. En este trabajo se presenta un modelo numérico para simular el transporte de partículas inmersas en un flujo turbulento, donde el sistema fluido-partículas es considerado como un material pseudo-continuo de una sola fase. En este modelo las partículas son analizadas en su conjunto y el efecto de la interacción fluido-partícula es tenido en cuenta en términos de una viscosidad efectiva. El CFD utilizado es el código `caffa3d.MBRi`, que implementa el método de volúmenes finitos en mallas curvilíneas estructuradas por bloques, para flujos incompresibles viscosos o turbulentos, mediante el método SIMPLE de acople velocidad - presión. La validación del modelo fue realizada mediante la comparación de una serie de simulaciones numéricas con experimentos de laboratorio realizados previamente por otros autores, quienes estudian la erosión generada sobre un lecho de arena por un chorro de agua sumergido y turbulento que impacta verticalmente sobre el mismo.

Palabras claves: *CFD; partículas; dispersión; modelo de mezcla.*

Abstract: The transport of particles in a flow represents a complex challenge within fluid dynamics, comprising a wide range of applications. The difficulty of the approach focuses on two main causes: the complexity of the interaction between particles and fluids caused by the dynamics feedback between two phases, and the difference of scales involved in a same problem. In this work a computational model to simulate the movement of particles immersed in a fluid is presented, where the fluid-particle system is considered as a pseudo-continuous material of a single phase. The particles are analyzed as a whole and the effect of the fluid-particle interaction is taken into account in terms of an effective viscosity. The CFD base model used is the `caffa3d.MBRi`. This model implements finite volume method in curved block structured meshes for incompressible, viscous or turbulent flows, using the SIMPLE method for pressure-velocity coupling. The validation of the code and the assessment of its capabilities was satisfactorily addressed through a series of numerical experiments set up to reproduce the previous work of other authors of



a laboratory study on the erosion of sand beds by submerged circular impinging vertical turbulent jet of water.

Keywords: *CFD; particle; dispersion; mixture model.*



1 INTRODUCCIÓN

El transporte de partículas en el seno de un fluido representa un complejo desafío dentro de la dinámica de fluidos y su relación con el flujo, aún para casos simples, no está completamente comprendida en la actualidad. La dificultad del abordaje se centra en dos causas principales: la complejidad de la interacción entre partículas y fluidos causada por la dinámica de retroalimentación entre las dos fases; y el amplio espectro de escalas involucradas en los diferentes casos de estudio.

La combinación de los CFD con modelos de dispersión de partículas ha resultado una valiosa herramienta para la comunidad científica, que ha permitido avanzar en el estudio de diferentes aplicaciones de ingeniería: la dispersión emisiones industriales, el transporte de sedimentos en una corriente de agua, la erosión del suelo entorno a estructuras, la deposición de partículas en compartimientos ventilados o sobre superficies, la explotación y operación de minas a cielo abierto o canteras etc. En este trabajo se describe la implementación de un modelo euleriano de una sola fase sobre la base de un código CFD (caffa3d), que es utilizado para la simulación numérica del transporte de partículas inmersas en un flujo turbulento. Este tipo de modelos consiste en estudiar la dinámica de la interacción fluido-partículas considerando ambas fases juntas mediante un material pseudo-continuo (modelo de mezcla), empleando un único fluido que tiene en cuenta el efecto de la fase de partículas en términos de una viscosidad efectiva (Lalli et al., 2005; Gorb et al., 2014). La validación del modelo fue llevada adelante mediante la simulación numérica de una serie de pruebas de erosión de chorro sumergido (JET-submerged Jet Erosion Test) cuyos resultados fueron comparados con resultados experimentales obtenidos previamente por otros autores.

JET constituye una de las herramientas más utilizadas para el estudio de la erodabilidad de suelos debido a su adaptabilidad a situaciones de laboratorio y de campo y su robustez en una amplia gama de materiales (Hanson y Cook, 2004). Una revisión del método puede encontrarse en Karamigolbaghi et al. (2017), quien usando una gran base de datos de resultados de la literatura, concluye que algunos de estos métodos conducen a valores poco realistas para los parámetros de erosión, y afirman que si bien las relaciones empíricas disponibles son estadísticamente significativas, el coeficiente de erodabilidad calculado para un cortante crítico dado tiene una incertidumbre de varios órdenes de magnitud. Finalmente, dicho trabajo concluye que el conocer todos los factores que pueden afectar la erodabilidad de los suelos cohesivos y no cohesivos podría explicar por qué los resultados del JET son incapaces de predecir la erosión en algunos casos, sugiriendo precaución a la hora de la aplicación del método.

La utilización de CFD para la simulación es una herramienta útil y complementaria a las herramientas experimentales que podría arrojar luz sobre algunas de las incertidumbres evidenciadas por los experimentos mencionados. Curiosamente la bibliografía actual en esta temática es escasa, se pueden encontrar, por ejemplo, algunos trabajos que utilizan el mismo modelo empleado en Qian et al. (2010) que utiliza un modelo de dos fases para analizar la erosión del JET, el trabajo de Kuang (2013) que utiliza CFD-DEM (Discrete Element Method) para simular la erosión de un chorro de aire en un depósito de esferas de vidrio y algunos otros pero empleando parametrizaciones



empíricas de la erosión (algunas obtenidas a partir de resultados de JET) en lugar de modelar el lecho de sedimento como, por ejemplo, Mercier et al. (2016).

Las simulaciones diseñadas en este trabajo están inspiradas en los experimentos de laboratorio realizados por Aderibigbe y Rajaratman (1996), cuyos resultados servirán para la verificación de la aplicabilidad del código *caffa3d*. El modelo ha sido validado previamente mediante la comparación de resultados experimentales de otros autores con simulaciones numéricas utilizando algunos ejemplos más sencillos: ruptura del talud de una presa, sedimentación de una mezcla de agua y arcilla en una columna de sedimentación y la erosión sobre un lecho de arena causado por el impacto de un chorro plano sumergido (Mendina y Usera, 2018).

2 DESCRIPCIÓN DEL MODELO NUMERICO

El CFD utilizado es el *caffa3d.MBRi* (*caffa3d*), modelo de uso libre y código abierto que implementa el método de volúmenes finitos en mallas curvilíneas estructuradas por bloques, para flujos incompresibles viscosos o turbulentos, mediante el método SIMPLE de acople velocidad - presión, e incorpora estrategias de paralelización masiva en memoria distribuida mediante las librerías MPI (Usera et al, 2008; Mendina et al, 2014).

Actualmente el código, tiene incorporado un modelo básico de turbulencia, de transferencia de calor por radiación entre el piso, el aire y el espacio exterior, considera la interacción fluido estructuras mediante el método de condiciones de borde inmersas, dispone de un módulo para estudiar procesos de aire húmedo, considera transporte de escalares e incorpora el método Volume of Fluid (VOF) para tratar flujos a superficie libre. Varios casos de aplicaciones ingenieriles han sido ya estudiados con este modelo, que han permitido concluir la robustez del mismo (Fernández et al. 2018, Draper et al., 2016; López et al., 2015; Berg et al., 2015; Mendina et al., 2014; Usera et al., 2010; entre otros).

Se incorporó un módulo específico para estudiar el transporte de partículas en un flujo turbulento. El modelo matemático elegido es de una única fase donde la presencia de partículas en el fluido es tomada en cuenta por medio de una viscosidad efectiva, que considera un comportamiento Newtoniano en regiones con suspensiones diluidas mientras que para mayores concentraciones se utiliza una superposición del modelo Newtoniano y el modelo de Bingham, incluyendo de esta manera la influencia de las tensiones de corte. Este modelo ha sido presentado previamente por Lalli et al. (2005).

Para el cálculo de las tensiones adicionales τ_{ij}^p se considera la ecuación constitutiva generalizada de un fluido incompresible viscoso Newtoniano:

$$\tau_{ij}^p = 2\mu S_{ij} \quad (1)$$

Donde S_{ij} representa las componentes del tensor deformación y μ la viscosidad dinámica efectiva que considera el efecto de las partículas en la mezcla, determinada por la “Eq. (2)” y la “Eq. (3)”:



XIII SIMMEC

Simpósio de Mecânica Computacional

29 de Outubro a 1º de Novembro de 2018
UFES - Campus Goiabeiras - Vitória, ES



$$\mu = \mu_f \left(1 + \frac{\frac{3}{2}\chi}{1 - \frac{\chi}{\chi_M}} \right)^2 ; \quad \text{si } \chi < \chi_m \quad (2)$$

$$\mu = \mu_f \left(1 + \frac{\frac{3}{2}\chi_m}{1 - \frac{\chi_m}{\chi_M}} \right)^2 + \frac{1}{2} \tau_o \left(\frac{1}{2} SS + \epsilon \right)^{-\frac{1}{2}} ; \quad \text{si } \chi_m < \chi < \chi_M \quad (3)$$

Siendo χ la fracción volumétrica de partículas, μ_f la viscosidad dinámica del fluido, χ_m un valor umbral a partir del cual se considera el comportamiento no Newtoniano y χ_M el máximo valor posible para la fracción volumétrica de partículas.

La reología de la suspensión de un fluido de Bingham es representada por el parámetro τ_o ("Eq. 4") y ϵ es un parámetro que se agrega para des-singularizar la ecuación y controlar la magnitud de la viscosidad, de manera que el límite cuando $\epsilon \rightarrow 0$ es el material visco elástico.

$$\tau_o = \frac{\chi - \chi_m}{\chi_M - \chi_m} \tan \varphi (\rho_p - \rho_f) g \int_{x_2^*}^{\chi_2^*} \chi dx_2' \quad (4)$$

Siendo φ el ángulo de fricción interna del material, ρ_p y ρ_f la densidad de partículas y fluido respectivamente, g la aceleración gravitatoria y x_2^* la altura de un punto arbitrario en donde el valor de χ es nulo.

Las ecuaciones del modelo de mezcla (Navier-Stokes generalizada, continuidad y continuidad para la fracción de volumen) se discretizan usando un esquema implícito de alta resolución (Ungarish, 1993; Usera et al., 2008).

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (5)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + v \nabla v \right) = - \nabla p + \chi (\rho_p - \rho_f) \bar{g} - \nabla \cdot \left[\chi (1 - \chi) \frac{\rho_p \rho_f}{\rho} v^r v^r \right] + \nabla \cdot \tau^p \quad (6)$$

$$\frac{\partial \chi}{\partial t} + \nabla \cdot (v^p \chi) = 0 \quad (7)$$

Donde ρ es la densidad de la mezcla definida como $\rho = \chi \rho_p + (1 - \chi) \rho_f$, u y v son las velocidades promedio en el volumen y la masa respectivamente, v^r es la velocidad de las partículas relativa al fluido y v^p es la velocidad de las partículas, determinada por la siguiente expresión (Lalli et al, 2005):

$$v_i^p = v_i + w_i - \eta \frac{\partial \chi}{\partial x_i} \quad (8)$$

$$\left. \begin{aligned}
 w_i &= \tilde{w}_i + \hat{w}_i \\
 \tilde{w}_i &= \frac{(1-\chi)^2}{(1+\theta\chi)} \frac{2\rho_f r_p^2}{9\mu} \theta g_i \quad ; \quad \theta = \frac{\rho_p}{\rho_f} - 1 \\
 \hat{w}_i &= -\frac{r_p^2}{\mu} \frac{3}{5} \chi \frac{\partial(\mu S_{II}^{1/2})}{\partial x_i} \quad ; \quad S_{II} = \frac{1}{2} SS \\
 \eta &= S_{II}^{1/2} r_p^2 \frac{\chi}{3} \left(1 + \frac{e^{8.8\chi}}{2}\right)
 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Se observa que se considera aquí el efecto convectivo por medio de la velocidad de la mezcla promedio en la masa (v_i), la sedimentación de partículas y su re suspensión viscosa (w_i) y la difusión por medio del coeficiente de difusión η .

Para resolver la ecuación de continuidad de χ “Eq. (7)” se emplea un método inspirado en el modelo VOF (técnica de seguimiento de superficie aplicada a un malla euleriana fija de utilidad para resolver el flujo de dos o más fluidos inmiscibles); mientras que para resolver las ecuaciones de incompresibilidad “Eq. (5)” y balance mecánico de la mezcla “Eq. (6)” se adaptan las rutinas ya disponibles en el *caffa3d* para la resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes.

Para el cálculo de la velocidad de sedimentación \tilde{w} se admiten partículas esféricas bajo el régimen de Stokes “Eq. (9)”. En este trabajo, se propone ampliar dicha expresión a aquellos casos donde Stokes pierde validez, introduciendo el coeficiente de Drag C_D en el cálculo de esta velocidad “Eq. (10)” (Rouse, 1938):

$$\vec{\tilde{w}} = \frac{(1-\chi)^2}{(1+\theta\chi)} \sqrt{\frac{8}{3} \theta r_p^2 |\vec{g}| \frac{1}{C_D} \frac{\vec{g}}{|\vec{g}|}} \quad ; \quad S_{II} = \frac{1}{2} SS \quad (10)$$

La parametrización de la turbulencia es realizada con un esquema LES (simulación de grandes vórtices), con lo cual la viscosidad total considerada en “Eq. (1)” sumará el término de la viscosidad subgrilla al cálculo expresado en “Eq. (2)” y “Eq. (3)”.

Una descripción más detallada del modelo y su implementación en el *caffa3d* puede encontrarse en Mendina (2018).

3 MODELACIÓN DEL JET

La prueba de erosión de chorro sumergido, JET, consiste en hacer impactar sobre un lecho de material particulado de espesor uniforme un chorro vertical de diámetro “ d ” y velocidad U_0 medida en la boquilla de entrada del mismo, desde una altura “ h ” por encima del nivel del sedimento (altura de impacto), Figura 1.

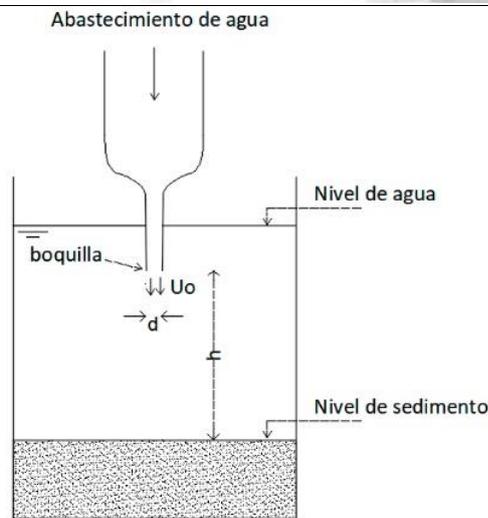


Figura 1. Representación esquemática de JET (prueba de erosión de chorro sumergido).

3.1 Modelación física

En esta sección se resumen algunos de los resultados de los experimentos realizados por Aderibigbe y Rajaratman (1996), que servirán como base para las simulaciones numéricas descritas en la sección 3.2. En dicho trabajo se realizan un conjunto de 67 ensayos en los que se utilizan dos muestras de arena cuasi uniforme de diferente diámetro y se varía la distancia de impacto (h), el diámetro de la boquilla (d) y la velocidad a la salida de ésta (U_o). Para cada experimento los autores toman medidas de la máxima erosión asintótica E_m cuando el chorro está activado (jet dinámico) demostrando que la misma es proporcional al parámetro de erosión E_c (cociente entre el Froude densisimétrico y la distancia relativa de impacto h/d):

$$E_c = \frac{U_o d/h}{\sqrt{gD_{50} \frac{(\rho_p - \rho_f)}{\rho_f}}} \quad (10)$$

Donde D_{50} representa el diámetro mediano del sedimento.

Los autores caracterizan en dos grupos los regímenes de flujo observados:

1) Régimen de chorro suavemente desviado – **WDJR** (Weakly Deflected Jet Regime), que tiene lugar para valores de $E_c < 0.35$ aprox. En esta situación el chorro penetra levemente en el lecho de sedimento y como resultado tiene una interacción reducida con el mismo.

2) Régimen de chorro fuertemente desviado – **SDJR** (Strongly Deflected Jet Regimen), que tiene lugar para valores de $E_c > 0.35$ aprox. En este caso el chorro siempre

penetra el depósito de sedimento y por lo tanto es desviado abruptamente transportando en suspensión material hacia afuera de la fosa generada.

A su vez, en función del valor de Ec cada una de estas clasificaciones puede subdividirse en dos (I, II) de acuerdo a lo esquematizado en la Figura 2.

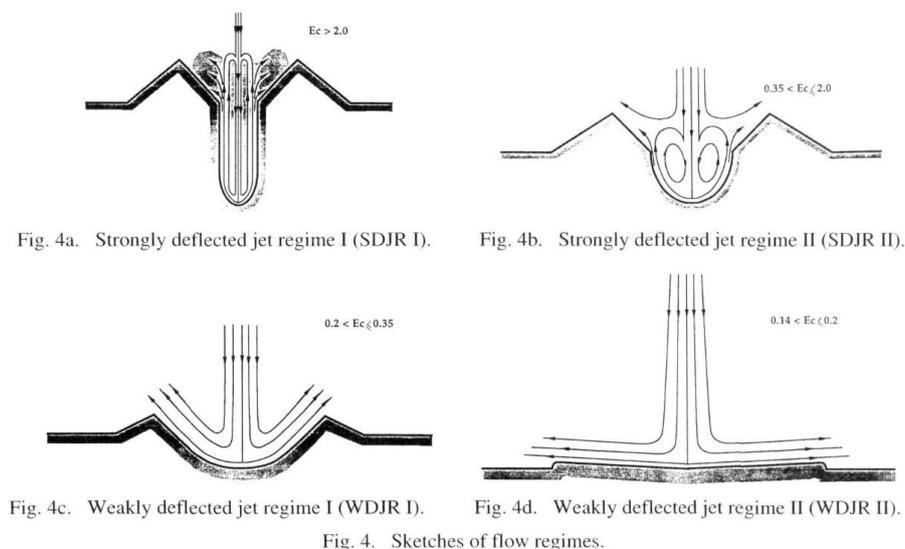


Figura 2. Representación esquemática de los diferentes regímenes generados con JET.

Fuente: (Aderibigbe y Rajaratman, 1996)

Los perfiles del lecho erosionado adimensionalizados respecto al valor máximo de erosión, $E(r)/E_m$ presentados en el artículo de referencia, muestran que para los valores mayores de Ec los perfiles se confunden (SDJR), mientras que para rangos menores la amplitud superior de la fosa adimensionalizada aumenta rápidamente al bajar el valor de Ec (WDJR).

3.2 Modelación numérica

Las diferentes simulaciones numéricas se realizaron sobre un dominio cúbico de lado $B=20\text{cm}$, representado con 9 bloques geoméricamente idénticos de forma prismática de sección cuadrada de lado $(B/3)$ y altura B . Cada bloque tiene un arreglo de $64 \times 64 \times 192$ celdas uniformes y cúbicas (resolución $\Delta=1.042\text{mm}$), lo que da un total de más de 7 millones de celdas para la simulación. Las condiciones de borde utilizadas fueron de pared en el piso y en todas las caras laterales del dominio exceptuando los 2cm superiores de las mismas donde se impone condición de salida ($\cong 20\% h$). En el techo del dominio se utiliza una condición de borde de entrada en todas las celdas, donde se impone una velocidad U_{in} en una circunferencia central de diámetro d_{in} y velocidad nula en el resto de ellas (a los efectos de la simulación la velocidad nula actúa como condición de pared). La entrada del fluido al dominio es simulada mediante una tobera de forma troncocónica que es representada con el método de condiciones de borde inmersas (Liao et al., 2010). El diámetro superior de la tobera es d_{in} mientras que el diámetro inferior es d . La velocidad de entrada U_{in} es calculada de manera de obtener en la boquilla la velocidad



Uo que se desea. La velocidad de salida es obtenida por el modelo a partir del flujo de entrada de manera de mantener el balance de masa en cada paso de tiempo. Para modelar la turbulencia del chorro se utiliza el método LES con la parametrización de Smagorinsky.

Se realizaron diferentes simulaciones modificando el parámetro Ec mediante la modificación de Uo y dejando invariantes los restantes parámetros entre ellas. Los parámetros numéricos y de la caracterización del sedimento utilizados en la simulación se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros numéricos de las simulaciones caffa3d. Fosa circular.

Caso	Δ (mm)	Δt (s)	χ_m	χ_M	ε	$\varphi(^{\circ})$	r_p (μm)	ρ_s (kg/m ³)
JET	1.042	5×10^{-3}	0.52	0.63	1×10^{-3}	45	750	2650

Algunos problemas de inestabilidades numéricas se encontraron originalmente al intentar imponer las condiciones iniciales de la simulación, en particular la imposición de los valores de la fracción volumétrica de partículas de la fracción sólida. Debido a esto la simulación se inicia con el chorro apagado, y se deja que las partículas sedimenten naturalmente desde una altura determinada para conformar el depósito de arena. Los valores χ y la altura de la mezcla agua-arena iniciales son impuestas de manera de obtener los valores de estos parámetros para la configuración del lecho sólido deseados. Una vez finalizada la sedimentación el chorro es iniciado paulatinamente desde el reposo hasta llegar a la velocidad Uin deseada. Cabe señalar que esta metodología forma parte de un transitorio de rápido desarrollo que es representativa de los ensayos experimentales y que no afecta a los valores asintóticos de erosión que son los relevados a efectos de la validación aquí propuesta.

Los valores de la altura de impacto, el diámetro y la velocidad en la boquilla deben ser ajustados con la simulación. El valor de “h” se estima una vez que la sedimentación ha finalizado, y el valor de d se define en función de la boquilla que es efectivamente representada por el método de condiciones de borde inmersas mientras, que la velocidad Uo es medida en cada simulación. Los parámetros geométricos h y d permanecen incambiadados entre las simulaciones con valores aproximados de 11,8cm y 8mm respectivamente. En la Tabla 2 se muestran el Ec y la Uo obtenidos de cada una de las simulaciones realizadas.

Tabla 2. Valores de la velocidad en la boquilla y del parámetro de erosión (Ec) para las diferentes simulaciones caffa3d.

Caso	Uo (m/s)	Ec
JET001	0.288	0.13
JET002	0.487	0.21
JET003	0.663	0.29
JET004	0.998	0.43
JET005	1.163	0.51

La conformación del chorro y el funcionamiento de la tobera es muy similar en todos los casos, en la Figura 3 a) se puede ver una representación del perfil de la velocidad vertical del mismo adimensionalizado respecto a la velocidad U_0 a la salida de la tobera. En la Figura 3 b) se muestra una representación tridimensional del experimento simulado.

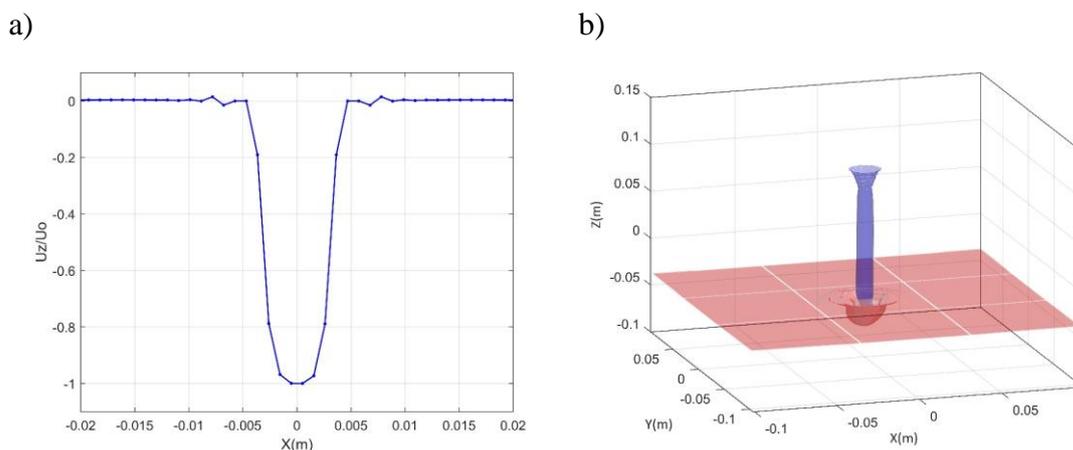


Figura 3. a) Perfil de la velocidad vertical a la salida de la boquilla ($Z=0.08m$) adimensionalizado respecto a U_0 ; b) representación esquemática del fenómeno de erosión para una simulación genérica mediante una isosuperficie de velocidad del chorro (azul) y otra de χ (rosa).

En la Figura 4 se puede visualizar un esquema general del chorro y de la fosa erosionada en el estado de equilibrio para cada simulación. A efectos de tener una idea del comportamiento del fluido y la arena en su conjunto se grafican isosuperficies de la diferencia entre el módulo de la velocidad y el campo χ . Dado que los campos son disjuntos, es posible visualizar en los valores positivos del gráfico el módulo de la velocidad mientras que los valores negativos representan los valores de la fracción volumétrica de partículas con el signo cambiado (esquema general JET).

Para analizar los perfiles del lecho erosionado adimensionalizados respecto al valor máximo de erosión, $E(r)/E_m$, en función de los diferentes valores de E_c se utiliza la curva de nivel χ_m como referencia de la interface entre el lecho de arena y el agua (Figura 5). De esta figura se desprende que se pueden apreciar comportamientos cualitativamente similares a los resultados experimentales (sección 3.1).

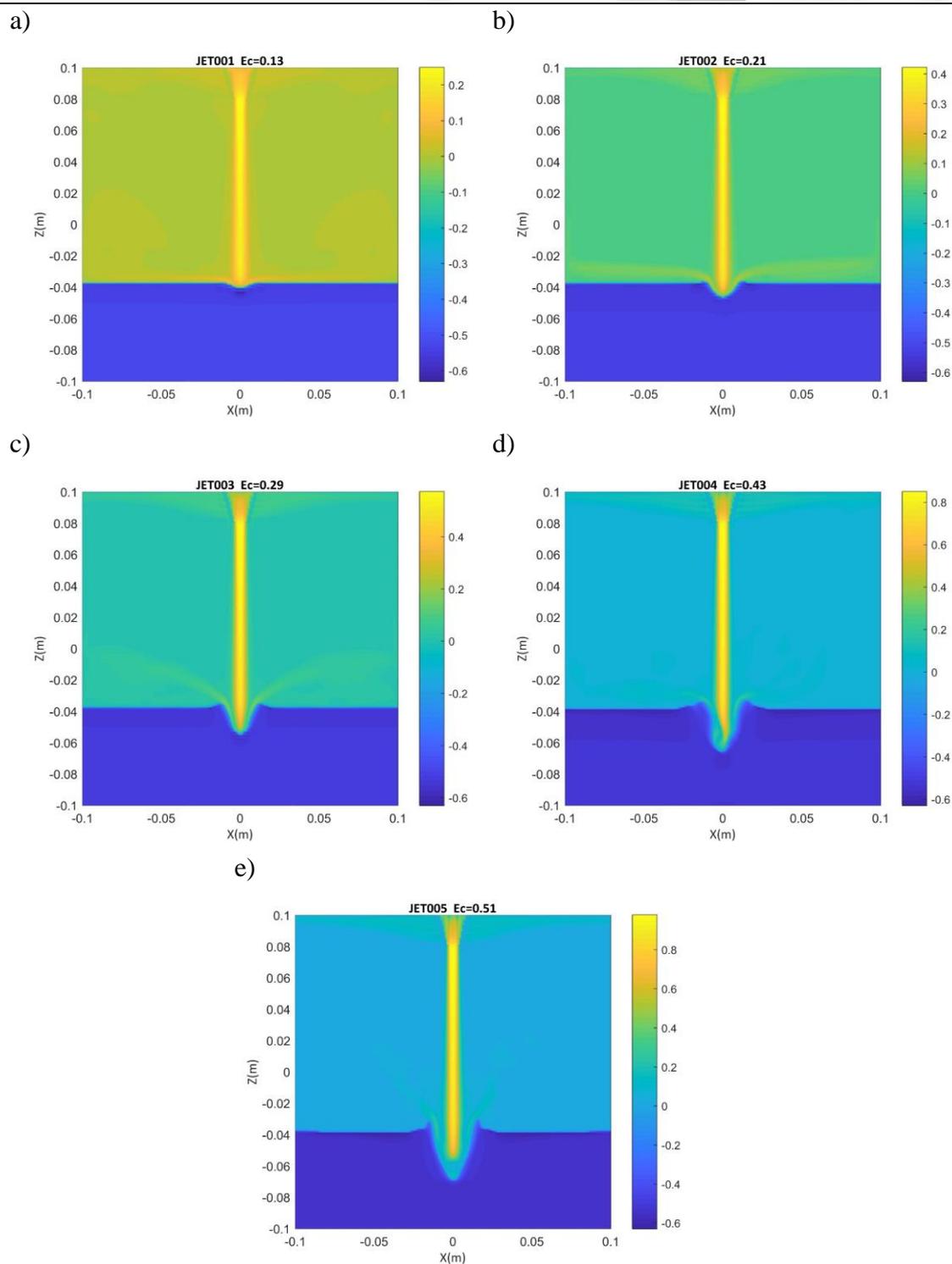


Figura 4. Isosuperfícies de la diferencia entre el módulo de la velocidad (m/s) y χ en la configuración asintótica para la simulación *caffa3d*. Esquema general JET. Los valores positivos corresponden al campo de velocidades mientras que los valores negativos al campo $-\chi$.

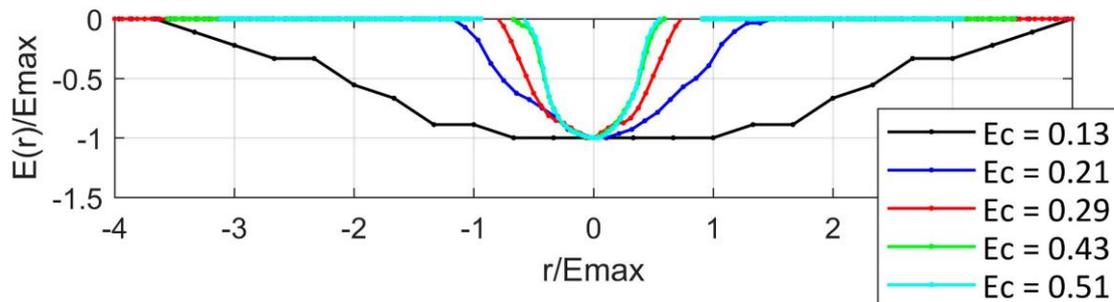


Figura 5. Perfil adimensionado de la erosión respecto a la erosión máxima, perfil medio en los dos planos verticales centrales curvas de nivel $\chi=0.52$ (límite del comportamiento sólido). Valores de las simulaciones *caffa3d*. Cada simulación es representada con un color diferente.

3.3 Comparación de resultados

Las simulaciones muestran que el modelo reproduce en forma adecuada los diferentes regímenes del JET descritos por Aderibigbe y Rajaratnam (1996) y que fueron presentados en las Figura 2 y Figura 5. Para valores más bajos de E_c la socavación es muy pequeña y el chorro prácticamente se defleca 90° al impactar con el lecho de arena. A medida que el valor de E_c aumenta, la fosa socavada se torna cada vez más profunda hasta que la misma es generada por un patrón de flujo cuasi-vertical para los valores más altos de E_c . El valor máximo de erosión aumenta en forma proporcional a E_c en las simulaciones numéricas, al igual que ocurre con los experimentos de laboratorio reportado en la sección 3.1. Los perfiles adimensionalizados de la fosa presentan resultados cualitativamente similares a los resultados experimentales, para los valores mayores de E_c los se confunden, (SDJR), mientras que para rangos menores (WDJR) la amplitud superior de la fosa adimensionalizada aumenta rápidamente al bajar el valor de E_c . Sin embargo, el radio máximo de la fosa relativa socavada es menor en las simulaciones numéricas. En particular, para $E_c > 0.35$ se tiene un factor de 0.7 entre los experimentos físicos y numéricos. Aderibigbe y Rajaratnam (1996) encuentran una ley empírica, con un ajuste potencial que vincula el valor del cociente de la erosión máxima y altura de impacto con E_c :

$$\frac{E_m}{h} = 1.26 E_c^{0.11} - 1 \quad (11)$$

En la Figura 6 se comparan los valores simulados contra el ajuste de la “Eq. 11” y con una serie de experimentos JET recopilados por los autores originales. El valor de la erosión máxima relativa respecto de h tiene un andamio similar para valores menores de E_c , dando valores algo mayores a lo esperado para las modelaciones con E_c menores. A pesar de esto, los puntos modelados están sobre la nube de dispersión de los experimentos relevados con una tendencia a sobreestimar la profundidad de erosión en relación con la apertura de la fosa.

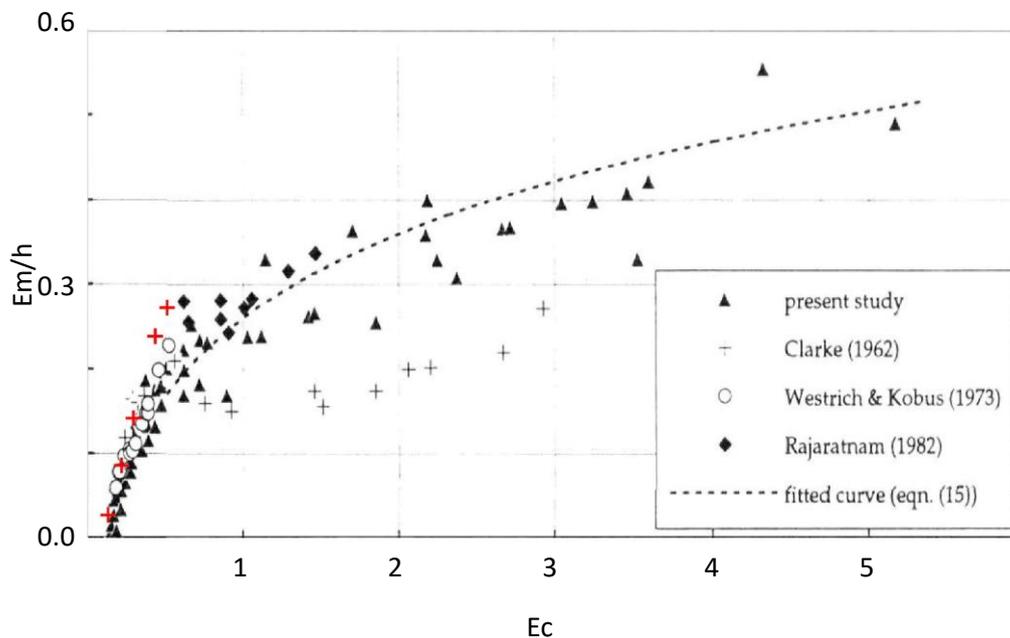


Figura 6. Perfil adimensionado de la erosión respecto a la erosión máxima. Cruces rojas: resultados de las simulaciones *caffa3d*; línea punteada: Ajuste teórico “Eq. 11”; marcadores negros: resultados experimentales de trabajos recopilados por Aderibigbe y Rajaratman (1996).

Fuente: (Aderibigbe y Rajaratman,1996). Figura Base.

4 CONCLUSIONES

En este trabajo se describen las nuevas capacidades incorporadas al CFD *caffa3d* de manera de mejorar su competencia para la resolución numérica del transporte de partículas inmersas en un flujo turbulento, generadas mediante la aplicación de un modelo euleriano de mezcla que analiza el movimiento de las partículas en su conjunto, incorporando su efecto por medio de una viscosidad efectiva que depende de las características locales de la fracción volumétrica de éstas. El modelo matemático fue presentado originalmente por Lalli et al. 2005, y en este trabajo se ha ampliado su rango de aplicabilidad hacia situaciones que no se encuentran bajo el régimen de Stokes mediante la incorporación del coeficiente de Drag en el cálculo de la velocidad de sedimentación.

Como caso de aplicación se seleccionaron una serie de experimentos JET que fueron comparados con experimentos de laboratorios similares realizados previamente por otros autores. Se considera que como una primera aproximación al fenómeno el modelo presenta una buena performance. El código reproduce correctamente los diferentes regímenes expuestos en Aderibigbe y Rajaratman (1996), WDJR y SDJR, aunque genera fosas más estrechas respecto a los experimentos con valores de máxima erosión razonables.



Algunas de las diferencias encontradas pueden ser parcialmente explicadas a partir de la caracterización del sedimento, en particular el tamaño de las partículas de arena es un aspecto importante que ha sido ya señalado por los mismos autores. En estos experimentos el sedimento ha sido caracterizado a partir del D50 de las muestras experimentales mientras que un trabajo posterior de los mismos autores (Aderibigbe y Rajaratnam, 1998), destinado al estudio de la erosión originada por chorros horizontales, demuestra que la no uniformidad del sedimento juega un papel importante en el tamaño de la fosa socavada y demuestran que para obtener buenas correlaciones entre las dimensiones que caracterizan la fosa y el parámetro de erosión el diámetro efectivo de la muestra debe ser el D95 en el cálculo de E_c en lugar del diámetro mediano. Cabe señalar además que si bien en estos trabajos la porosidad no ha sido tomada en cuenta como una variable de influencia en el proceso y por tanto sus valores no son reportados, trabajos posteriores han demostrado que la misma es una variable relevante en el proceso de socavación por JET (Qian et al., 2010).

La traducción de los parámetros que caracterizan al material particulado hacia los parámetros numéricos es un aspecto que debe ser profundizado, abriendo una puerta hacia una línea futura de investigación que si bien da continuidad a este trabajo excede el alcance del mismo.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Agencia Nacional de Investigación e Innovación (ANII), Uruguay, por la financiación del proyecto “Fondo María Viñas - 2011” que permitió el desarrollo inicial del modulo presentado en este trabajo.

REFERENCIAS

- Aderibigbe O. y N. Rajaratnam, 1996: Erosion of loose beds by submerged circular impinging vertical turbulent jets. *J. of Hydraulic Research*, 34 (1), 19-33.
- Aderibigbe O. y N. Rajaratnam, 1998: Effect of sediment gradation on erosion by plane turbulent wall jet. *J. of Hydraulic engineering*, 124 (10), 1034-1042.
- Berg P., C. Roloff, Beuing, Voss, Sugiyama, Aristokleous, Anayiotos, Ashton, Revell, Bressloff, Brown, Chung, Cebra, Copelli, Fu, Qiao, Geers, Hodis, Dragomir-Daescu, Nordahl, Suzen, Owais Khan, Valen-Sendstad, Kono, Meng, Xiang, Menon, Albal, Morales, Bonnefous, Osman, Goubergrits, Pallares, Cito, Passalacqua, Piskin, Pekkan, Ramalho, Marques, Sanchi, Sturgeon, Schumacher, Švihlová, Hron, Usera, Mendina, Steinman, Janiga, 2015: The Computational Fluid Dynamics Rupture Challenge 2013. Phase II, 2015: Variability of Hemodynamic Simulations in Two Intracranial Aneurysms. *J. of Biomechanical Engineering*, 137 (12), 121008.
- Draper, M., A. Guggeri y G. Usera, 2016: Modelling one row of Horns Rev wind farm with the Actuator Line Model with coarse resolution. In *J. of Physics: Conference Series*, 753 (8), 082028. IOP Publishing.



- Gorb Y., O. Mierk, L. Rivkind y D.Kuzminb, 2014: Finite element simulation of three-dimensional particulate flows using mixture models. *J. of Computational and Applied Mathematics*, 270, 443–450.
- Fernández F., M. Mendina, N. Rezzano, M. D'Angelo y G. Usera, 2018: Numerical simulation of atmospheric pollutants dispersion in an urban environment. *Proceedings of the Tenth International Conference on Computational Fluid Dynamics (ICCFD10)*.
- Hanson, G. J., y K. R. Cook, 2004: Apparatus, test procedures and analytical methods to measure soil erodibility in situ. *Engineering in Agriculture*, 20(4), 455-462.
- Karamigolbaghi M., S. M. Ghaneezada, J. F. Atkinsona, S. J. Bennettb y R. Wellsc, 2017: Critical assessment of jet erosion test methodologies for cohesive soil and sediment. *Geomorphology*, 295, 529–536.
- Kuang S.B., C.Q. LaMarche, J.S. Curtis y A.B. Yu, 2013: Discrete particle simulation of jet-induced cratering of a granular bed. *Powder Technology*, 239, 319–336.
- Lalli F., P. G. Esposito, R. Piscopia y R. Verzicco, 2005: Fluid-particle flow simulation by averaged continuous model. *Computers and Fluids*, 34, 1040-1061.
- López B., G. Usera, G. Narancio, M. Mendina, M. Draper y J. Cataldo, 2015: Progress in Wall Turbulence 2. Understanding and Modelling, 23, 73-82. Capítulo de libro.
- Mendina M., 2018: Simulación numérica de flujos fluido partícula mediante la implementación de un modelo euleriano de una sola fase. Tesis de doctorado en Ingeniería (Mecánica de los Fluidos Aplicada). Universidad de la República, Uruguay. Tutor de tesis: Gabriel Usera
- Mendina M., G. Usera, 2018: Simulación numérica de flujos fluido partícula usando un modelo de mezcál. *Anales del XXVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*. Setiembre 2018, Buenos Aires Argentina (artículo aceptado).
- Mendina M., M. Draper, A. P. Kelm, G. Narancio y G. Usera, 2014: A general purpose parallel block structured open source incompressible flow solver. *Cluster Computing*, 17 (2), 231 – 241.
- Mercier F., S. Bonelli, P. Pinettes, F. Golay, F. Anselmet y P. Philippe, 2014: Comparison of CFD simulations with experimental Jet Erosion Tests results. *J. of hydraulic engineering, American Society of Civil Engineers*, 140 (5): 04014006, 1 – 11.
- Qian Z., H. ZiaoQuing, H.WenXin y X.WanYun, 2010: Numerical simulation of sediment erosion by submerged jets using an Eulerian model. *Science China, Technological Sciences*, 53 (12), 3324-3330.
- Usera, G., A. Vernet, y J. A. Ferré, 2008: A parallel block-structured finite volume method for flows in complex geometry with sliding interfaces. *Flow, Turbulence and Combustion*, 81 (3), 471-495.
- Usera, G., Chreties C., M. Mendina, G. Simarro y L. Teixeira, 2010: Avances en la modelación numérica del fenómeno de socavación local en pilas. *Memorias del XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica*. Uruguay.