

Caracterización numérico-experimental del vórtice adyacente al escalón de un conducto con contracción

Oscar A. Morales Contreras^A, Juan G. Barbosa Saldaña^B,
José A. Jiménez Bernal^B, Claudia del Carmen Gutiérrez Torres^B

^A Centro Universitario Internacional de México. Campus Querétaro Grupo
CEDVA, Querétaro, Querétaro

^B Instituto Politécnico Nacional, México D. F.
oamc07@yahoo.com.mx , jbarbosas@ipn.mx ,
jjimenezb@ipn.mx , cguierrez@ipn.mx



Vórtice formado en la costa de Japón después del tsunami de marzo de 2011. Fuente: Reuter.

RESUMEN

En este trabajo se presenta el análisis del comportamiento del flujo en un conducto rectangular con escalón. El número de Reynolds es calculado en función de la altura del escalón ($Re_h=500$) para un conducto con relación de aspecto y contracción de 4 y 2 respectivamente. El estudio numérico se realiza con el programa desarrollado en esta investigación denominado FLUSS, bajo la plataforma de Fortran 95, para discretizar las ecuaciones de momento y continuidad se utiliza la técnica de volúmenes finitos, y el algoritmo SIMPLE para ligar el campo de velocidad y la distribución de presiones en el dominio. Para el estudio experimental se utiliza la técnica láser de velocimetría de imágenes de partículas (PIV). Los resultados experimentales y numéricos presentan una diferencia de 6%.

PALABRAS CLAVE

Simulación numérica, técnica de volúmenes finitos, vórtice helicoidal, técnica de PIV.

ABSTRACT

This paper presents the fluid flow analysis in a rectangular channel with a forward facing step (FFS). Reynolds number is calculated based on the height step ($Re_h=500$) for a channel with aspect and contraction ratio equal 4 and 2 respectively. The numerical study is performed with the developed program denominated FLUSS, the code is based on the finite volumes technique and the SIMPLE algorithm, in the experimental study is used the laser technique particle image velocimetry (PIV). The experimental and numerical results compared have a difference of 6%.

KEYWORDS

Numerical simulation, finite volume technique, vortex spiral, PIV technique.

INTRODUCCIÓN

La separación y recirculación del flujo son fenómenos encontrados en diferentes equipos industriales tales como difusores, válvulas y álabes de turbina. Estos fenómenos generan principalmente caída de presión en los equipos, condición que bajo ciertas circunstancias puede ser no deseada debido a las pérdidas que se originan. Sin embargo, en algunos casos la separación y recirculación son inducidas para mejorar las condiciones de transferencia de calor y masa.¹ Un ejemplo clásico donde se puede encontrar la separación y recirculación del flujo se tiene en un conducto rectangular que presenta cambios en su geometría. Estos cambios se obtienen al variar la sección transversal para reducir el área del conducto (FFS), para ampliar el área del mismo (BFS) y si se presentan ambos casos se trata de una cavidad.²

Los dos últimos casos mencionados han sido ampliamente estudiados por los investigadores, mientras que el flujo en conductos con contracción (FFS) ha tomado relevante interés sólo en las últimas décadas, por lo que algunos detalles respecto a los efectos tridimensionales de las estructuras del flujo en este tipo de conductos aún no han sido completamente analizadas. También es importante visualizar que este tipo de problemas son considerados tipo o patrón para validar códigos numéricos.³

Es importante mencionar que los conductos con escalón son de gran importancia en la industria, ya que son ampliamente utilizados en el sector alimenticio, en sistemas de tuberías en reactores químicos y en procesos de elaboración de polímeros.⁴

Cuando existe un flujo en un conducto rectangular con escalón (FFS) se distinguen dos regiones de separación de flujo que originan dos vórtices: uno previo al escalón y otro en la parte superior del mismo.⁵ Estos son originados por el cambio brusco en la geometría del conducto. El vórtice está definido por su longitud (r) en la dirección axial, su altura (a) en la dirección vertical y las coordenadas centrales del mismo (x' , y') como se muestra en la figura 1.

Durante los últimos años los estudios que se han realizado para analizar la separación de flujo en conductos rectangulares con escalón consideran conductos que presentan relaciones de aspecto mayores a diez ($RA=b/h$), esta consideración

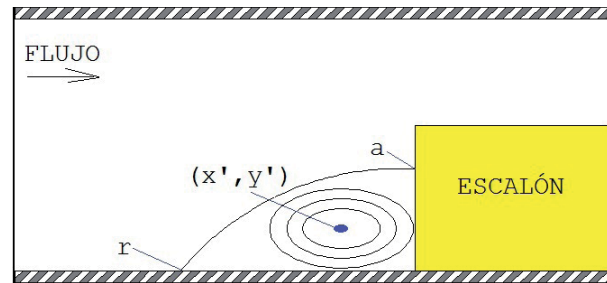


Fig. 1. Nomenclatura para describir el vórtice.

permite reducir el análisis a casos bidimensionales, por lo tanto, no se tiene un análisis completo del comportamiento del vórtice que se forma frente al escalón a lo largo del eje transversal.⁶

De los primeros estudios que trataron el flujo en un conducto rectangular con escalón se encuentra el de Moss y Backer,⁷ en sus resultados reportan que la altura del vórtice en el centro del conducto está relacionada con la altura del escalón y tiene un valor de $0.6h$ a $0.7h$, además mencionan que la zona de recirculación es una estructura de flujo tridimensional.

Un trabajo reciente que trata el flujo en conducto con escalón es el de Largeau y Morieniere,⁸ en su investigación experimental utilizaron la técnica de velocimetría de imágenes de partículas (PIV) para estudiar un flujo turbulento y tres relaciones de aspecto. Entre sus resultados más importantes reportan que a medida que disminuye la relación de aspecto se incrementa la longitud del vórtice que se forma frente al escalón, pero la coordenada (y') no varía.

Otro estudio que analiza el problema de separación de flujo en un conducto rectangular con escalón es el de Fiorentini *et al.*⁹ Ellos estudiaron el comportamiento del vórtice utilizando la técnica de PIV cuando un flujo turbulento fluye a través de un conducto con una $RA > 10$. Ellos concluyen que la altura del vórtice que se forma antes del escalón, no varía si se incrementa la velocidad, pero que el vórtice que se forma sobre el escalón aumenta su longitud a medida que se incrementa el número Reynolds.

Una investigación más que analiza el comportamiento del flujo en un conducto con escalón es la de Chiang y Sheu.¹⁰ Esta simulación numérica fue realizada utilizando la técnica de discretización de volúmenes finitos. Las condiciones geométricas

del conducto rectangular analizado fueron $RA=24$ y relación de contracción ($RC=H/h$) de 1.33. Chiang y Sheu encontraron que la zona de recirculación adyacente al escalón se comporta como un vórtice que se mueve en forma de espiral a lo largo del eje z . También encontraron que la altura y longitud de la zona de recirculación en el plano central del conducto tienen un valor de $0.33h$ y $0.63h$ respectivamente, para $Re_h=555$.

Finalmente, uno de los trabajos mas importantes que trata el estudio de la zona de recirculación formada en un conducto con escalón es el de Stüer *et al.*¹¹ En su investigación trabajaron con flujo laminar ($Re_h=330$) y un escalón de 0.01m de altura para tener condiciones geométricas de $RC=4$ y $RA>10$. Utilizan la técnica de visualización de flujo con burbujas de hidrógeno y miden los campos de velocidad con la técnica PTV. Concluyen que el fluido contenido dentro de la zona de recirculación es transportado paralelamente al escalón hacia las paredes laterales para poder continuar su trayectoria, y reportan que la altura del vórtice en el centro del conducto es de $0.75h$.

METODOLOGÍA NUMÉRICA

En esta investigación se realiza un código numérico denominado FLUSS, basado en la técnica de volúmenes finitos para discretizar las ecuaciones para flujo laminar en estado estable definidas en las ecuaciones (1) a la (4). Por medio de la técnica antes mencionada se discretizan las ecuaciones empleando un arreglo de malla dislocada y no uniforme. El acoplamiento de las ecuaciones de momento y continuidad se realiza mediante el algoritmo SIMPLE,¹² finalmente las ecuaciones discretizadas son reordenadas en forma de matriz tridiagonal, la cual se resuelve por medio del algoritmo de Thomas.¹³

El dominio computacional utilizado se muestra en la figura 2, el cual tiene una $RA=4$ y $RC=2$, los resultados son parametrizados en función de la altura del escalón ($h=0.02m$). El número de Reynolds analizado es de 500 y el fluido de trabajo utilizado es aire con condiciones estándar.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] \quad (2)$$

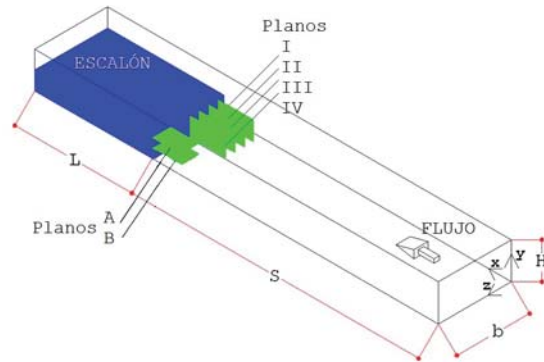


Fig. 2. Dominio computacional.

$$\rho \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right] \quad (3)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right] \quad (4)$$

Donde: u , v y w son las componentes de la velocidad.

Las condiciones de frontera impuestas sobre el dominio computacional son:

Perfil de velocidad uniforme a la entrada:

$$u = \bar{u}; v = 0; w = 0.$$

Condición de no deslizamiento en las paredes:

$$u = v = w = 0$$

Condición de flujo completamente desarrollado a la salida:

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} \Big|_{x_{sal}} = 0 \quad \text{Donde: } \phi = u, v, w \text{ y } p.$$

Se utiliza una malla no uniforme en las 3 direcciones y para determinar el número de elementos a utilizar en el dominio computacional se realiza un estudio de independencia de malla, el valor característico para declarar la independencia es la altura de zona de recirculación en el plano central, los resultados se muestran en la tabla I.

Tabla I. Independencia de malla.

Malla [x:y:z]	Altura (a)	Diferencia $\frac{a_A - a_j}{a_A}$
A) 210:80:80	0.720h	
B) 210:60:80	0.718h	0.3%
C) 210:60:60	0.700h	2.8%
D) 180:80:80	0.695h	3.5%

Con los resultados obtenidos de este estudio se decidió trabajar con una malla de 210:60:80 elementos en las direcciones x, y, z, respectivamente, la malla no uniforme utilizada se muestra en la figura 3.

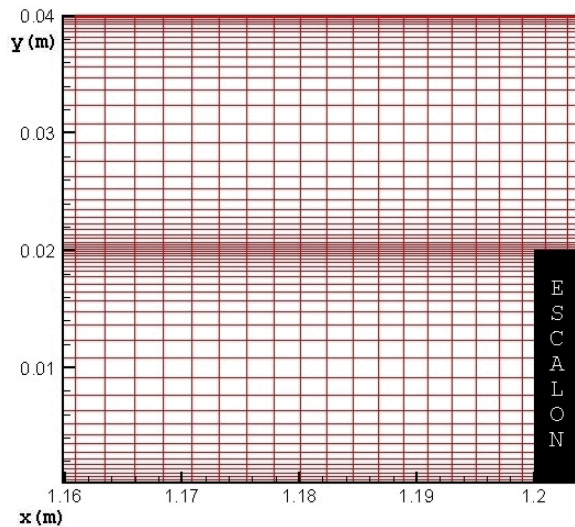


Fig. 3. Malla utilizada en dominio computacional.

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

El estudio experimental se realiza en el túnel de viento (figura 4) del Laboratorio de Ingeniería Térmica e Hidráulica Aplicada (LABINTHAP) del Instituto Politécnico Nacional. Las dimensiones utilizadas son las mismas que las impuestas en el dominio computacional. El túnel de viento consta de una entrada acampanada, la cual permite que el flujo sea uniforme en la sección de entrada, como indica la norma ANSI,¹⁴ el túnel tiene sección de entrada de 1.2m para obtener flujo desarrollado en la zona de pruebas, finalmente se tiene una pieza de transformación para conectar el túnel de viento con

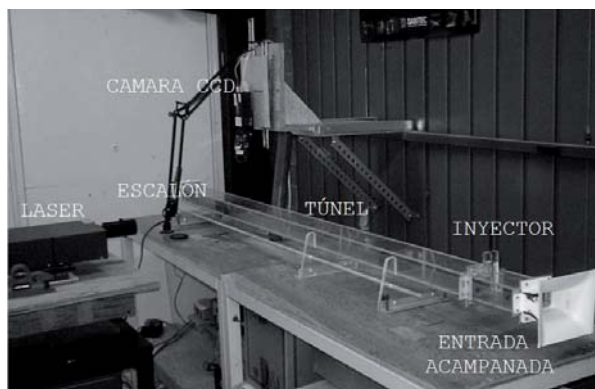


Fig. 4. Túnel de viento del LABINTHAP.

el ventilador (marca Otto de 5 paletas) y disminuir la pérdida de presión en el túnel tal como explica Barlow *et al.*¹⁵

El sistema de velocimetría de imágenes por partículas (PIV) cuenta con una cámara CCD de alta resolución (1600x1186 pix) Kodak Megaplug 1.0, un láser gemelo Nd:YAG de alta energía (400mJ) y el sistema de adquisición de datos FlowManager. Las partículas trazadoras inyectadas son obtenidas con un generador de humo de la marca TEKNOVA®, que utiliza aceite mineral y permite obtener partículas con diámetro promedio de 10µm. Las condiciones del medio ambiente son monitoreadas con el sistema meteorológico Digiquartz®.

RESULTADOS

Para analizar la zona de recirculación frente al escalón se colocan 6 planos en diferentes posiciones tal como se indica en la tabla II y se muestra en la figura 2. Las tablas III y IV presentan los resultados obtenidos experimental y numéricamente de la caracterización de la zona de recirculación.

Tabla II. Planos analizados.

Plano	Posición
I	$z = 0.125b$
II	$z = 0.250b$
III	$z = 0.375b$
IV	$z = 0.500b$
A	$y = 1.0h$
B	$y = 0.5h$

Tabla III. Resultados experimentales.

Plano	x'/h	y'/h
I	0.29	0.32
II	0.38	0.31
III	0.41	0.31
IV	0.42	0.30

Tabla IV. Resultados numéricos.

Plano	a/h	r/h	x'/h	y'/h
I	0.66	1.53	0.24	0.33
II	0.72	1.65	0.36	0.29
III	0.72	1.90	0.41	0.31
IV	0.72	2.03	0.42	0.32

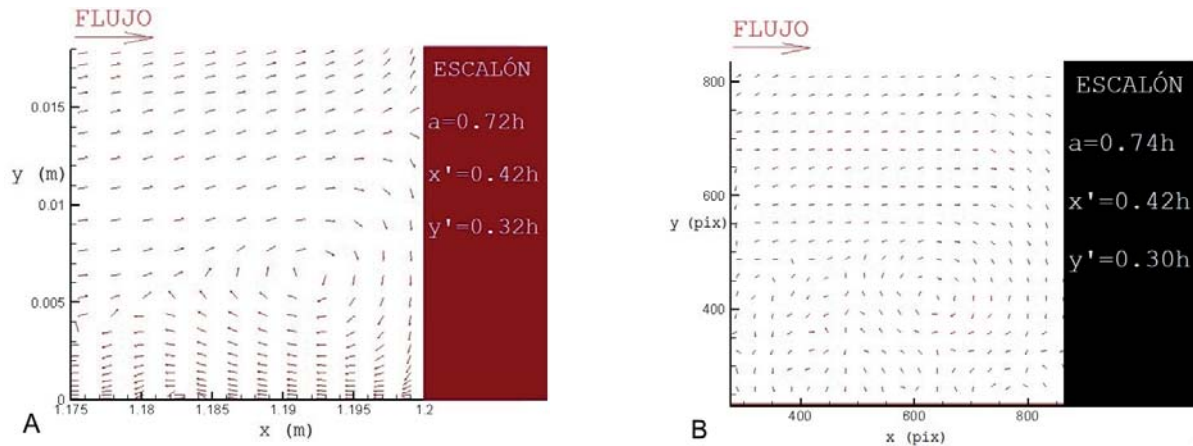


Fig. 5. Campo de velocidades en el plano central obtenido con A) FLUSS y B) PIV.

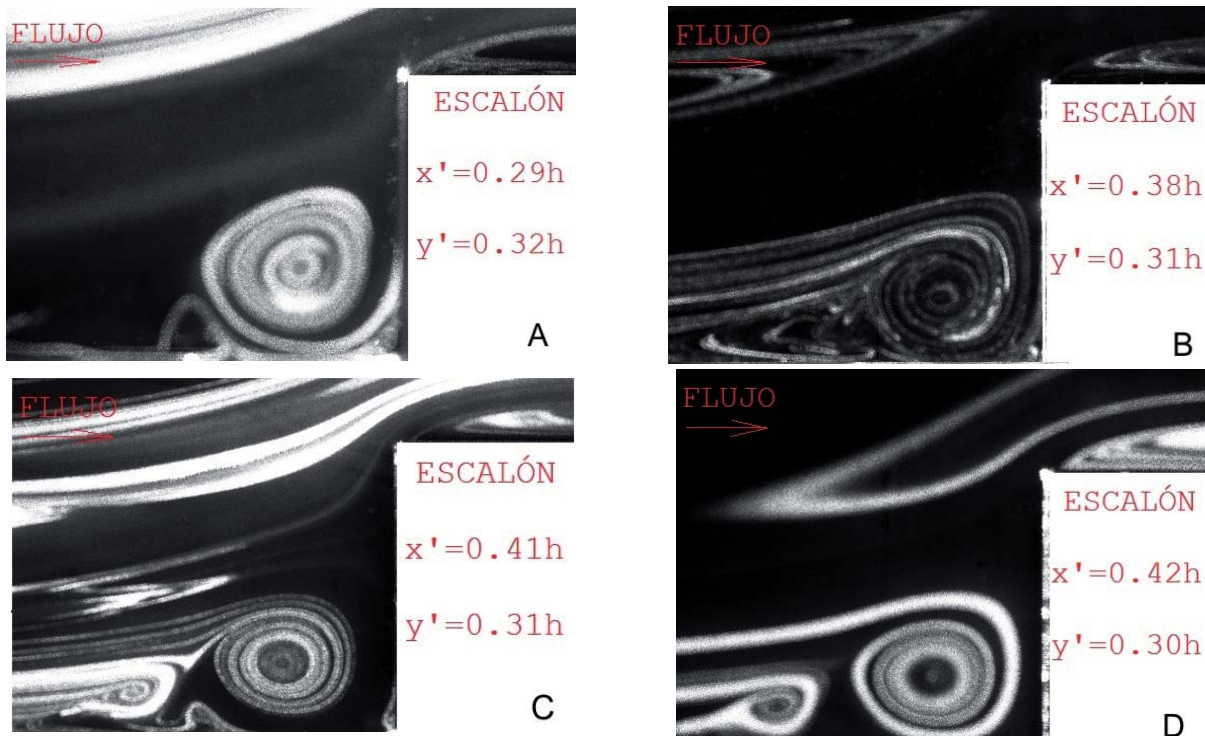


Fig. 6. Resultados experimentales: A) plano I, B) plano II, C) plano III y D) plano IV.

En la figura 5A) se muestra el campo de velocidad en el plano central del conducto obtenido mediante el programa FLUSS y en la figura 5B) el obtenido experimentalmente. La diferencia entre los resultados experimentales y numéricos en el plano central es de 6%, mientras que en los resultados obtenidos en el plano cercano a la pared la diferencia es mayor, esto se debe a la cantidad de elementos colocados en la malla para el análisis de esa zona, sin embargo se puede considerar que el programa puede reproducir satisfactoriamente el fenómeno analizado.

Los resultados reportados en la tabla III tienen un valor de incertidumbre de aproximadamente 0.2%, este porcentaje fue calculado con respecto al valor promedio de las mediciones obtenidas de una serie de 90 imágenes.¹⁶ Se encontró que la coordenada x' disminuye su valor a medida que el flujo se aproxima a la pared, mientras que la coordenada y' lo incrementa.

En la figura 6 se observa el vórtice encontrado experimentalmente y en la figura 7 se muestran los resultados numéricos para los diferentes planos analizados en el eje z .

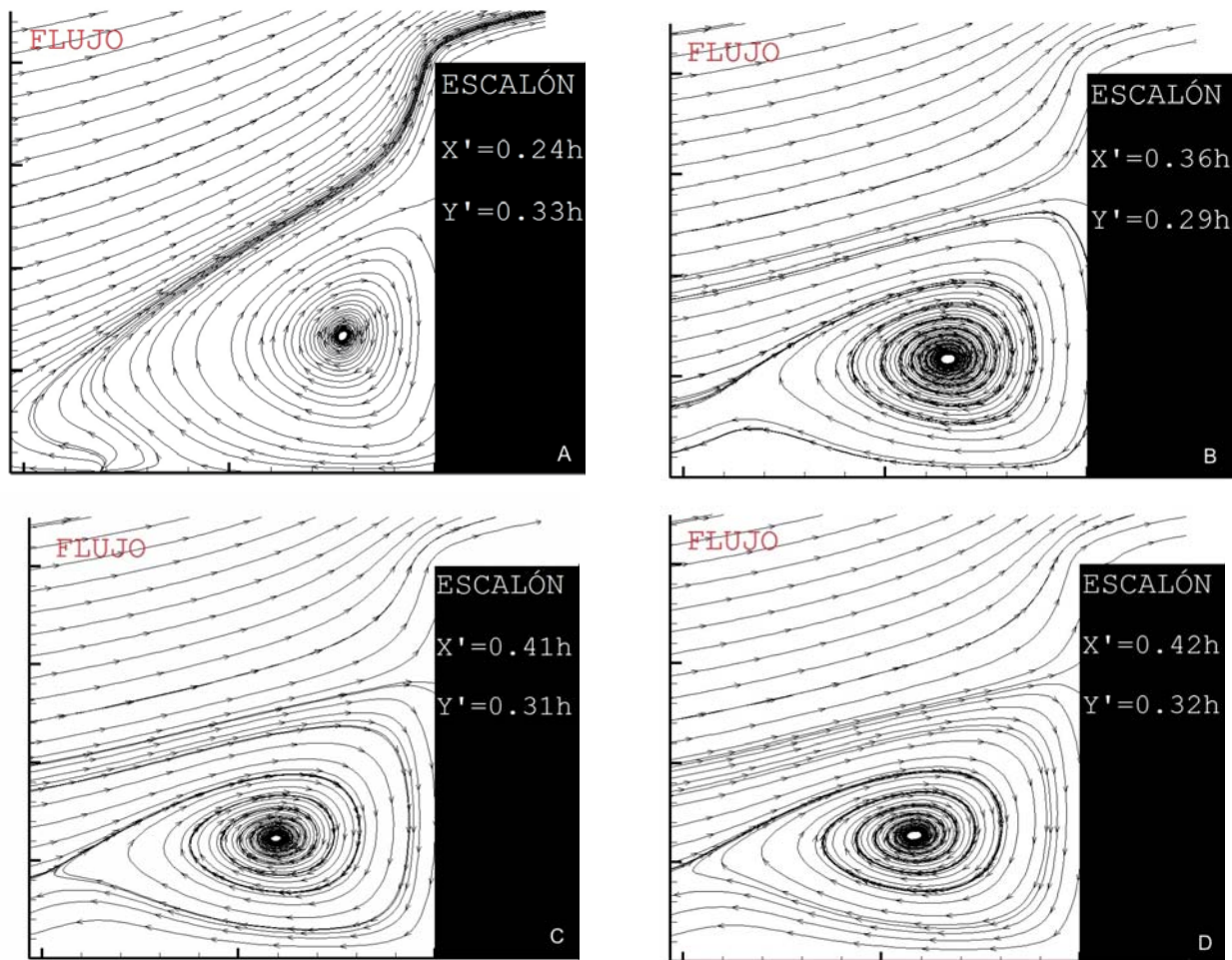


Fig. 7. Resultados numéricos: A) plano I, B) plano II, C) plano III y D) plano IV.

De los resultados puede apreciarse que la forma del vórtice en el plano central es cuasi-circular bien definida, típica de un vórtice simple como lo especifica Freymuth,¹⁷ pero cerca de la pared (en el plano I) el vórtice tiene forma alargada y no uniforme, esto se debe al crecimiento de la capa límite en la pared (efectos de la viscosidad). La forma del vórtice no cambia de manera importante en el centro del conducto, comportándose de manera similar en los planos II, III y IV, por lo que gran cantidad de fluido se concentra en el centro del conducto y se desplaza hacia las paredes. En las imágenes también se observa un vórtice secundario, justo antes del vórtice principal, tal y como lo describe Freymuth *et al.*,¹⁷ esta zona de recirculación secundaria se origina por el choque del flujo que intenta salir de la zona de recirculación en la dirección axial, y el flujo que llega de la sección de entrada.

Los resultados indican que existe otra zona de separación en la parte superior del escalón, originada

por el cambio en la geometría del conducto aunque de menor intensidad que el vórtice principal, esta zona en algunos libros es descrita como vena contracta, la cual ocasiona caída de presión en el conducto.

De los resultados numéricos además se encontró que la longitud (r) en el plano IV es 25% mayor que en el plano I, y la altura (a) en el plano central es 8% mayor que en el plano cercano a la pared.

En la figura 8 se muestran los planos A y B indicados en la tabla II, se aprecia el desarrollo de la capa límite en la pared lateral, y como se forma un pequeño vórtice paralelo al plano 'y-x' de menor intensidad que el encontrado en el plano 'x-z'.

Finalmente en la figura 9 se muestra como el flujo en la vecindad del escalón se desplaza a lo largo del eje z hacia las paredes laterales, la razón de este particular comportamiento se asocia al efecto de las paredes, es decir, el flujo tiene un mayor momento en la parte central que en la vecindad de las paredes

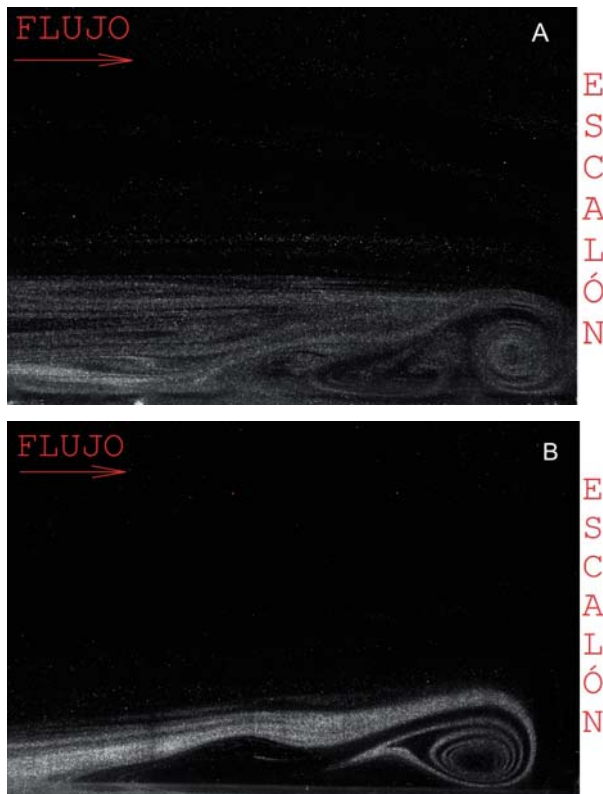


Fig.8. Vista superior de zona de recirculación, planos A y B.

debido a la condición de no deslizamiento impuesta en las mismas, de tal forma que cuando el flujo encuentra el escalón, este último actúa como un obstáculo impidiendo el paso del flujo, por lo que el flujo cumple con su naturaleza de conservación de momento y se desplaza hacia las paredes laterales en forma helicoidal.

CONCLUSIONES

En esta investigación se realizó el estudio numérico experimental del flujo laminar a través de un conducto rectangular con escalón para diferentes relaciones de aspecto y diferentes parámetros de Reynolds para analizar el comportamiento tridimensional de la zona de separación adyacente al escalón.

La diferencia entre los resultados numéricos encontrados con el programa desarrollado FLUSS y el estudio experimental presentan una diferencia del 6%, cuando se comparan los resultados en el plano central del conducto.

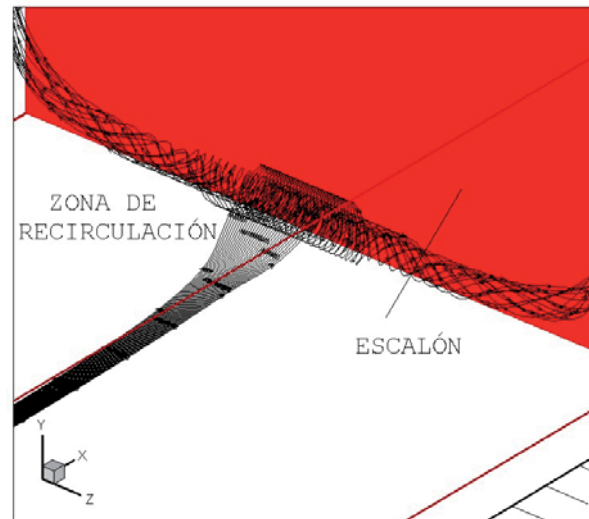


Fig. 9. Vórtice adyacente al escalón a lo largo de eje z.

La zona de recirculación adyacente al escalón se desplaza del centro del conducto hacia las paredes laterales del mismo como un vórtice helicoidal.

Las coordenadas $[x', y']$ del centro del vórtice cambian su posición a medida que éste se aproxima a la pared, y mientras que la coordenada x' disminuye, la coordenada y' se incrementa.

En todos los planos analizados se aprecia la formación de una pequeña zona de recirculación sobre el escalón conocida como vena contracta, pero no puede ser definida completamente.

Finalmente durante el estudio de independencia de malla se encontró que la relación entre las dimensiones del volumen de control más pequeño y el volumen de control más grande no debe ser mayor a 10, ya que para valores mayores se tienen problemas de convergencia.

REFERENCIAS

1. H. Abu-Mulaweh, B. Armaly and T. Chen, Laminar natural convection flow over a vertical forward-facing step, *J. Thermophys. Heat Trans.*, vol. 10, pp. 517–523, 1996.
2. M. Sherry, D. Lo Jacono, J. Sheridan, R. Mathis and I. Marusic, Flow separation characterization of a forward facing step immersed in a turbulent boundary layer, *Sixth International Symposium*

- of Turbulence and Shear Flow Phenomena. pp. 1325-1330, 2009.
3. I. Ali, S. Becker, J. Utzmann and C. Munz, Aeroacoustic study of a forward facing step using linearized Euler equations, *Physica D.*, pp. 1-6, 2008.
 4. D Wilhelm, C. Härtel and L Kleiser, Computational analysis of the two-dimensional-three-dimensional transition in forward-facing step flow, *J. of Scientific Computing.*, vol. 17, 2003.
 5. T. Ando and T. Shakouchi, Flow characteristics over forward facing step and through abrupt contraction pipe and drag reduction, *Res. Rep. Fac. Eng. Mie Univ.* vol. 29, pp.1-8, 2004.
 6. S. Becker, M. Escobar, C. Hahn, I. Ali, M. Kaltenbacher, B. Basel and M. Grunewald, Experimental and numerical investigation of the flow induced noise from a forward step, 11^a AIAA/CEAS. AIAA 2005-3006, 2005.
 7. W. Moss and S. Baker, Recirculating flows associated with two-dimensionnal steps, *Aero Q* 32. pp. 693-704, 1979.
 8. J. Largeau and V. Moriniere, Wall pressure fluctuations and topology in separated flows over a forward facing step, *Exp. Fluids.* 2007, vol. 42, pp. 21-40.
 9. E. Fiorentini, R. Camussi, F. Pereira, M. Felli, G. Aloisio and A. Di Marco, Velocity and wall pressure correlations over a forward step flow, *Advances in Turbulence XI.* 2007. vol. 117.
 10. T. Chiang and T. Sheu, Numerical studies of a three-dimensional flow in suddenly contracted channels, *Physics of Fluid.* 2002. vol. 14, pp. 1601-1616.
 11. H. Stüer, A. Gyr and W. Kinzelbach, Laminar separation on a forward-facing step, *Eur. J. Mech. B/Fluids.* 1999. vol. 18, pp. 675-692.
 12. S. V. Patankar, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Taylor & Francis, Philadelphia. 1980.
 13. J. Tu, G. Heng and C. Liu, *Computational Fluid Dynamics a Practical Approach*, Ed. Elsevier. First Edition. 2008.
 14. American National Standard, *Laboratory Methods of Testing Fang for Rating*, ANSI/AMCA 210-85, AMCA Standard, ANSI/ASHRAE. 1985.
 15. J. Barlow, W. Rae and A. Pope, *Low-speed wind tunnel testing*, Wiley-Interscience Publication, Third Edition. 1999. pp. 80-83.
 16. R. Figliola and D. Beasley, *Mediciones mecánicas teoría y diseño*, Ed. Alfaomega, 3a Edición. México D.F., 2003.
 17. P. Freymuth, F. Finaish and W. Bank, Three dimensional vortex patterns in a starting flow, *J. Fluids Mech.* 1986. vol. 161, pp. 239-248.

