

ESTUDIO DE FLUJO TURBULENTO CARGADO CON PARTÍCULAS SÓLIDAS A TRAVÉS DE UN CANAL

María J. Torres

mtorres@unet.edu.ve

Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad Nacional Experimental del Táchira
Av. Universidad. Paramillo. San Cristóbal-Venezuela

Javier García

garcia@etsii.upm.es

Departamento de Ingeniería Energética y Fluidomecánica. ETSII Universidad Politécnica de Madrid- España

Resumen. En el presente trabajo se estudia el flujo turbulento cargado con partículas sólidas a través de un canal. Para ello se utiliza un programa comercial de dinámica de fluidos computacional, cuyo esquema de discretización es el de volúmenes finitos. La fase fluida (aire) se estudia mediante un enfoque Euleriano y la fase dispersa (partículas sólidas) mediante un enfoque Lagrangiano; respecto al acoplamiento hidrodinámico entre las fases, solo se considera la acción de la fase fluida sobre la fase dispersa (one-way coupling) para una concentración másica determinada. Se desarrolla un estudio de convergencia de malla y los resultados numéricos se comparan con datos experimentales.

Palabras clave: Flujo turbulento con partículas sólidas

1. INTRODUCCIÓN.

El flujo turbulento cargado con partículas sólidas constituye uno de los casos de flujo multifásico de mayor complejidad y aplicación en el campo de la ingeniería. En el presente trabajo se resuelve inicialmente el flujo turbulento incompresible monofásico (aire) a través de un canal usando las ecuaciones RANS. Una vez resuelto el flujo monofásico se incluyen partículas sólidas y se estudia el efecto que tiene el fluido sobre la dinámica de las mismas. Los resultados obtenidos son comparados con datos experimentales.

2. SOLUCIÓN DEL CAMPO DE FLUJO DE LA FASE DE TRANSPORTE (AIRE).

2.1 Descripción de la geometría.

En la Fig. 1 se muestra el canal, el cual está constituido por dos placas planas paralelas separadas entre sí por una distancia 2δ , siendo δ el semiancho del canal.

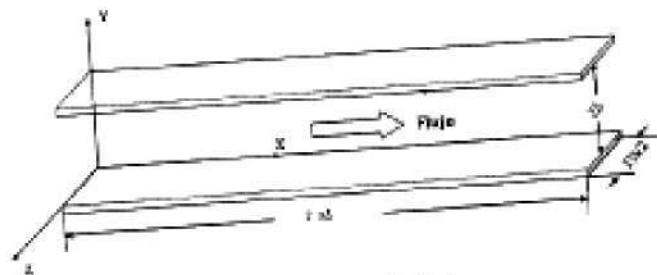


Fig. 1. Canal de flujo

2.2 Características de la malla.

Se utiliza una malla estructurada de elementos *hexaédricos* de 8 nodos. El espaciamento es uniforme en las direcciones "x" y "z" y no uniforme en la dirección "y". La distribución de nodos en la dirección "y" se realiza usando una función de estrechamiento que pretende agrupar mayor cantidad en las cercanías de la pared igualmente distribuidos a ambos lados de la línea central del canal.

2.3 Ecuaciones gobernantes.

Las ecuaciones que gobiernan el flujo de aire a través del canal son: continuidad (Ec.(1)) y cantidad de movimiento (Ec.(2)):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial}{\partial x_i} (u_i u_j) \right) = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \overline{\rho u_i u_j} \right] \quad (2)$$

2.4 Detalles computacionales de la solución del campo de flujo de la fase de transporte usando ecuaciones RANS.

En la Tabla 1, se especifican los detalles relacionados con el método de solución de las ecuaciones RANS:

2.1 Descripción de la geometría.

En la Fig. 1 se muestra el canal, el cual está constituido por dos placas planas paralelas separadas entre sí por una distancia 2δ , siendo δ el semiancho del canal.

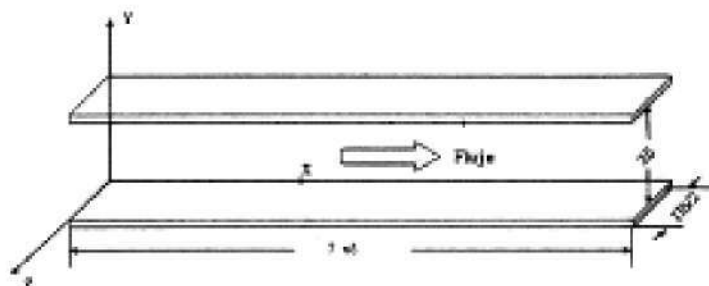


Fig. 1. Canal de flujo

2.2 Características de la malla.

Se utiliza una malla estructurada de elementos *hexaédricos* de 8 nodos. El espaciamiento es uniforme en las direcciones "x" y "z" y no uniforme en la dirección "y". La distribución de nodos en la dirección "y" se realiza usando una función de estrechamiento que pretende agrupar mayor cantidad en las cercanías de la pared igualmente distribuidos a ambos lados de la línea central del canal.

2.3 Ecuaciones gobernantes.

Las ecuaciones que gobiernan el flujo de aire a través del canal son: continuidad (Ec.(1)) y cantidad de movimiento (Ec.(2)):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial}{\partial x_k} (u_k u_i) \right) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \overline{\rho u_i u_j} \right] \quad (2)$$

2.4 Detalles computacionales de la solución del campo de flujo de la fase de transporte usando ecuaciones RANS.

En la Tabla 1, se especifican los detalles relacionados con el método de solución de las ecuaciones RANS:

Tabla 1. Detalles de la estrategia de solución con RANS.

Ítem	Selección
Método de solución.	Segregado implícito
Esquema de discretización del término convectivo.	MUSCL
Esquema de discretización del término difusivo.	Diferencias centrales
Esquema de interpolación de la presión.	PRESTO
Método de acoplamiento presión-velocidad.	SIMPLE
Método de solución de las ecuaciones lineales	Gauss-Seidel.
Modelo de turbulencia	$\kappa-\epsilon$ estándar

2.5 Condiciones iniciales y de frontera.

Como condición inicial se impone un campo de velocidad uniforme $u = 10.35 \text{ m/s}$, correspondiente a la velocidad promedio calculada a partir del número de Reynolds basado en el semiancho del canal ($Re_s = 13800$). Los valores iniciales de energía cinética turbulenta y tasa de disipación, se estiman a partir de la intensidad turbulenta en la línea media del canal y la altura de la capa límite reportados por Kulick, Fessler and Eaton [1]. Respecto a las condiciones de frontera, se especifica un perfil de velocidad uniforme en dirección normal a la entrada del canal; presión de descarga igual a la atmosférica, intensidad turbulenta a la entrada del dominio igual a 4% y longitud de escala turbulenta $l = 0.02 \text{ m}$.

2.6 Estudio de convergencia de malla.

Para la determinación del índice de convergencia de malla (GCI por sus siglas en inglés), de acuerdo a la metodología propuesta por la AIAA [2], se emplea como variable global el coeficiente de arrastre definido como $C_f = \tau_w / (1/2 \rho U_s^2)$, donde τ_w es el esfuerzo cortante en la pared del canal y U_s es la velocidad promedio del flujo. En la Tabla 2, se presentan las dimensiones de las mallas desarrolladas y el índice de convergencia de la malla más fina.

Tabla 2. Índice de convergencia de malla

Malla	Dimensiones	C_f	GCI^{21}
1	146 x 96 x 64	0.007300	3.11%
2	98 x 64 x 43	0.007642	

El GCI^{21} calculado indica que existe una diferencia porcentual igual a 3.11% entre el coeficiente de arrastre calculado con la malla fina (malla 1) y el que pudiera obtenerse con malla con espaciamiento $h=0$ (solución extrapolada). Este valor indica una convergencia de malla adecuada; de acuerdo a lo anterior se emplea la malla 1.

2.7 Resultados.

Inicialmente, el análisis de resultados está sobre la base de comprobar el cumplimiento de la ley de pared en la capa logarítmica, para ello se representan el perfil u' vs. y' para el caso actual y el perfil teórico (Fig. 2).

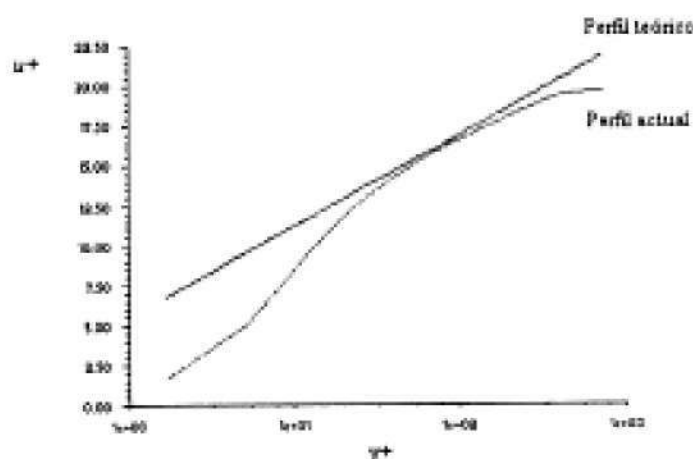


Fig. 2. Perfiles de velocidad del aire (teórico y actual)

En la figura anterior se observa una buena aproximación entre el perfil de velocidad de la simulación con RANS y el perfil teórico en la zona logarítmica; también se observa en la subcapa viscosa el perfil de velocidad lineal.

3. INCLUSIÓN DE LA FASE DISPERSA.

Una vez resuelto el campo de flujo de la fase de transporte (aire), se procede a la inclusión de las partículas sólidas, las cuales se consideran esféricas, lisas y sin efectos de transferencia de calor y/o masa. Se emplean datos correspondientes a diversas concentraciones máxicas de partículas sólidas de cobre.

3.1 Ecuaciones gobernantes.

A continuación se presentan las ecuaciones que gobiernan la dinámica de las partículas sólidas, escritas con un enfoque Lagrangiano son:

$$u_p = \frac{dx}{dt} \quad (3)$$

$$\frac{du_p}{dt} = \frac{1}{\tau_p} (u - u_p) + a_{\text{Lagrangiana debida a fuerzas derivadas de momentos externos}} \quad (4)$$

Respecto a las fuerzas que actúan sobre las partículas, se considera la fuerza gravitatoria (en la misma dirección y sentido del flujo de transporte) y la fuerza de arrastre viscoso (se toma el coeficiente de arrastre esférico); dado que en todos los casos $\alpha_p^{(1)} \ll 1$ no se toma en cuenta la colisión entre partículas (flujo diluido), asimismo la relación $\rho_p/\rho_f \gg 1$, por lo que no se considera la fuerza de Basset, ni la fuerza de inercia del fluido desplazado por la partículas. Los choques con las paredes del canal se consideran elásticos con coeficientes de restitución iguales a 1. La inyección de partículas se lleva a cabo desde una superficie creada en la entrada del canal, la cual tiene 8556 celdas aproximadamente equiláteras. La velocidad de las partículas en la inyección coincide con la velocidad del fluido. Seguidamente se resuelve el flujo turbulento cargado con partículas sólidas. Se estudia un caso en el que se emplean partículas de cobre. En la Tabla 3, se muestran detalles del caso descrito.

Tabla 3. Caso de estudio: partículas de cobre de diferente diámetro.

N° partículas	Diámetro (μm)	ρ_p (kg/m^3)	ϕ (%)	α_p	τ_p (ms)	St
8556	70	8800	2	2.8e-06	130.37	67.5

La Figura 3, muestra los perfiles de velocidad de partículas de cobre de diferentes diámetros y del fluido, obtenidos en la simulación.

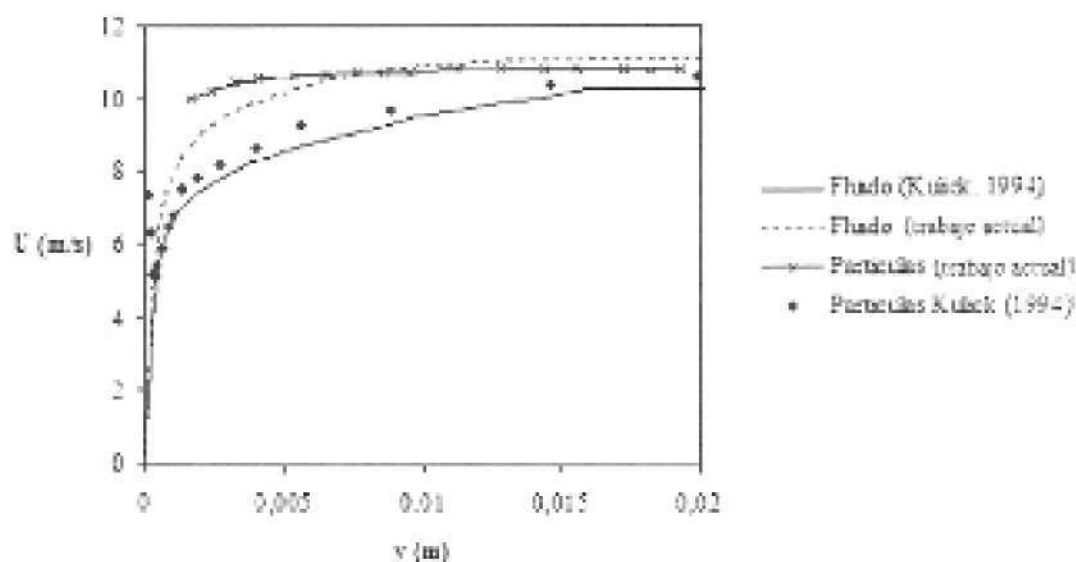


Fig. 3. Perfiles de velocidad de las partículas y del fluido

En cuanto al perfil de velocidad de las partículas se observa que es más plano que el del fluido en el caso experimental y en la simulación objeto del trabajo. Sin embargo en los resultados obtenidos por Kulick et al. [1], se observa que las partículas de cobre se aceleran en

mayor medida en las cercanías de la pared y su velocidad es superior a la del fluido a lo largo del semiancho del canal, la velocidad de deslizamiento de la partícula es positiva.

En el perfil de las partículas obtenido en la simulación, se observa que las mismas tienen una velocidad de deslizamiento positiva en las cercanías de la pared pero la misma decrece y se hace negativa hacia el centro del canal. Esto puede deberse a la influencia de la inercia de las partículas y a la pérdida de energía que las mismas experimentan cuando chocan con las paredes del canal sobre la incapacidad de mantenerse con una velocidad mayor que la del gas.

Conclusiones

En el presente trabajo se desarrolló la simulación de flujo turbulento cargado con partículas sólidas a través de un canal. La solución obtenida con las ecuaciones RANS es bastante aproximada a la solución teórica pero con las limitaciones de precisión de la solución de todas las escalas de la turbulencia impuestas por el uso del modelo.

Las partículas poseen una velocidad inferior a la del fluido (en el centro del canal), lo cual es congruente con el número de Stokes correspondiente al caso simulado.

REFERENCIAS

- [1] Kulick, J. D., Fessler, J. R., Eaton, J. K. *Particle response and turbulence modification in fully developed channel flow*. J. Fluid Mech, 277: 109-134, 1984.
- [2] AIAA, *Guide for the Verification and Validation of Computational Fluid Dynamics Simulations*, G-077-1998.