

Estudio Numérico-Experimental de Zona de Separación en Conducto Rectangular con Escalón

Oscar Adrián Morales Contreras¹, Juan Gabriel Barbosa Saldaña,
José Alfredo Jiménez Bernal, Claudia del Carmen Gutiérrez Torres,
Luis Alfonso Moreno Pacheco, Pedro Quinto Diez

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

SEPI ESIME Zacatenco

Laboratorio de Ingeniería Térmica e Hidráulica Aplicada.

Av. Instituto Politécnico Nacional s/n, Edificio 5, 3er Piso

Unidad Profesional Adolfo López Mateos, Zacatenco

Colonia Lindavista, C.P. 07738, México, D.F. México

Tel.: 57296000. ext: 54783 y/o 54882.

¹oamc07@yahoo.com.mx

Abstract

The separation and reattachment for a laminar flow through of a forward facing step channel (FFS) was numerically and experimentally studied in this work. Three different Reynolds numbers (269, 365, 530) were analyzed and in order to considered the strong flow tri-dimensionality, the channel aspect ratio was set equal to four ($RA=4$). Hence the relevance and importance of the present work. The numerical study was done by means of the software Fluent 6.3®, while the experimental study was carried out using the particle image velocimetry (PIV) and a method of smoke visualization. The results showed that the height of the separation zone is not influenced by the Reynolds, whereas its length depends on the u -velocity. The comparison of the numerical and experimental results is acceptable, for example, when measuring at the center of the channel, the height of the separation zone is $0.74h$ and $0.71h$ for experimental and numerical analysis respectively, having a difference around 4%.

Resumen

En este trabajo se estudia numérica y experimentalmente el comportamiento de la zona de separación que se forma cuando un flujo laminar circula a través de un conducto rectangular con contracción súbita (FFS). Se analizaron tres diferentes regímenes de Reynolds (269, 365, 530) para una relación de aspecto de cuatro ($RA=4$) con lo cual los efectos tri-dimensionales cobran importancia y por ende la relevancia e importancia de este trabajo. El estudio numérico se realizó por medio del software comercial Fluent 6.3®, mientras que en el estudio experimental se utilizaron las técnicas de velocimetría de imágenes de partículas (PIV) y de visualización con humo. Los resultados indican que la altura de la zona de separación no está en función del número de Reynolds, mientras que la longitud de la misma en la dirección axial si depende de la velocidad del flujo. La comparación de los resultados numéricos y experimentales presentan diferencias aceptables, así por ejemplo, cuando se mide en el centro del conducto la altura de la zona de separación encontrada experimentalmente para un $Re=269$ es de $0.74h$ mientras que numéricamente es de $0.71h$, por lo cual la diferencia es del orden del 4%.

Key words:

Flow separation, forward facing step channel, numerical simulation, vortex, PIV.

Palabras clave:

Separación de flujo, conducto rectangular con escalón, simulación numérica, vórtice, PIV.

Nomenclatura.

a Altura de zona de separación (m).

b Ancho del conducto (m).

e Coeficiente de expansión.

h Altura de escalón (m).

H Altura de conducto a la entrada (m).

L Longitud de salida (m).

$l_{(n)}$ Distancia entre nodos.

N Número total de nodos.

n Nodo actual.

p Presión (Pa).

r Longitud de zona de separación (m).

RA Relación de aspecto [b / h].

RC Relación de contracción [H / h].

Re Número de Reynolds [$\bar{u}rh / \mu$].

S Longitud de entrada (m).

u, v, w Componentes de la velocidad (m/s).

x, y, z Ejes de coordenadas.

\bar{u} Velocidad promedio en la entrada (m/s).

x' Coordenada axial del centro de vórtice (m).

- y' Coordenada vertical del centro de vórtice (m).
 ρ Densidad (1.225 kg./m^3).
 μ Viscosidad ($1.78 \times 10^{-5} \text{ kg/m-s}$).

Introducción

La separación de flujo es un fenómeno que se encuentra de forma natural en diferentes dispositivos y equipos industriales tales como difusores, válvulas y alabes de turbina. En algunos otros casos este fenómeno se induce para mejorar la transferencia de calor como los intercambiadores de calor compactos o para establecer mejores condiciones de mezclado como el caso de una cámara de combustión [Mulaweh, 1996].

Ocasionalmente la separación y recirculación de flujo se presenta en conductos rectangulares donde el área por la cual pasa el fluido se amplía o reduce súbita o gradualmente de una sección a otra, como puede presentarse en tuberías de sistemas de enfriamiento y aire acondicionado, en los dispositivos de flujo utilizados en el sector alimenticio y de productos químicos, en procesos de elaboración de polímeros y tubería equipada con deflectores, solo por mencionar algunos casos [Wilhelm, 2002]. La separación y recirculación de flujo que se presenta en conductos rectangulares con contracción súbita genera caída de presión y zonas de separación, además dependiendo de la velocidad del fluido de trabajo se puede producir vibración y ruido en dichos conductos.

La generalización del comportamiento del flujo en un conducto rectangular con contracción súbita (forward facing step, FFS) se observa en la figura 1. Se aprecia una zona de separación y recirculación previa al escalón definida por su longitud (r) en la dirección axial y altura (a) en la dirección vertical. En algunas ocasiones se ha encontrado que se forma una zona de recirculación sobre el escalón, e incluso para Reynolds altos puede presentarse una zona de separación adyacente a la pared superior del conducto.

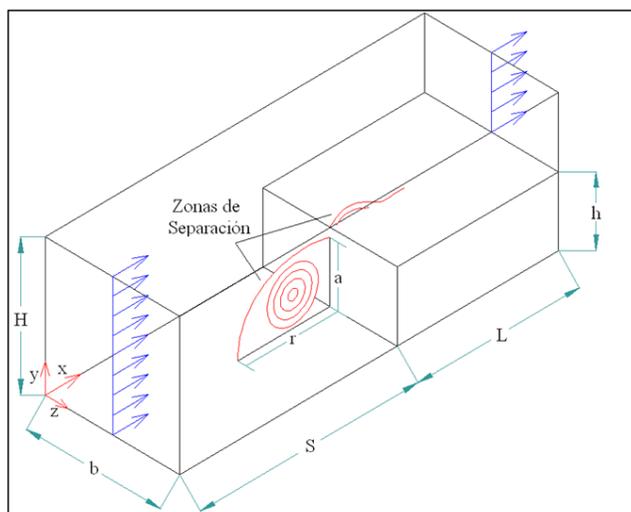


Figura 1. Flujo en conducto rectangular con escalón (FFS).

Durante los últimos 20 años se han realizado estudios numéricos y experimentales para analizar los fenómenos de separación y

reacomodo del flujo en conductos rectangulares con contracción súbita. Sin embargo, la mayoría de éstos solo consideraron el fenómeno de la separación para conductos que presentaban relaciones de aspecto mayores a diez, esta consideración permite reducir el análisis a casos bidimensionales [Largeau y Morieniere, 2007], por lo cual, el análisis del comportamiento tridimensional de la zona de separación no se ha estudiado completamente.

Los primeros estudios de simulación numérica destinados a analizar el flujo en conductos rectangulares con contracción súbita fueron realizados en dos dimensiones. Según Largeau y Morieniere [2007] entre las primeras publicaciones dedicadas a este fenómeno se encuentran las realizadas por Dennis y Smith en 1980 y posteriormente por Mei y Plotkin en 1986, quienes coinciden que las características principales del flujo son la zona de separación y recirculación frente al escalón y una pequeña zona de recirculación sobre el mismo.

Por otra parte, Wilhelm y Kleiser [2002], realizaron un código numérico, empleando los métodos espectrales, en dos dimensiones para el estudio de flujo laminar en un conducto rectangular con una relación de contracción de cuatro. En su publicación reportan resultados para números de Reynolds menores a 1200, y concluyen que las magnitudes de (r) y (a) de la zona de separación se incrementan a medida que aumenta el Reynolds, obteniendo una correlación de $Re^{0.6}$ y $Re^{0.2}$ para la longitud y altura de la zona respectivamente.

Un estudio importante de simulación numérica en tres dimensiones para flujo turbulento es el de Nakamura et al. [2003], quienes utilizan la técnica de simulación numérica DNS. Ellos comparan sus resultados con los obtenidos experimentalmente por Shakouchi et al. [2001]. La comparación muestra un patrón de flujo similar, sin embargo, en el estudio experimental se encontraron tres vórtices en la parte superior del escalón (zonas de recirculación), mientras que en la simulación numérica solo pueden observarse dos. Esta diferencia la atribuyen los autores al hecho de que la malla utilizada en el dominio computacional no es lo suficientemente fina para reproducir por completo el fenómeno.

Otro de los trabajos numéricos que presenta un análisis tridimensional de un FFS es el de Barbosa et al. [2007], en su estudio desarrollaron un código propio basado en el método de los volúmenes finitos y sus resultados son para un conducto con $RA=4$ y $RC=2$ para tres diferentes Reynolds (200, 400 y 800). Entre sus resultados más importantes se encuentra que en la pared superior del escalón se forma un pequeño vórtice cuando se tiene $Re=800$. Además encontraron que los valores de la longitud de la zona de separación para $Re=200, 400$ y 800 son $1.16h, 1.5h$ y $1.67h$ respectivamente.

Por otro lado, el trabajo de Largeau y Morieniere es un análisis experimental de flujo turbulento en un FFS, utilizando la técnica de PIV. Ellos analizaron tres relaciones de aspecto. Entre sus resultados más importantes reportan que a medida que disminuye la relación de aspecto se incrementa la longitud de la zona de separación frente al escalón, pero el centro del vórtice se mantiene en la misma posición.

Finalmente uno de los trabajos experimentales más importantes que trata el estudio de conducto con escalón (FFS) es el de Stüer et al. [1999]. En su investigación trabajaron con un escalón de 0.01m de altura, **RC**=4 y flujo laminar. Para su estudio usan la técnica de visualización de flujo con burbujas de hidrógeno. Concluyen que el fluido dentro de la zona de separación es transportado paralelamente al escalón en dirección del eje “z” y se mueve lentamente. Finalmente reportan un valor para la altura de la zona de separación de 0.75h cuando **Re**=330.

Actualmente el estudio del comportamiento de flujo en la geometría propuesta es de alto interés desde el punto de vista tecnológico debido a la amplia gama de aplicaciones industriales como ya se ha mencionado. Por otra parte, desde el punto de vista académico, la correcta simulación puede considerarse como un problema tipo para la validación de códigos y técnicas numéricas. Sin embargo, la completa descripción y caracterización del fenómeno y de las zonas de recirculación presentes no están completamente definidas, si bien existe una considerable cantidad de estudios dedicados a la separación de flujo debido a un escalón, la mayoría reducen el problema a un fenómeno en dos dimensiones. Por tal razón el objetivo de la presente investigación es describir por medio de un estudio experimental y de un análisis numérico el comportamiento tridimensional de la zona de separación previa al escalón, cuando se tiene flujo laminar en un conducto rectangular con contracción súbita que presenta una **RA**=4.

A continuación se describen los procedimientos numéricos y experimentales utilizados en el desarrollo de este trabajo.

Metodología computacional

El estudio numérico se realizó mediante el software comercial Fluent 6.3. El dominio computacional utilizado en la investigación se muestra en la figura 1, donde la longitud de entrada es **S**=1.22m, la longitud de salida es **L**=0.44m, la altura del conducto es **H**=0.04m, el ancho es **b**=0.08m y se tiene un escalón con altura **h**=0.02m, con lo cual el conducto tiene una **RA**=4 y una **RC**=2. Para efectos de la simulación numérica se considera la condición de simetría en el plano central en la dirección transversal, con lo cual se tiene un ahorro en los recursos computacionales, además se utiliza aire como sustancia de trabajo con densidad de 1.225 kg/m³ y viscosidad dinámica de 1.78x10⁻⁵ kg/m-s. Los números de Reynolds estudiados son 269, 365 y 530, y se calculan en base a la altura del escalón.

Las ecuaciones en estado estable de conservación de masa y momento consideradas para la solución numérica se expresan en forma vectorial en las siguientes ecuaciones [Williams y Baker, 1997]:

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \tag{1}$$

$$\vec{V} \cdot (\nabla \vec{V}) = -\frac{\nabla p}{\rho} + \frac{1}{Re} \nabla \cdot (\nabla \vec{V}) \tag{2}$$

Las condiciones de frontera impuestas sobre el dominio computacional son las siguientes:

- Perfil de velocidad uniforme a la entrada:
 $u = \bar{u}; v=0; w=0$

- Condición de no deslizamiento en todas las paredes:
 $u = v = w = 0$
- Condición de flujo completamente desarrollado a la salida:

$$\left. \frac{\partial \phi}{\partial x} \right|_{x_{sal}} = 0 \quad ; \phi = u, v, w, p$$

- Condición de simetría en plano central en la dirección transversal:

$$\left. \frac{\partial \phi}{\partial z} \right|_{z_{sim}} = 0 \quad ; \phi = u, v, w, p$$

En este trabajo se utiliza una malla no uniforme a lo largo del eje coordenado *x, y* una malla uniforme a lo largo de los otros dos ejes coordenados, como se muestra en la figura 2. El estudio de independencia de malla se realizó con un Reynolds de 269 y se utilizó la longitud de la zona de separación (**r**), como parámetro a comparar entre las diferentes mallas propuestas. En la tabla I se indican los diferentes números de nodos y coeficientes de expansión utilizados para el estudio. El coeficiente de expansión (**e**) determina el porcentaje de incremento en el tamaño de volúmenes de control adyacentes, la cual se calcula con la siguiente ecuación:

$$l_{(n)} = \frac{Li(e^n - 1)}{(e^N - 1)} \tag{3}$$

En la ecuación 3 el lado izquierdo representa el tamaño del volumen de control enésimo, e implica que el tamaño del volumen de control (**i**) va a ser un porcentaje mayor que su predecesor (**i-1**) en la coordenada de la malla.

Tabla I.- Independencia de malla

Caso	Nodos		Coeficiente (e)		Long (m)	%
	Entrada	Salida	Entrada	Salida		
1	611	222	1.0038	1.0105	0.028	-----
2	407	222	1.0057	1.0105	0.0279	0.34
3	306	222	1.0076	1.0105	0.0273	2.15

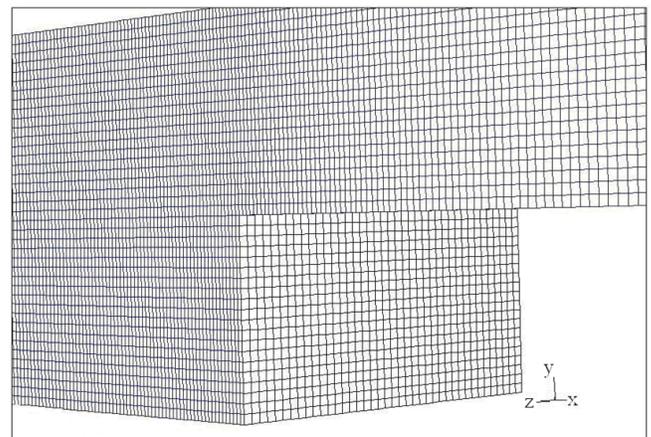


Figura 2.- Acercamiento de la malla cerca del escalón.

Del estudio de independencia de malla se concluye que cuando se utilizan 407 nodos en la sección de entrada se produce una diferencia

menor al 1% a cuando se utilizan 611, por lo que en esta investigación se utiliza una malla con 407:40:40 elementos en la sección de entrada y 222:20:40 en la sección de salida, con los coeficientes de expansión que se indican en el caso 2 de la tabla I.

Metodología experimental.

Para el estudio experimental se construyó un túnel de viento que se encuentra instalado en el LABINTHAP (Laboratorio de Ingeniería Térmica e Hidráulica Aplicada) de la SEPI-ESIME-Z del Instituto Politécnico Nacional, el cual se muestra en la figura 3. El túnel tiene 1.66m de longitud total, una sección transversal de 0.04x0.08m y un escalón de 0.02m de altura. El túnel consta de una entrada acampanada para permitir que el flujo sea uniforme en la entrada y un ventilador a la salida de marca Otto con el cual se pueden estudiar 3 regimenes de Reynolds: 269, 365 y 530, basados en la altura del escalón. Para analizar experimentalmente el comportamiento del flujo se utilizaron tanto la técnica de velocimetría de imágenes de partículas (Particle Image Velocimetry, PIV), así como la técnica de visualización de humo.

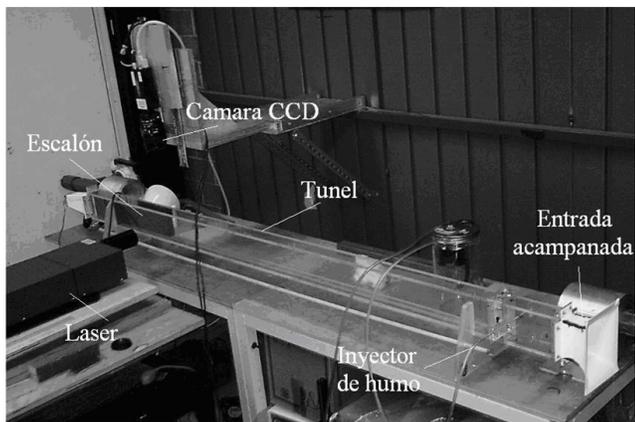


Figura 3.- Túnel de viento instalado en el LABINTHAP.

Para estudiar numérica y experimentalmente el comportamiento de la zona de separación en la dirección transversal (eje z) se consideran 4 planos diferentes a partir del plano central que están separados 10 milímetros uno de otro, como se indica en la figura 4. La ubicación para las posiciones de los planos en el proceso experimental tiene una incertidumbre del 1.7% [Kirkup y Frenkel, 2006] esto es inherente al proceso de alinear el haz del láser y la cámara en la técnica del PIV. En el caso numérico la ubicación de los planos se hace directamente con el software y la incertidumbre en la ubicación se asocia al tamaño de malla en la dirección z .

Para la caracterización de la zona se midieron los siguientes parámetros en todos los planos: longitud (r), altura (a), coordenada del centro del vórtice en eje vertical (y') y eje axial (x'), como se indica en la figura 5. La determinación de los puntos que delimitan la zona de separación (denominados por las letras "r" y "a"), se hace considerando el punto donde los vectores de velocidad cambian de sentido positivo a negativo, es decir donde el esfuerzo de corte tiene un valor de cero. Este procedimiento de determinación es comúnmente utilizado en las investigaciones de separación de flujo. [Nie y Armaly, 2003]

Resultados numéricos y experimentales

A continuación se hará una breve descripción de algunos resultados tanto numéricos como experimentales que se consideran relevantes. Es importante mencionar que la tendencia de los resultados fue similar para los tres regimenes de flujo considerados y por espacio solo se describen a detalle algunos aspectos.

En la figura 6 se presenta las líneas de flujo dentro de la zona de separación encontrada numéricamente para $Re=269$. En esta imagen puede apreciarse como parte del flujo incrementa su velocidad (líneas en color amarillo y rojo) debido a que encuentra un obstáculo en su trayectoria (escalón) y el área transversal súbitamente se reduce. La parte del flujo que no puede continuar su camino se concentra frente al escalón formando la zona de separación (líneas de color azul). El flujo contenido en esta zona se desplaza hacia la pared izquierda a través de un vórtice para poder continuar su trayectoria. Este vórtice disminuye su intensidad a medida que se aproxima a la pared. Este comportamiento del flujo a lo largo del eje "z" es similar para los otros dos regimenes estudiados y también al reportado por Stürer et al. [1999] y Chiang et al. [2002] quienes lo definen como un vórtice helicoidal.

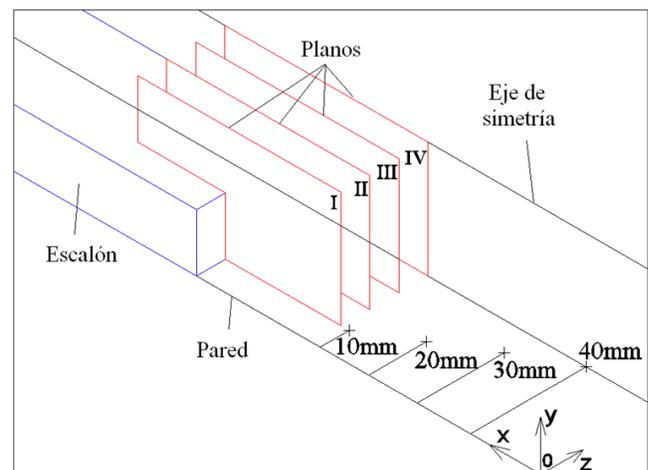


Figura 4.- Planos colocados a lo largo del eje z.

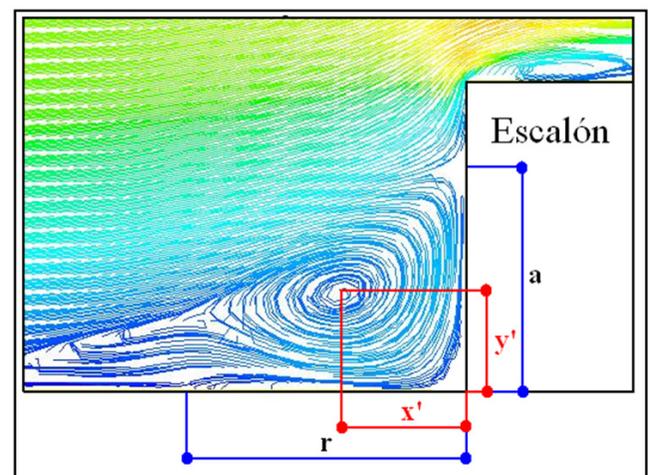


Figura 5.- Nomenclatura para describir la zona de separación.

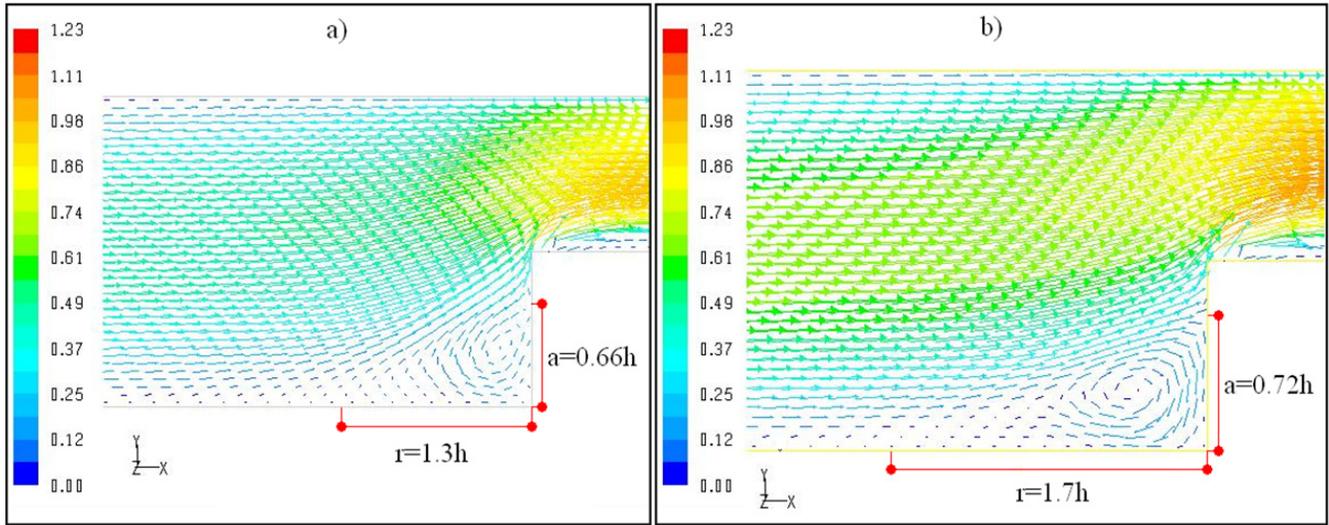


Figura 7.- Zona de separación: a) plano I y b) plano IV para Re=530.

La razón de este particular comportamiento se asocia al efecto de las paredes laterales, es decir, el flujo tiene un mayor momento en la parte central que en la vecindad de las paredes laterales, de tal forma que cuando el flujo encuentra el escalón, este último actúa como un obstáculo impidiendo el paso de la corriente de flujo, por lo tanto el flujo busca cumplir con su naturaleza de conservación de momento y por lo tanto se desplaza hacia las paredes laterales donde la cantidad de movimiento es menor por la condición de no deslizamiento. Por otra parte, la razón de que el vórtice sea helicoidal se atribuye al hecho de que el flujo sube o pasa el escalón en la vecindad de las paredes laterales.

De los resultados numéricos obtenidos en la tabla II puede establecerse que la altura de la zona de separación no modifica su valor a medida que cambia el Reynolds. Así, por ejemplo, el valor de la altura es: $a=0.72h$ con $Re=530$ y $a=0.71h$ para $Re=365$ y 269 , en el centro del conducto (plano IV), estos resultados presentan una diferencia menor al 1%. Por lo anterior puede concluirse que la altura de la zona en el plano central (a) no excederá el 72% de la altura del escalón (h), cuando $269 < Re < 530$.

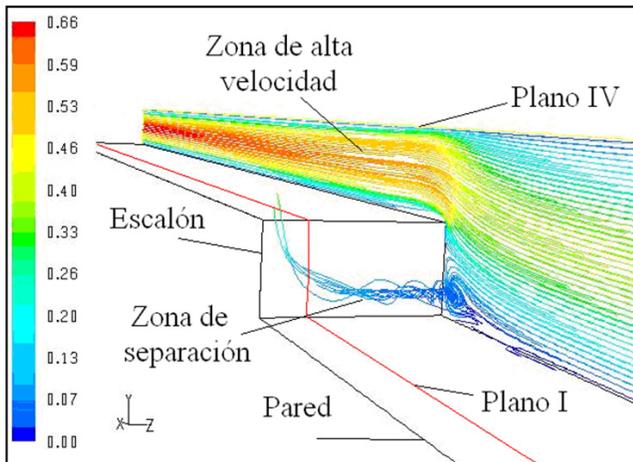


Figura 6. Zona de separación a lo largo de eje "z" (Re=269).

Una de las consecuencias de que el vórtice que se forma sea helicoidal ocasiona que los valores que delimitan la zona de recirculación tanto en la dirección vertical (longitud a) tanto como en la dirección axial (longitud r) tengan diferentes valores a lo largo de la dirección transversal. En la tabla II se muestran los valores numéricos obtenidos de la altura (a) y longitud (r) de la zona de separación, parametrizados en función de la altura del escalón en los diferentes planos transversales a lo largo del eje "z", para los diferentes parámetros de Reynolds considerados en este estudio.

Tabla II.- Resultados numéricos de la altura y longitud de la zona de Separación.

	Re = 269	Re = 365	Re = 530
Plano	a / h	a / h	a / h
I	0.60	0.63	0.66
II	0.70	0.71	0.71
III	0.71	0.71	0.72
IV	0.71	0.71	0.72
	Re = 269	Re = 365	Re = 530
Plano	r / h	r / h	r / h
I	1.1	1.2	1.3
II	1.2	1.3	1.4
III	1.3	1.5	1.6
IV	1.4	1.5	1.7

Por otra parte para el plano I se aprecia que a medida que disminuye el Reynolds la altura de la zona de separación también disminuye su valor (ver figura 6 y tabla II). Este comportamiento puede atribuirse a que el plano I está localizado en la vecindad de la pared lateral y debido al desarrollo de la capa límite en esta pared el vórtice disminuye su altura (hasta desaparecer). La figura 7 ratifica la discusión previa y muestra que el valor de la altura de la zona de separación es menor cerca de la pared ($a=0.66h$) en el plano I, mientras que en el plano IV toma un valor de $0.72h$ para un Reynolds de 530.

Es importante mencionar que los resultados numéricos muestran que sobre el escalón se forma una pequeña zona de recirculación, tal como lo indican otros autores [Barbosa et al.

2007, Nakamura et al. 2003, Shakouchi et al. 2001, Largeau y Moriniere, 2007], pero hasta la producción de este trabajo no se tiene una malla lo suficientemente fina en esa región del dominio computacional para permitir una apropiada evaluación y caracterización de su comportamiento. Por otra parte, el análisis de esta zona queda fuera del alcance de estudio de esta investigación.

En la figura 8 se presenta un acercamiento del campo de velocidades encontrado en el centro del conducto (plano IV) para Reynolds de 269, en el inciso a) se muestra el resultado experimental y en el inciso b) el resultado numérico. En el primer caso se encontró que la altura de la zona de separación es $a=0.74h$, mientras que para el análisis numérico se tiene $a=0.71h$, por lo que la diferencia entre ambos resultados es del orden del 4%, la cual puede considerarse como una buena aproximación y una validación apropiada de los resultados numéricos.

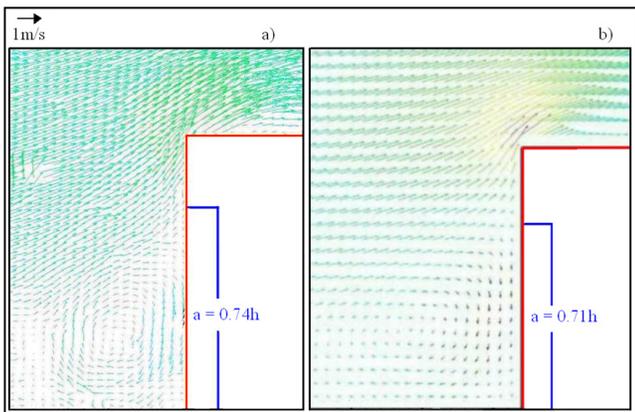


Figura 8.- Campo de velocidades en plano central para $Re=269$ a) experimental y b) numérico.

En el caso de la longitud (r) de la zona de separación los resultados numéricos presentados en la tabla II indican que a medida que aumenta el número de Reynolds la longitud también se incrementa. Esta tendencia del comportamiento se presenta en todos los planos analizados. Por otro lado se observa también que el valor de la longitud (r) en el plano central (plano IV) es 23% mayor que en el plano lateral (plano I) como se muestra

en la figura 7. Es interesante observar que esta diferencia entre los planos I y IV, existe para los 3 casos de Reynolds estudiados. Estos resultados confirman que la zona de separación desaparece cerca de la pared lateral por efectos de la viscosidad y de la condición de no deslizamiento impuesta.

En las tablas III y IV se presentan respectivamente los resultados numéricos y experimentales obtenidos para las coordenadas del centro del vórtice [x' , y'] que se forma antes del escalón para los diferentes planos estudiados en el eje "z". Los resultados reportados en la tabla IV, tienen un valor de incertidumbre de aproximadamente 0.2% para ambas coordenadas en los planos I, II y III. Este porcentaje fue calculado con respecto al valor promedio de dichas coordenadas obtenidas de una serie de 90 imágenes [Figliola y Beasley, 2003]. En el caso particular del plano IV (plano central), se obtuvo una incertidumbre mayor para las coordenadas promedio (3.9% para la coordenada axial y 6% para la coordenada vertical). Esta variación se atribuye a un cambio de posición del centro del vórtice a lo largo del tiempo en ese plano en particular. Puesto que los valores experimentales reportados son valores promedio, esto podría explicar la diferencia entre los valores numéricos y los experimentales ya que la simulación numérica se llevó a cabo en condiciones de estado estable.

Tabla III.- Coordenadas del centro de la zona de separación obtenidas numéricamente (m).

Plano	Re = 269		Re = 365		Re = 530	
	x'	y'	x'	y'	x'	y'
I	0.0031	0.0080	0.0036	0.0079	0.0045	0.0070
II	0.0063	0.0060	0.0070	0.0060	0.0070	0.0060
III	0.0079	0.0060	0.0080	0.0060	0.0080	0.0060
IV	0.0084	0.0060	0.0085	0.0061	0.0079	0.0060

Los resultados muestran que el centro del vórtice varía su posición a medida que el flujo se aproxima a la pared. Así por ejemplo,

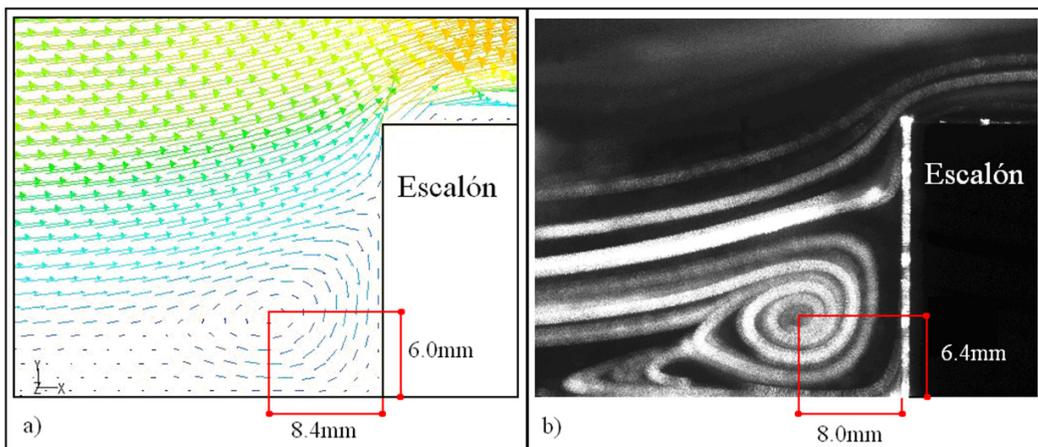


Figura 9.- Coordenadas de centro de vórtice en plano central: a) Numéricas y b) Experimentales para $Re=269$.

cuando se tiene $Re=269$ el estudio numérico indica que las coordenadas $[x', y']$ tienen un valor de $[0.003m, 0.008m]$ para el plano I mientras que para el plano IV se tiene $[0.008m, 0.006m]$, esta variación indica que el vórtice tiende a desaparecer cerca del plano I (como se ve en la figura 7a); esta misma tendencia se presenta para Reynolds de 365 y 530. El comportamiento anterior puede atribuirse a que en las paredes se estableció la condición de no deslizamiento y por efectos viscosos la velocidad del flujo tiende a cero a medida que se acerca a las paredes, por lo tanto, la intensidad del vórtice disminuye debido a la presencia de zonas de menor momento del flujo en la vecindad de las paredes.

Tabla IV.- Coordenadas del centro de zona de separación obtenidas experimentalmente (m).

Plano	Re = 269		Re = 365		Re = 530	
	x'	y'	x'	y'	x'	y'
I	0.0063	0.0069	0.0066	0.0072	0.0071	0.0061
II	0.0067	0.0069	0.0074	0.0064	0.0076	0.0061
III	0.0079	0.0064	0.0083	0.0069	0.0082	0.0062
IV	0.0080	0.0064	0.0085	0.0061	0.0083	0.0059

Otra contribución a este comportamiento se puede asociar al hecho de que el flujo que encuentra el escalón está subiendo por la vecindad de las paredes y posteriormente se dirige hacia la salida del conducto.

En el estudio experimental también se encontró un comportamiento similar del vórtice en el eje "z", solo que la diferencia entre los resultados hallados entre los planos I y IV no es tan grande como los encontrados numéricamente; esto puede atribuirse a que el vórtice desaparece cerca de la pared y no cerca del plano I.

En general se puede concluir que el programa puede simular de manera satisfactoria el comportamiento de la zona de separación para los planos II, III y IV, mientras que para el plano I la diferencia es significativa al comparar con los resultados experimentales; esta diferencia puede atribuirse a que la malla no es lo suficientemente fina cerca de la pared, debido a que se tiene malla uniforme en el eje "z".

En la figura 9 se muestran los valores de las coordenadas $[x', y']$ del vórtice obtenidas numéricamente en el inciso a) y experimentalmente en el inciso b) para el plano IV con Reynolds de 269. En este caso particular, la figura 9b corresponde a una imagen obtenida mediante la técnica de visualización con humo [Morales et al., 2010], para la misma geometría que se ha venido discutiendo. La diferencia entre los resultados experimentales y numéricos es del orden del 6% por lo que se establece que el resultado numérico es de buena calidad.

Finalmente es importante observar que la altura de la zona de separación en el plano central obtenida experimentalmente ($a=0.74h$) presenta una diferencia del 2% con respecto al trabajo realizado por Stüer, quien trabajó con un flujo laminar ($Re=330$) pero con parámetros geométricos distintos ($RC=4$), con este resultado se puede inferir que la zona de separación

en el plano central no estará influenciada por los parámetros geométricos impuestos en un flujo laminar.

Conclusiones.

En este trabajo se realizó un estudio numérico-experimental del flujo laminar a través de un conducto rectangular con una relación de aspecto $RA=4$ y una relación de contracción $RC=2$, para analizar el comportamiento la zona de separación previa al escalón y a lo largo del eje coordenado z.

De los resultados se puede concluir que el comportamiento de la zona de separación a lo largo del eje z es similar al de un vórtice helicoidal. Así mismo, se concluye que la longitud (r) de la zona de separación aumenta su valor a medida que se incrementa la velocidad de flujo, es decir, es directamente proporcional al parámetro de Reynolds. Por otra parte, la altura (a) de la zona de separación en el centro del conducto no modifica su magnitud cuando se incrementa el Reynolds.

La diferencia entre el valor obtenido numérica y experimentalmente para las coordenadas del centro del vórtice son aceptables en los planos IV, III y II, para los tres Reynolds ensayados, pero no sucede lo mismo en el plano I, debido a la cercanía con la pared. De forma similar, se concluye que el centro del vórtice cambia su posición a medida que el flujo se aproxima a la pared y también cuando se incrementa el número de Reynolds.

Sobre el escalón se encontró la formación de otra pequeña zona de recirculación, pero no fue posible su caracterización, aunado que no era el objetivo de interés para esta investigación. Por lo tanto, se recomienda realizar un análisis de esta zona en trabajos futuros. Así mismo, se recomienda realizar una simulación numérica con condición de flujo no estacionario para observar la diferencia con respecto a los resultados experimentales.

Agradecimientos.

Al CONACyT por el apoyo económico brindado al estudiante del programa de Doctorado en Ingeniería Mecánica.

En la conmemoración del 20 Aniversario del Laboratorio de Ingeniería Térmica e Hidráulica Aplicada.

Referencias.

Barbosa J., Quinto P., Sánchez F. y Carvajal I., "Numerical simulation for the flow structures following a three-dimensional horizontal forward-facing step channel", Revista Mexicana de Física. vol. 53, pp. 87-95, 2007.

Chiang T., Sheu T. and Hwang R., "Numerical studies of a three-dimensional flow in suddenly contracted channels", Physics of fluids. vol 14. 2002.

Figliola R y Beasley D., "Mediciones mecánicas teoría y diseño", 3ª edición, Editorial Alfaomega, 2003. pp. 130-135.

Kirkup L. y Frenkel B., "An introduction to uncertainty in measurement", Cambridge University Press. pp. 50, 2006.

Largeau J. and Moriniere V., "Wall pressure fluctuations and topology in separated flows over a forward facing step", *Exp. Fluids*. vol. 42, pp. 21-40, 2007.

Morales O., Jiménez J., Barbosa J. y Gutiérrez C., "Estudio experimental del flujo laminar en conducto rectangular con escalón" XVI Congreso Internacional de la SOMIM. Monterrey, Nuevo León, México, 2010. Aceptado para su inclusión en el congreso.

Mulaweh H., Armaly B. and Chen T., "Laminar Natural Convection Flow Over a Vertical Forward-Facing Step", *J. Thermophys. Heat Trans.* vol. 10, pp. 517-523, 1996.

Nakamura S., Onuma H. and Carswell G., "Comparison of CFD simulation to the experiments for forward-facing step", *ASME FEDSM*. 2003.

Nie J.H. and Armaly B.F., "Reattachment of Three-Dimensional Forced Convection Flow Adjacent to Backward Facing Step", *Int. J. Heat Transfer*. vol. 125, pp. 422-428, 2003.

Shakouchi T., Ando T. and Ito K., "Mean and vortex shedding flow characteristics over a forward-facing step", *ASME FEDS*. 2001.

Stüer H., Gyr A. and Kinzelbach W., "Laminar separation on a forward-facing step", *Eur. J. Mech. B/Fluids*. vol. 18, pp. 675-692, 1999.

Wilhelm D. and Kleiser L., "Application of a spectral element method to two-dimensional forward step flow", *J. of Scientific Computing*. vol. 17, NOS. 1-4, 2002.

Williams P. and Baker A., "Numerical simulations of laminar flow over a 3D backward facing step", *Int. J. Numerical Methods in Fluids*. vol. 24 pp. 1159-1185, 1997.