

**XXV CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
SAN JOSÉ, COSTA RICA, 9 AL 12 DE SETIEMBRE DE 2012**

**SIMULACION NUMERICA DE FLUJOS TURBULENTOS EN UNA
CAVIDAD FORZADA.**

Mariana Mendina y Gabriel Usera

*IMFIA Facultad de Ingeniería-Universidad de la República, Uruguay
mmendina@fing.edu.uy gusera@fing.edu.uy*

RESUMEN:

La gran mayoría de los problemas resueltos por la ingeniería están estrechamente vinculados a flujos que se desarrollan en dominios de geometría compleja y en forma turbulenta. Existen diferentes técnicas que permiten la modelación numérica de flujos en estas condiciones. Los códigos CFD juegan un rol crucial en el análisis de estos problemas, siendo capaces de resolver explícitamente el flujo entorno a obstáculos y permitiendo capturar la topografía específica de un determinado emplazamiento. Sin embargo, estos modelos muestran cierta sensibilidad de los resultados al esquema de representación de turbulencia. El objetivo de este trabajo es mejorar la capacidad el modelo numérico *caffa3d.MBRi*, de uso libre, para la simulación de flujos turbulentos en situaciones intrincadas. Con este propósito se compara la performance del modelo al variar el esquema de parametrización de la turbulencia, imitando la simulación numérica de una cavidad forzada realizada por Zang et al 1993 (Z93) del experimento realizado por Prasad et al 1989 (P89); donde se incorporan al modelo dos esquemas LES dinámicos y se comparan los resultados con el esquema actual. Los resultados muestran que el modelo *caffa3d.MBRi* representa adecuadamente el flujo turbulento que resulta del experimento P89 y los obtenidos por Z93, observándose una mejora apreciable al aplicar esquemas LES dinámicos frente al esquema básico de Smagorinsky.

ABSTRACT:

Most of the problems solved by engineering are closely linked to turbulent flows which develop in domains with complex geometry. There are different techniques for numerical modeling of flows in these conditions. CFD codes play a crucial role in the analysis of these problems, being able to solve explicitly the flow around obstacles and enabling to capture the specific topography of a given site. However, the results of these models show some sensitivity to the representation scheme of turbulence. The objective of this work is to improve the numerical model *caffa3d.MBRi*, code free, for the simulation of turbulent flows in complex situations. For this purpose we compare the performance of the model by varying the turbulence parameterization. This is done by following the numerical simulation performed by Zang et al 1993 (Z93) of the experiment of Prasad et al 1989 (P89) developed in a lid-driven cavity. Two different LES dynamic schemes were used in the model and the results were compared with the current scheme. Results show that the *caffa3d.MBRi* model adequately represents the turbulent flow that arises in P89 and Z93 experiments. A significant improvement is observed in applying dynamic LES schemes as compared to the basic Smagorinsky scheme.

PALABRAS CLAVES: simulación numérica, turbulencia, *caffa3d.MB*

INTRODUCCIÓN

La gran mayoría de los problemas resueltos por la ingeniería están estrechamente vinculados a flujos que se desarrollan en dominios de geometría compleja y en forma turbulenta. Existen diferentes técnicas que permiten la modelación numérica de flujos en estas condiciones. Debido a la necesidad de resolver todas las escalas que intervienen en un problema, la Simulación Numérica Directa (DNS) es realizable a costos computacionales razonables siempre que se manejen bajos números de Reynolds (Re). A medida que los números de Re aumentan, la multiplicidad de escalas participantes en estos problemas obliga a recurrir a esquemas de parametrización para representar algunos procesos de forma de acceder a costos y tiempos de cómputo razonables. Es necesario recurrir a otras técnicas, por ejemplo los modelos RANS (Reynolds Average Navier Stokes). Si bien estos modelos son muy útiles a la hora de modelar un gran número de flujos turbulentos, éstos empiezan a mostrar ciertas dificultades en la representación de patrones fuertemente no estacionarios. Los modelos de grandes vórtices (LES) son una alternativa a este problema. A un costo computacional mayor que los RANS, resuelven explícitamente las grandes escalas y modelan las escalas más pequeñas. Existen un gran número de modelos LES y la clave del éxito de estos modelos se centra en la forma en que se modelan las escalas subgrilla (SGS).

Por lo expresado en el párrafo anterior, los códigos CFD han jugado un rol crucial en el análisis de problemas asociados a la ingeniería, siendo capaces de resolver explícitamente el flujo entorno a obstáculos y permitiendo capturar la topografía específica de un determinado emplazamiento. La sensibilidad de los resultados de estos modelos al esquema de representación de turbulencia así como de las condiciones de borde ha sido estudiada previamente por Bitsuamlak et al 2004 donde se hace una revisión sobre el estado del arte en la simulación numérica de flujos de viento sobre diferentes terrenos; Blocken and Carmeliet 2004 analizando aplicaciones de winddriven rain y su impacto sobre la fachada de edificios, Meroney 2004 en el estudio de la dispersión de contaminantes; entre otros. En particular, el estudio de la simulación numérica de una CLA homogénea ha sido un tema de crucial interés encontrándose incongruencias a la hora de la utilización de CFD (Richard and Younis 1990, Riddle et al 2004, Franke and Frank 2005, etc).

Existe un gran número de trabajos que utilizando CFD resuelven problemas de dispersión de contaminantes, confort eólico, driven rain, micrositing de emprendimientos eólicos etc (Blocken et al 2007, Xueling and Fei 2005, Brigggen et al 2009, Dayan 2006).

En este trabajo se busca mejorar la capacidad del modelo numérico `caffa3d.MBRi`, de uso libre, para la simulación de flujos turbulentos en situaciones intrincadas. Con este propósito se compara la performance del modelo al variar el esquema de parametrización de la turbulencia. Para esto, se imita la simulación numérica de una cavidad forzada realizada por Zang et al 1993 (Z93) del experimento realizado por Prasad et al 1989 (P89); donde se incorporan al modelo dos esquemas LES dinámicos para la simulación de la turbulencia y se comparan los resultados con el esquema actual.

DESCRIPCION DEL MODELO NUMERICO

El modelo numérico `caffa3d.MBRi` implementa el método de los volúmenes finitos en mallas curvilíneas estructuradas por bloques, para flujos incompresibles viscosos o turbulentos, mediante el método SIMPLE de acople velocidad - presión. Ha sido desarrollado en Fortran 90, he incorpora estrategias de paralelización masiva en memoria compartida mediante las librerías MPI. Este modelo ha sido desarrollado recientemente en el IMFIA por los autores de este artículo, y es una evolución de su antecesor, el modelo `caffa3d.MB` (Usera et al, 2008).

El modelo `caffa3d.MB` ha sido desarrollado y validado en el IMFIA, en el marco de un

proyecto financiado por el Fondo Clemente Estable 2007 y del Programa de Desarrollo Tecnológico 2006. Se ha tomado como base para este desarrollo el modelo caffa3d.MB [Usera et al 2008], el cual consiste en una implementación paralela del método de los volúmenes finitos para las ecuaciones de Navier-Stokes. Este modelo base permite trabajar con mallas curvilíneas estructuradas por bloques, lo que permite la resolución numérica de flujos en situaciones intrincadas dando gran versatilidad en el diseño del dominio de cálculo. Este sistema de malla sólo requiere atención especial en la interface entre bloques. Ejemplos de posibles interfases entre diferentes bloques pertenecientes a un mismo dominio se resumen en la figura 1.

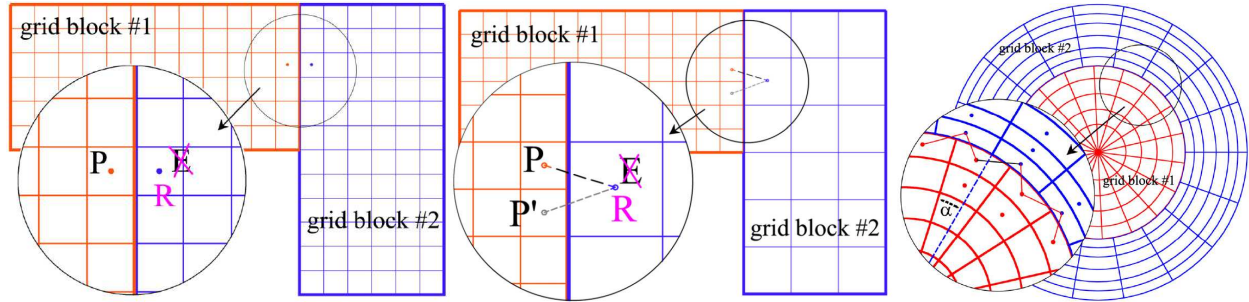


Figura 1.- Ejemplos de uniones entre interfases de bloques en el caffa3d.MB. Figuras extraídas de Usera et al 2008.

MODELO DE TURBULENCIA

El modelo caffa3d.MB_{Ri} tiene un esquema LES para resolver la turbulencia que sigue el esquema de Smagorinsky 1963. Para este trabajo se han incorporado los modelos LES dinámicos de turbulencia descritos por Germano et al 1991 (GO) y por Bardina (BA) descrito en Zang et al 1993.

En el esquema más básico de los modelos LES (Smagorinsky 1963), la viscosidad turbulenta ν_T , es calculada asumiendo que las pequeñas escalas están en equilibrio y por tanto la producción de energía es igual a la disipación. Esto lleva a una expresión del tipo:

$$\nu_T = (C_s \Delta)^2 |\bar{s}| \quad ; \quad |\bar{s}| = (2s_{ij}s_{ij})^{1/2} \quad [1]$$

Donde Δ es el tamaño del filtro (proporcional al tamaño de la grilla), s_{ij} las componentes del tensor deformación y C_s es la constante de Smagorinsky. En este esquema, C_s permanece constante en todo el dominio. Dado que los gradientes de velocidad cerca de las paredes son muy fuertes, la viscosidad turbulenta en estos casos se vuelve muy grande obligando a disminuir el tamaño de las celdas de cálculo para mejorar la modelación.

En el esquema de GO, C_s no es elegida arbitrariamente sino que se recurre a un esquema dinámico que tiene en cuenta las características locales del flujo. Para este cálculo, se aplica a la ec. Navier Stokes (NS) además del filtro base (dado por la resolución de la malla: Δ) un segundo filtro test ($\cap$) de forma que $\hat{\Delta} = 2\Delta$.

Introduciendo estos operadores en las ecuaciones se llega a (Germano et al 1991):

$$C_s = -\frac{L_{ij}M_{ij}}{2M_{ij}M_{ij}} \quad [2]$$

$$M_{ij} = \widehat{\Delta}^2 |\widehat{S}| s_{ij} - \Delta^2 \widehat{S} ; S = |\overline{S}| \overline{S}_{ij} \quad [3]$$

$$L_{ij} = T_{ij} - \widehat{\tau}_{ij} = \widehat{V}_{ij} - \widehat{\bar{v}}_i \widehat{\bar{v}}_j ; V_{ij} = \bar{v}_i \bar{v}_j \quad [4]$$

Donde τ_{ij} y T_{ij} representan las tensiones SGS asociadas a Δ y $\widehat{\Delta}$ y L es el tensor de dinámico de Leonard, que representa las tensiones SGS entre estas dos escalas. La CS calculada de esta forma se sustituye en la ecuación [1] para calcular la nueva viscosidad dinámica.

En este modelo, se considera que las tensiones rasantes varían en forma similar al tensor deformación según la ecuación [5] donde la viscosidad está dada por la ecuación [1]:

$$\tau_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \tau_{kk} = -2\nu_T \bar{S}_{ij} \quad [5]$$

El modelo de BA trabaja en forma idéntica al de GO, agregando un término adicional en las tensiones [6] considerando características más generales del flujo por medio del tensor del Leonard:

$$\tau_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \tau_{kk} = -2\nu_T \bar{S}_{ij} + L_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} L_{kk} \quad [6]$$

EXPERIMENTO

El experimento consiste en una cavidad forzada con una velocidad impuesta en la tapa superior (u_B). El dominio se basa en una cuba prismática de sección rectangular de ancho H y altura D , con una longitud B . En la malla de cálculo utilizada por Z93, las celdas son uniformes a lo largo de H (coord. z), mientras que a lo largo de D (coord. y) y B (coord. x) se expanden desde las paredes hacia el centro de la cuba. Para este trabajo se utiliza una malla similar a la de Z93 según las características expresadas en la tabla 1. El dominio se representa mediante 4 bloques similares, usando condiciones de velocidad nula en todas las paredes a menos de la pared superior donde se impone la velocidad u_B (figura 2).

Tabla 1.- Características del dominio de cálculo de las simulaciones

Relación	Celdas de cálculo (x,y,z)	$\Delta x_{\min}/B$	$\Delta y_{\min}/B$
B:D:H			
1:1:0.5	(64,64,32)	5×10^{-3}	5×10^{-3}

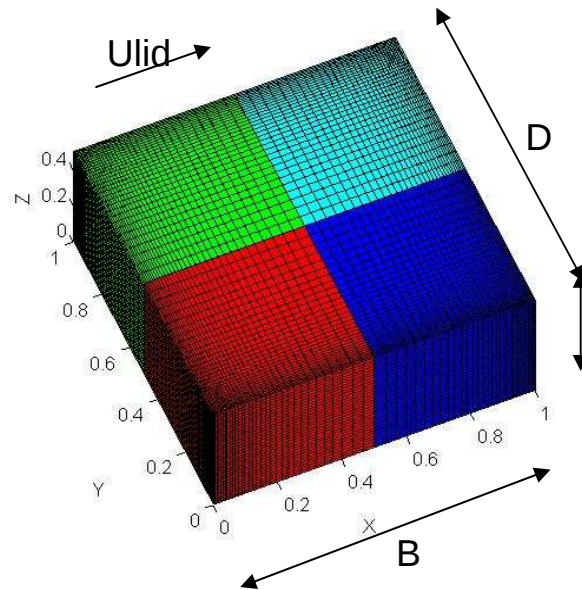


Figura 2.- Esquema del dominio de cálculo del experimento de Z93 utilizado en las simulaciones con el *caffa3d.MBRi*.

Con este dominio de cálculo se realizaron tres simulaciones numéricas variando el esquema utilizado para la parametrización de la turbulencia: la simulación SY utiliza el esquema básico de Samgorinsky con $C_s = 0.16$, la simulación GO utiliza el modelo de Germano y la BA el modelo de Bardina.

Se trabajó con un $Re = 10000$, calculado a partir de la fórmula [7].

$$Re = u_B B / \nu \quad [7]$$

Siendo ν la viscosidad cinemática del agua ($1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$).

RESULTADOS

En la figura 3 se muestra los perfiles de velocidades u y v normalizadas con la velocidad u_B en los planos medios obtenidos del dominio en la simulación realizada por Z93 para este número de Reynolds, superpuestos a los resultados experimentales de P89. La figura 4 muestra los resultados análogos obtenidos en las simulaciones realizadas con el *caffa3d.MBRi*.

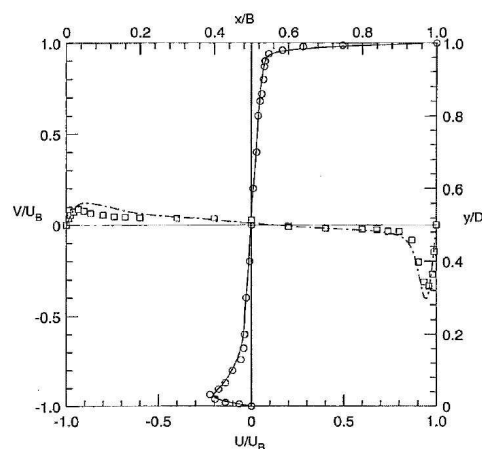


Figura 3.- Velocidades u/u_B y v/u_B en los planos medios (media temporal). Líneas llenas: simulación Z93, o Δ : medidas experimentales P89. $Re = 10000$

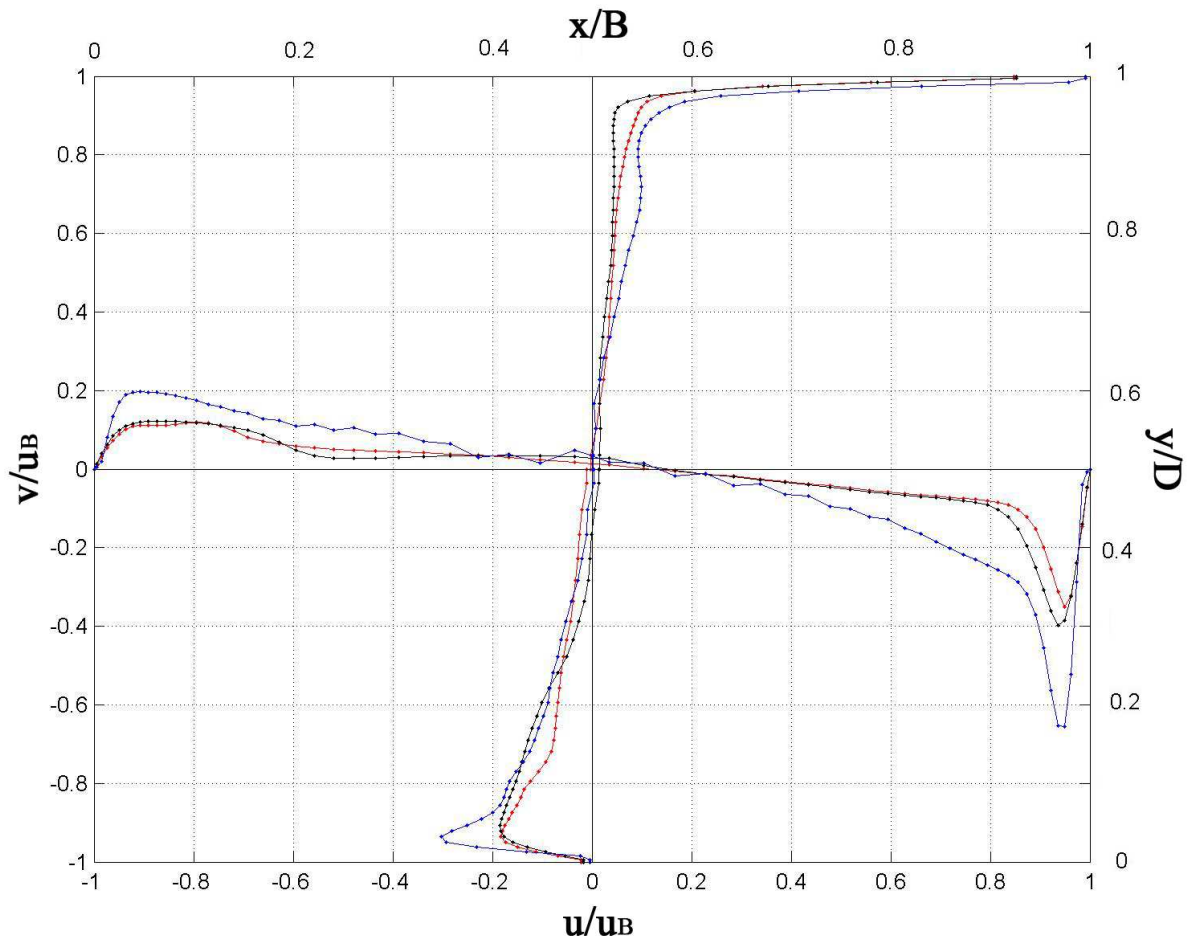


Figura 4.- Velocidades u/u_B y v/u_B en los planos medios (media temporal). Simulaciones con el `caffa3d.MBRi`, azul:Smagorinsky, negro: Germano y rojo: Bardina. $Re = 10000$

Las figura 5 muestra los resultados de la media temporal de la viscosidad total (viscosidad turbulenta más viscosidad molecular) en los planos medios para las diferentes simulaciones realizadas con el `caffa3d.MBRi`.

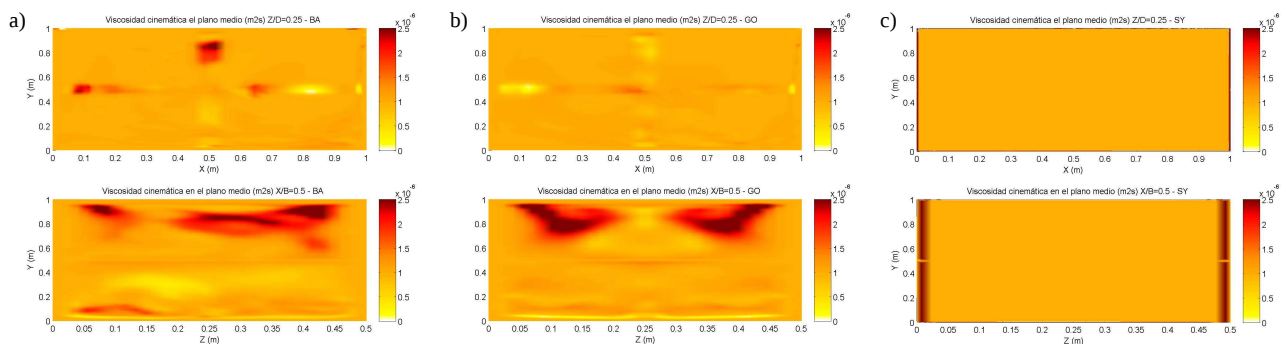


Figura 5.- Viscosidad cinemática en los planos medios (media temporal). Simulaciones con el `caffa3d.MBRi`, a) Smagorinsky, b) Germano y c) Bardina. $Re = 10000$

Las figura 4 muestra que las tres simulaciones presentan comportamientos cualitativamente similares a los obtenidos en Z93 y P89, sin embargo y tal como era de esperar, las simulación SY exagera los valores de las velocidades en las zonas cercanas a las paredes. Las simulación con los esquemas dinámicos (GO y BA) tienen además un comportamiento cuantitativo adecuado, representando muy bien los máximos de los perfiles de velocidad, siendo la simulación BA la más

aproximada a las medidas experimentales de P89. En la figura 5 se pueden ver la viscosidad total en las tres simulaciones. Tanto la simulación GO como la BA presentan resultados de viscosidad turbulenta considerablemente menores a la molecular, y se puede concluir por tanto que la turbulencia está bien representada en estas simulaciones. En el caso SY, la viscosidad turbulenta sobre las paredes es considerablemente mayor que la molecular, mostrando que el esquema actual no funciona correctamente en estos lugares.

CONCLUSIONES

Se puede concluir que el modelo `caffa3d.MBRi` representa adecuadamente el flujo turbulento que resulta del experimento de P89, observándose una mejora apreciable al aplicar los esquemas LES dinámicos de Germano y Bardina frente al esquema básico de Smagorinsky.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Bitsuamlak, G.T., Stathooulos, T., Bedard, C. (2004): "Numerical evaluation of wind flow over complex terrain: review". *Journal of Aerospace Engineering* 17 (4), 135-145

Blocken, B. and Carmeliet, J. (2004): "A review of wind-driven rain research in building science". *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 92 (13), 1079-1130

Blocken, B., Stathopoulos, T., Carmeliet, F. (2007): "CFD simulation of the atmospheric boundary layer: wallfunction problems". *Atmospheric Environment* 41(2): 238-252

Briggen, P.M., Blocken, B., Schellen, H.L. (2009): "Wind-driven rain on the façade of a monumental tower: numerical simulation, full-scale validation and sensitivity analysis". *Building and Environment* 44 (8): 1675-1690

Dayan E. (2006): "Wind energy in buildings: Power generation from wind in the urban environment—where it is needed most". *Refocus* 7(2), 33-8.

Franke, J., Frank, W. (2005): "Numerical simulation of the flow across an asymmetric street intersection". In: Náprstek, J., Fisher, C. (Eds), *Proceedings of the 4EACWE*, 11-15 July 2005, Prague, Czech Republic.

Germano, U. Piomelli, P. Moin, and W. H. Cabot (1991): "A dynamic subgrid-scale eddy viscosity model," *Phys. Fluids A* 3, pp. 1760-1765.

Meroney, R. N. (2004): "Wind tunnel numerical simulations of pollution dispersion: a hybrid approach". Working paper, Croucher Advanced Study Institute on Wind tunnel Modelling, Hong Kong University of Science and Technology, 6-10. December 2004, 60pp.

Prasad K. ,J. R. Koseff (1989): "Reynolds number and end-wall effects on a lid-driven cavity flow," *Phys. Fluids* Vol 1 N°2, 208-218

Smagorinsky J. (1963): "General circulation experiments with the primitive equations.: I. The basic experiment," *Mon. Weather Rev.* 91-99.

Richards, P. J., Younis, B. A. (1990): "Comments on Prediction of the wind-generated pressure distribution around buildings by E. H. Mathews". *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 34, 107-110

Riddle, A., Carruthers, D., Sharpe, A., McHugh, C., Stocker, J. (2004): "Comparisons between FLUENT and ADMS for atmospheric dispersion modelling". *Atmospheric Environment* 38 (7), 1029-1038. *Atmospheric Research*, 96 (4), 656-664

Usera G., A. Vernet, J.A. Ferré (2008): "A Parallel Block-Structured Finite Volume Method for Flows in Complex Geometry with Sliding Interfaces". *Flow Turbulence and Combustion Journal*, Vol. 8, 471-495.

Xueling, C. and Fei, H. (2005): "Numerical Studies on Flow Fields Around Buildings in an Urban Street Canyon and Cross-Road". *Adv. In atmospheric Sciences*, 22 (2), 2090-299

Zang Y., R. L. Street, J.R. Koseff (1993): "A dynamic mixed subgrid-scale model and its application to turbulent recirculating flows". *Phys. Fluids* Vol 5 (12), 3186-3196