

Influencia de la relación de contracción en el flujo con un escalón al frente (FFS)

Adán Juárez Montalvo, José Alfredo Jiménez Bernal,
Claudia Del Carmen Gutiérrez Torres,
Juan Gabriel Barbosa Saldaña
Instituto Politécnico Nacional
LABINTHAP, SEPI ESIME Zacatenco, UPALM
adam_jua@yahoo.com.mx



RESUMEN

En este trabajo se presenta un estudio experimental del flujo con un escalón al frente (FFS). El conducto que encierra al escalón tiene una relación de aspecto y contracción de 10 y 2 respectivamente. El número de Reynolds utilizado es función de la altura del escalón h y corresponde a un valor de $Re_h = 1250$. Se utilizó la técnica de velocimetría mediante imágenes de partículas (PIV) para obtener los campos de velocidad instantáneos y promedio del flujo para las posiciones de $x/h = 0.3, 0.5, 1, 1.5$ y 2 . Estos resultados son comparados cuantitativamente con los de otros trabajos con respecto a la inclinación del perfil con la finalidad de determinar el efecto provocado en la tendencia del perfil cuando se utiliza una sección transversal de menores dimensiones.

PALABRAS CLAVE

Perfil, inclinación, técnica PIV, sección transversal.

ABSTRACT

This paper presents an experimental study of the flow in a forward facing step (FFS). The channel enclosing the step has an aspect ratio of 10 and a contraction ratio of 2. The Reynolds number is function of the step height h and corresponds to a value of $Re_h = 1250$. The technique used was particle image velocimetry (PIV) which allowed to obtain the instantaneous and average velocity fields at $x/h = 0.3, 0.5, 1, 1.5$ and 2 . These results are compared quantitatively with those from other works in respect to the slope of the profile in order to determine the effect caused on the profile tendency when using a smaller cross-section.

KEYWORDS

Profile, slope, PIV, cross section.

INTRODUCCIÓN

Muchos estudios experimentales y numéricos han sido llevados a cabo para comprender la física del flujo con un escalón atrás (BFS) y flujo con un escalón al frente (FFS). Ambos casos constituyen un problema tipo a través del cual se pretende estudiar y comprender los fenómenos de separación, recirculación

y readherencia del flujo¹ tan común en diversos dispositivos ingenieriles tales como: canales de superficie abierta, cámaras de combustión, equipo de transferencia de calor, turbinas de gas, etc. En comparación con el flujo con un escalón atrás, el flujo con un escalón al frente ha sido menos estudiado. Este último ha recibido más atención en años recientes debido a que muchos de los complejos fenómenos de flujo que se dan en la industria pueden estudiarse con este caso. La estructura básica del flujo con un escalón al frente comprende dos zonas de recirculación (vórtices), puntos de separación y readherencia y capas límite,² tal como lo ilustra la figura 1; estas estructuras hacen enriquecedor el estudio del flujo con un escalón al frente ya que son las responsables de la caída de presión, y de una mejor transferencia de calor y masa en el flujo³ (tópicos de gran importancia en mecánica de fluidos).

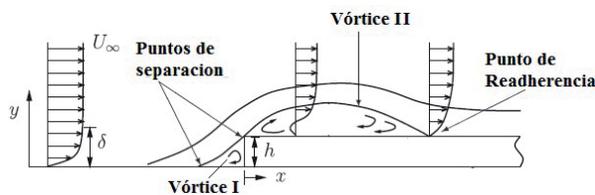


Fig. 1. Flujo con un escalón al frente FFS.¹

Diversos trabajos han sido llevados a cabo con la finalidad de estudiar los mecanismos que regulan el comportamiento de dichas estructuras cuando se modifica la geometría del sistema, así como los fenómenos de inestabilidad y ruido que inducen estas estructuras. De forma específica, Marino y Luchini⁴ realizaron un análisis adjunto para determinar la sensibilidad y estabilidad del flujo con un escalón al frente a perturbaciones externas; encontraron que la distribución espacial de los valores característicos de los modos de inestabilidad del flujo está fuertemente influenciada por el tamaño de las burbujas de recirculación. En la proximidad del valor del número de Reynolds crítico, se identificó que la burbuja posterior al escalón es la principal responsable de la inestabilidad del flujo. Wilhelm y Kleiser⁵ llevaron a cabo un estudio numérico del FFS encontrando que la longitud y altura de la zona de recirculación al frente del escalón son casi constantes para números de Reynolds bajos o flujo de Stokes ($Re < 0.1$). En el caso de números de Reynolds

grandes ($Re_h = 1\ 200$), la longitud y altura de la zona de recirculación aumentan proporcionales a $Re^{0.6}$ y $Re^{0.2}$ respectivamente. Wang y Gaster⁶ realizaron un estudio experimental para examinar el efecto de un escalón con borde afilado en la transición de la capa límite, establecieron una correlación entre el número de Reynolds de transición y la altura del escalón para un flujo al frente y atrás del mismo. La posición de transición se asocia con el factor “N” que define el crecimiento integrado de las ondas de inestabilidad en la transición. Encontraron que la capa límite del flujo en un FFS o BFS tiene una transición más rápida que la transición de la misma en una placa plana lisa, ya que las ondas de inestabilidad se amplifican más rápidamente que las de una superficie lisa, se observa que la reducción en el factor “N” que ocurre en el FFS o BFS se correlaciona con la altura del escalón, por lo que se puede determinar el valor de N a partir de la altura del escalón. Hahn C. *et al.*,⁷ estudiaron las características acústicas del FFS con la finalidad de identificar las regiones responsables de la generación del ruido, encontraron que el sonido generado por el paso del flujo en un FFS es de banda ancha, ya que el sonido radiado se encuentra en una gama de frecuencia de 2 kHz a 10 kHz a un número de Reynolds de 24000; utilizaron una correlación que les permitió determinar que sólo en la región del escalón se puede encontrar una conexión entre la distribución de la velocidad y la presión local en la pared al campo de presión sonora. Así mismo determinaron que esta región contiene una estructura significativa de vórtice bidimensional. Smith y Smits⁸ llevaron a cabo el estudio experimental de una capa límite turbulenta en un FFS. El montaje experimental utilizado consistió en modificaciones realizadas al escalón del FFS, tales como la inclinación del escalón a un ángulo de 20° hacia el frente. Las mediciones se realizaron en la zona del escalón utilizando sondas Preston. Los resultados muestran que en esta zona el perfil de velocidad promedio estaba alterado por las modificaciones hechas en el escalón. Las mediciones de la intensidad de la turbulencia revelan que existe una reducción en la magnitud del esfuerzo de corte y un decaimiento progresivo en el perfil de los esfuerzos de Reynolds. Por otro lado, Largeau y Morinier⁹ realizaron un estudio experimental de un FFS, el cual consistió en cambiar la altura del escalón y la velocidad de la corriente libre. Utilizaron

sondas de presión para medir las fluctuaciones de la presión en la pared. Así mismo utilizaron la técnica PIV para analizar la topología del flujo. Los resultados mostraron que el comportamiento del flujo es función de la relación de aspecto y de la relación entre el espesor de la capa límite y la altura del escalón para números de Reynolds muy grandes (7.7×10^4 y 10.80×10^4). Se realizaron correlaciones espacio-tiempo entre la presión de la pared y los campos de velocidad, mismas que demostraron que los niveles más elevados de correlación se encuentran en la parte superior de la burbuja de recirculación, principalmente en la capa cortante y se extienden aguas abajo del punto de readherencia. Además, los resultados muestran que la frecuencia del movimiento en la zona de separación es importante en la organización del flujo en el punto de readherencia. El propósito de este estudio, es investigar la influencia de la relación de contracción H/h (figura 2) en la velocidad del flujo, conforme éste se acerca a la base del escalón. De forma específica se investiga el efecto de una sección transversal pequeña sobre el perfil de velocidad del flujo.

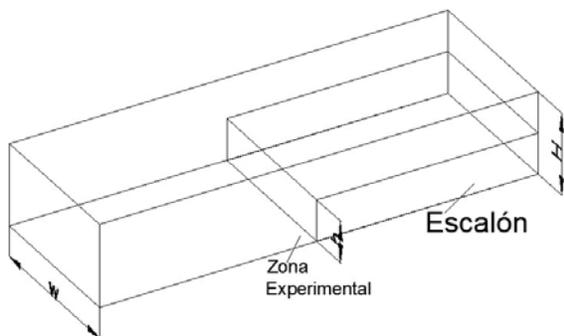


Fig. 2. Esquema de un conducto con escalón al frente.

MONTAJE EXPERIMENTAL Y CONDICIONES DEL FLUJO

Los experimentos fueron llevados a cabo en un canal rectangular de acrílico transparente (1.4 m de longitud, 0.1 m de ancho, y 0.02 m de altura) que contiene un escalón de 0.01 m de altura, 0.1 m de ancho (figura 3) y fue colocado a una distancia de 0.7 m (zona de flujo completamente desarrollado) a partir de la entrada del canal, se utilizó una relación de aspecto de $w/h = 10$, lo cual garantiza que se tenga flujo bidimensional,^{10,11} así como una relación de



Fig. 3. Montaje experimental.

contracción de $H/h=2$. Los experimentos se llevaron a cabo utilizando velocimetría mediante imágenes de partículas (PIV) la cual es una técnica experimental no intrusiva. Las condiciones experimentales del flujo de agua corresponden a un $Re_h=1250$ basado en la altura del escalón. Las mediciones se realizaron en la base del escalón, la región de visualización corresponde a un área de 22.76 mm x 16.89 mm. La cámara CCD tiene una resolución de 1600 x 1186 pixeles. La tabla I muestra las dimensiones de la configuración experimental actual y la utilizada por otros trabajos, así como de las condiciones del flujo, en ella se puede observar que la dimensión de la sección transversal utilizada en este trabajo, es mucho menor en comparación con la de los otros trabajos.

RESULTADOS

Se capturaron 200 imágenes mediante el uso de la cámara CCD, estas imágenes fueron divididas en ventanas de interrogación de 32 x 32 pixeles con un traslape de 50% para obtener los campos de velocidad del flujo en la zona de estudio mediante el uso del software Flowmanager. 100 campos de velocidad instantáneos fueron obtenidos. Se realizó un promediado temporal con los 100 campos de velocidad instantáneos, esto permitió obtener el campo de velocidad promedio mostrado en la figura 4 del cual se presentan perfiles de velocidad para 5 posiciones medidas a partir de la base del escalón, ($x/h = 2, 1.5, 1, 0.5, 0.3$). Estos perfiles de velocidad fueron obtenidos mediante la programación de algoritmos numéricos utilizando software Labview. Los resultados obtenidos son comparados con los de los investigadores mencionados en la tabla I.

Tabla I. Dimensiones del montaje experimental actual y de otros trabajos.

Referencia	Escalón (mm)			Reynolds	Zona de Experimentación			Configuración
	Longitud	Altura	Espesor		Longitud	Altura	Espesor	
Liu et al. ¹³	20	20	300	13,200		300	300	Obstrucción
Addad et al. ¹⁴	500	50	100	170,000	2,000	500	100	FFS-BFS
Hattori y Nagano. ¹⁵	70 δ_2	32 δ_2	40 δ_2	900	100 δ_2	30 δ_2	40 δ_2	FFS-BFS
Camussi et al. ¹⁶		20	>10h	8,800	10,000			FFS-BFS
Actual	700	10	100	1,250	1,400	20	100	FFS

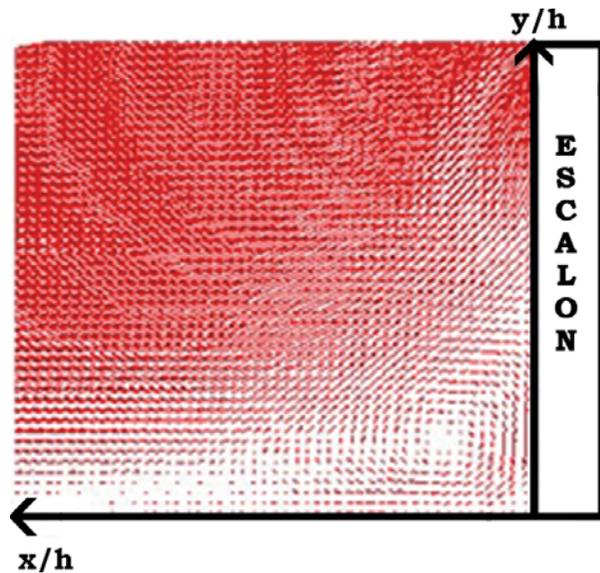


Fig. 4. Campo de velocidad promedio $Re_h=1250$.

Perfiles de velocidad

En la figura 5 se muestra el perfil obtenido para la posición $x/h = 2$ y el de otros trabajos realizados en el tema, en ella se observa que la tendencia del perfil es muy similar en comparación con los trabajos de Liu *et al*¹³ y Hattori y Nagano;¹⁵ la tabla II muestra los valores de las magnitudes de la inclinación del perfil, entendiéndose por inclinación al recíproco del gradiente de velocidad, es decir $(\Delta u/\Delta y)^{-1}$, de los valores mostrados en la tabla se puede observar que la inclinación del perfil de velocidad para el trabajo actual es menor en magnitud en comparación con los otros trabajos, lo cual concuerda con las magnitudes del número de Reynolds ya que para Hattori y Nagano $Re_h=900$ y para el trabajo actual $Re_h=1\ 250$, de la literatura especializada en mecánica de fluidos¹² se sabe que conforme el número de Reynolds es incrementado la inclinación del perfil de velocidad debe disminuir.

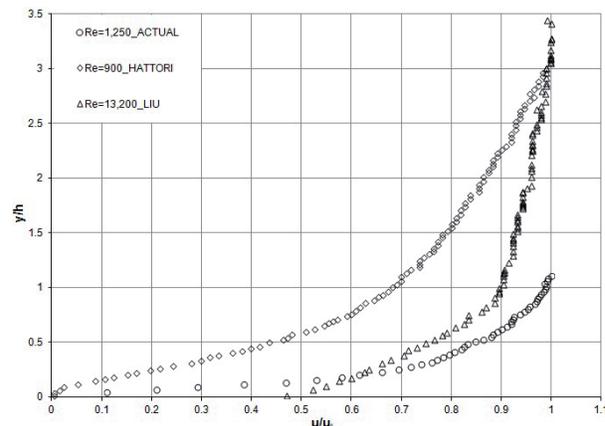


Fig. 5. Perfiles de velocidad para $x/h = 2$.

La magnitud de inclinación marcada con ∞ en la tabla II en el primer punto para el caso del perfil de Hattori y Nagano se debe a que en este punto el flujo cambia de dirección ($\Delta u/\Delta y \rightarrow 0$), el flujo sale de la zona de recirculación y continúa su camino hacia el escalón. Algo sumamente interesante sucede cuando se comparan las inclinaciones del presente trabajo

Tabla II. Inclinación del perfil para la posición $x/h = 2$.

ADÁN		HATTORI y NAGANO. ¹⁵		LIU ET AL. ¹³	
y/h	$(\Delta u/\Delta y)^{-1}$	y/h	$(\Delta u/\Delta y)^{-1}$	y/h	$(\Delta u/\Delta y)^{-1}$
0.02	0.26	0.02	∞	0.01	1.04
0.05	0.23	0.04	2.90	0.07	1.39
0.07	0.28	0.06	3.48	0.10	1.73
0.09	0.25	0.10	0.97	0.15	1.04
0.11	0.28	0.12	0.73	0.18	2.08
0.14	0.38	0.15	0.87	0.23	3.11
0.16	0.45	0.16	1.16	0.26	2.08
0.18	0.66	0.19	0.77	0.31	1.56
0.21	0.52	0.21	1.16	0.34	1.73
0.23	0.68	0.23	0.77	0.38	5.14

y la del trabajo de Liu *et al*¹³ ya que aún cuando la magnitud del Reynolds utilizado en el trabajo de Liu *et al*¹³ es aproximadamente 10.5 veces mayor que el Reynolds utilizado en este trabajo, se observa que la inclinación del trabajo actual es menor que la de Liu; este comportamiento se atribuye a las dimensiones de la sección transversal utilizadas en este trabajo, ya que una sección transversal pequeña incrementa el gradiente de velocidad a lo largo de la sección transversal del ducto.

Este resultado concuerda con el hecho de que en el trabajo de Liu *et al*¹³ se utilizó un área de mayor sección transversal que la del trabajo actual, por lo tanto el flujo que pasa por la sección de menor área transversal debe acelerarse disminuyendo la inclinación del perfil de velocidad, situación que se presenta en el perfil de este trabajo para esta posición. Los perfiles de velocidad para la posición $x/h=1.5$ son ilustrados por la figura 6, en ella se observa que la tendencia del perfil de velocidad del trabajo actual es similar a la tendencia del perfil para la posición $x/h=2$. Sin embargo, se observa que en el perfil de velocidad de Hattori y Nagano¹⁵ se presenta una zona de velocidad negativa para la región aproximada de $0 < y/h < 0.1$ y $-0.2 < u < 0$, esta zona de velocidad negativa se atribuye a la zona de recirculación formada en la base del escalón como resultado de un número de Reynolds bajo, situación que no se presenta en el perfil de velocidad del trabajo actual para esta posición ya que el número de Reynolds de este trabajo es mayor que el Reynolds del trabajo antes mencionado. La tabla III muestra las magnitudes de la inclinación para cada perfil de

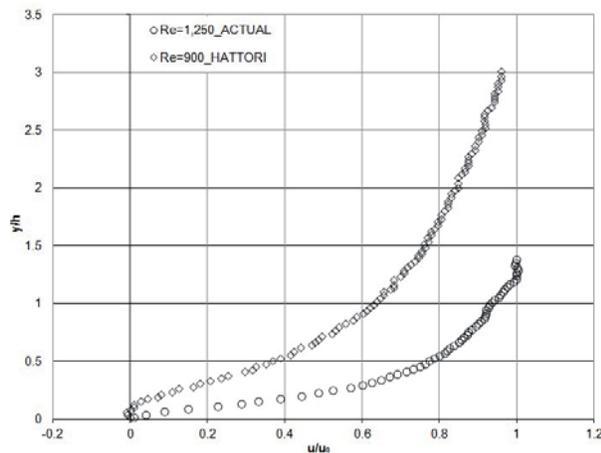


Fig. 6. Perfil de velocidad para $x/h = 1.5$.

Tabla III. Inclinación del perfil para la posición $x/h=1.5$.

ACTUAL		HATTORI Y NAGANO. ¹⁵	
y/h	$(\Delta u / \Delta y)^{-1}$	y/h	$(\Delta u / \Delta y)^{-1}$
0.02	0.78	0.01	-2.29
0.05	0.48	0.03	-128.27
0.07	0.37	0.06	2.38
0.09	0.30	0.08	2.38
0.11	0.38	0.10	-128.27
0.14	0.52	0.12	1.48
0.16	0.40	0.15	1.18
0.18	0.42	0.17	0.78
0.21	0.53	0.19	2.38
0.23	0.64	0.21	0.78
0.25	0.50	0.24	1.48

la posición $x/h = 1.5$, al igual que en el caso anterior se observa que la magnitud de la inclinación para el perfil actual es menor que para el caso de Hattori y Nagano.¹⁵ Los valores negativos en dicho perfil se deben al cambio de la dirección del flujo, resultado de la existencia de una zona de recirculación o de baja presión.

Como se puede observar en la figura 7 ($x/h = 1$), todos los perfiles de velocidad incluyendo el del trabajo actual presentan una zona de velocidad negativa para una zona aproximada $0 \leq y/h \leq 0.1$ y $-0.2 \leq u \leq 0$; esto se debe a que el flujo se encuentra en una posición próxima a la base del escalón y por lo tanto la zona de recirculación (vórtice) del flujo formada en la base del escalón tiene mayor influencia en el comportamiento que presentan cada uno de los perfiles de velocidad. La tabla IV muestra las inclinaciones para cada perfil, estos

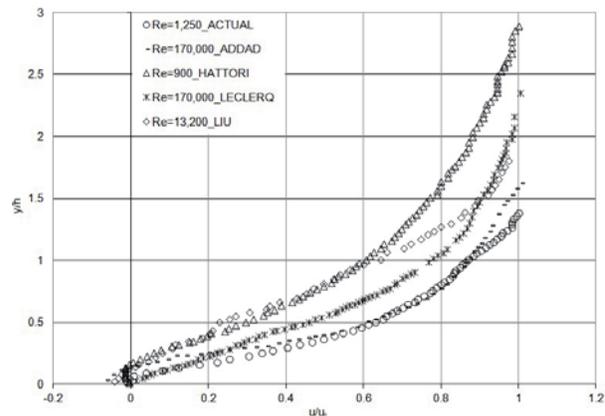


Fig. 7. Perfiles de velocidad para $x/h=1$.

Tabla IV. Inclinación del perfil para la posición $x/h=1$.

ACTUAL		LIU ET AL. ¹³		HATTORI Y NAGANO. ¹⁵		ADDAD ET AL. ¹⁴		LECLERQ ET AL. ¹⁷	
y/h	$(\Delta u/\Delta y)^{-1}$	y/h	$(\Delta u/\Delta y)^{-1}$	y/h	$(\Delta u/\Delta y)^{-1}$	y/h	$(\Delta u/\Delta y)^{-1}$	y/h	$(\Delta u/\Delta y)^{-1}$
0.02	4.93	0.02	3.09	0.01	∞	0.04	2.40	0.04	1.19
0.05	1.75	0.05	3.09	0.03	-2.32	0.08	2.00	0.06	1.33
0.07	0.76	0.08	1.86	0.05	∞	0.12	0.80	0.07	0.99
0.09	0.54	0.16	1.38	0.06	∞	0.13	1.00	0.08	1.33
0.11	0.57	0.12	1.04	0.07	∞	0.15	0.50	0.09	1.02
0.14	0.42	0.14	1.29	0.08	∞	0.17	0.75	0.22	1.02
0.16	0.52	0.19	2.07	0.10	∞	0.19	0.67	0.11	0.50
0.18	0.69	0.22	2.07	0.12	∞	0.20	0.68	0.12	1.19
0.21	0.47	0.26	1.38	0.13	∞	0.22	0.66	0.14	0.50
0.23	0.66	0.29	3.09	0.14	2.32	0.24	0.36	0.15	0.80
0.25	0.83	0.32	0.78	0.16	2.32	0.25	0.57	0.16	1.33
0.28	0.61	0.35	0.78	0.18	1.45	0.26	0.33	0.17	0.99
0.30	0.75	0.38	1.55	0.21	1.16	0.27	0.40	0.18	1.99

valores indican que para la mayoría de los perfiles de velocidad, el gradiente de velocidad disminuye en la zona cercana a la pared inferior del canal, así mismo se puede observar que el perfil de velocidad de Hattori y Nagano, el cual tiene el número de Reynolds más bajo y presenta la inclinación con mayor magnitud. Se observa que la inclinación del perfil actual para la posición $y=0.02$ es mayor en comparación con la magnitud de los otros trabajos porque en este punto en especial, el flujo es afectado por la zona de recirculación, cuando el flujo se aleja de la pared inferior del escalón la influencia de la zona de recirculación disminuye y la componente de velocidad u del flujo se recupera cambiando de dirección (continúa su camino hacia el escalón). El comportamiento anterior se ve reflejado en una disminución de la inclinación del perfil; al final el responsable de este comportamiento es el número de Reynolds ya que para todos los perfiles con excepción del perfil de Hattori y Nagano el número de Reynolds es mayor que el del trabajo actual. Sin embargo, la inclinación para el perfil actual cuando el flujo se aleja de la pared inferior del canal disminuye por la influencia de la sección transversal, es decir, la pared superior del canal tiene una influencia significativa en la tendencia del perfil. En otras palabras, la dimensión de la sección transversal del canal influye sobre el flujo disminuyendo la inclinación de la

distribución de la velocidad. Para la posición $x/h = 0.5$ la figura 8 ilustra el perfil de velocidad actual y el obtenido por Hattori y Nagano; en ésta se puede observar que ambos perfiles presentan una zona de velocidad negativa o recirculación, resultado de una mayor influencia del vórtice formado en la base del escalón. De igual forma se observa que la zona o región de recirculación es mayor para ambos perfiles en comparación con la zona de recirculación presentada en la figura 7, ya que para la figura 8 la zona de velocidad negativa corresponde a una región de: $0 \leq y/h \leq 0.3$, $-0.22 \leq u \leq 0$.

Como se puede observar en la figura 8 la zona de velocidad negativa o recirculación ocupa una menor región en el caso del perfil actual en comparación con el de Hattori y Nagano ($0 \leq y/h \leq 0.2$ y $-0.14 \leq u \leq 0$), esto se debe a que en el caso de estudio antes mencionado el número de Reynolds utilizado es menor ($Re_h = 900$), en comparación con el del trabajo actual ($Re_h = 1250$), lo cual se refleja en el caso de Hattori y Nagano en una zona de recirculación mayor en comparación con la zona de recirculación del trabajo actual. En esta posición es interesante realizar un análisis más detallado de la pendiente de cada perfil; este análisis permite determinar la razón de cambio de la velocidad con la posición o la distancia conforme el flujo se acerca al escalón, con lo cual se puede deducir qué está sucediendo con la velocidad en cada perfil.

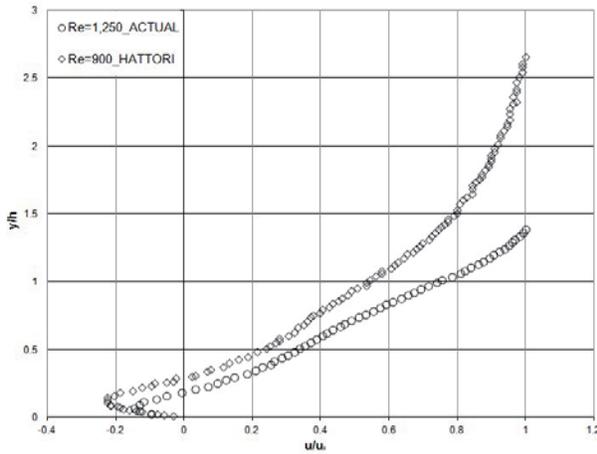


Fig. 8. Perfiles de velocidad para la posición $x/h = 0.5$.

La tabla V muestra la posición y magnitud de la pendiente para cada perfil. Como se muestra en la tabla V, los primeros valores de la pendiente para cada perfil son negativos, valores que concuerdan con el hecho de que en esas posiciones existe una zona de recirculación o velocidad negativa. De igual forma se puede observar que para la zona $0.02 \leq y \leq 0.05$ la magnitud absoluta del valor de la inclinación para el perfil actual es mayor en comparación con el de Hattori y Nagano. Lo anterior se explica de la forma siguiente: se sabe que el número de Reynolds del trabajo actual es mayor que el del trabajo de Hattori y Nagano, por lo tanto la zona de recirculación del trabajo actual debe ser menor que la de ellos, es decir, la velocidad del flujo para el caso actual

Tabla V. Inclinación del perfil para la posición $x/h=0.5$.

ACTUAL		HATTORI Y NAGANO. ¹⁵	
y/h	$(\Delta u / \Delta y)^{-1}$	y/h	$(\Delta u / \Delta y)^{-1}$
0.02	-0.68	0.02	-0.19
0.05	-1.65	0.02	-0.29
0.07	1.78	0.03	-0.29
0.09	1.81	0.03	-0.39
0.11	0.63	0.04	-0.29
0.14	0.73	0.05	-0.58
0.16	0.52	0.06	-0.29
0.18	0.59	0.06	-1.16
0.21	0.64	0.07	-0.58
0.23	0.84	0.08	-0.29
0.25	0.90	0.08	∞
0.28	0.93	0.10	-1.74
0.30	0.63	0.11	∞

se debe recuperar más rápido que la velocidad del flujo para el caso de Hattori y Nagano por lo tanto y como se puede observar en la tabla V, los valores negativos para la inclinación del perfil actual son menores en comparación con los valores negativos de Hattori y Nagano, de hecho en el trabajo actual sólo dos posiciones presentan valores negativos. Posterior a estos dos valores, la inclinación del perfil tiene valores positivos, lo cual significa que el flujo cambió de dirección, es decir, continúa su camino hacia el escalón; en otras palabras, para el caso actual, el flujo que se separa de la pared como resultado de la zona de recirculación se readhiere más rápido que para el caso de Hattori y Nagano, es decir el gradiente de presión del trabajo actual ($\Delta p / \Delta x$) es mayor que para el trabajo de Hattori y Nagano en esta posición. Los perfiles más cercanos al escalón son mostrados por la figura 9; en esta posición, la zona de recirculación o vórtice está completamente definida. Dos factores influyen en la tendencia del perfil para esta zona: 1) la zona de recirculación o vórtice, 2) la cara del escalón, el vórtice es el responsable de la zona de velocidad negativa que se observa en la parte izquierda de la gráfica ($y \leq 0$), el escalón provoca la tendencia observada en el perfil para la parte derecha de la gráfica ($y > 0$). En ésta se observa que conforme el flujo se aleja de la pared inferior del canal y la cara del escalón, éste se acelera, lo cual se ve reflejado en la inclinación que presenta el perfil, ya que para la zona $0.07 \leq y \leq 0.76$ se observa que para el presente trabajo, el valor de la inclinación (tabla VI) es grande en comparación con los valores para los otros trabajos, para la zona $y \geq 0.78$ se observa que los valores de la inclinación disminuyen y son inclusive menores que la inclinación para los otros

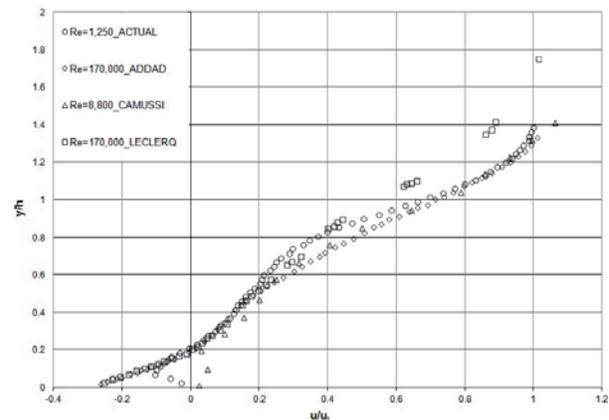


Fig. 9. Perfiles de velocidad para la posición $x/h=0.3$.

Tabla VI. Inclinación del perfil para $x/h = 0.3$.

ACTUAL		ADDAD ET AL. ¹⁴		LECLERQ ET AL. ¹⁷		CAMUSSI ET AL. ¹⁶	
y/h	$(\Delta u/\Delta y)$ ₋₁	y/h	$(\Delta u/\Delta y)$ ₋₁	y/h	$(\Delta u/\Delta y)$ ₋₁	y/h	$(\Delta u/\Delta y)$ ₋₁
0.02	-0.73	0.02	0.67	0.03	0.75	0.01	
0.05	-0.49	0.03	0.80	0.05	0.57	0.09	
0.07	4.68	0.05	0.00	0.06	0.50	0.20	
0.09	2.04	0.05	0.50	0.07	0.86	0.28	
0.11	1.29	0.05	0.75	0.09	0.57	0.37	
0.14	1.60	0.07	0.33	0.10	0.67	0.47	
0.16	0.95	0.08	1.00	0.12	0.67	0.58	
0.18	0.81	0.09	0.40	0.13	0.67	0.66	
0.21	1.07	0.10	1.00	0.14	0.57	0.76	
0.23	1.16	0.11	0.67	0.16	0.67	0.85	
0.25	1.59	0.12	0.33	0.17	0.57	0.94	
0.28	1.19	0.13	2.00	0.18	1.60		
0.30	1.85	0.15	0.00	0.21	0.80		
0.32	1.59	0.15	0.92	0.22	1.50		
0.35	1.44	0.19	1.00	0.24	2.00		
0.37	2.02	0.21	1.50	0.26	0.80		
0.39	3.65	0.25	1.67	0.28	1.43		
0.41	4.27	0.28	1.67	0.31	1.33		
0.44	2.10	0.31	2.67	0.34	2.29		
0.46	2.18	0.34	1.67	0.44	2.00		
0.48	1.50	0.37	2.33	0.47	1.60		
0.51	1.67	0.41	1.33	0.49	1.33		
0.53	1.58	0.44	2.00	0.52	1.43		
0.55	4.45	0.46	1.14	0.55	2.00		
0.58	3.94	0.49	1.14	0.58	1.60		
0.60	1.27	0.52	1.33	0.65	1.50		
0.62	1.86	0.54	1.00	0.67	1.00		
0.65	4.54	0.56	1.00	0.70	1.84		
0.67	1.64	0.59	1.00	0.85	0.80		
0.69	0.90	0.62	1.14	0.86	2.00		
0.71	2.60	0.65	1.00	0.88	1.20		
0.74	0.75	0.67	1.00	0.90	0.98		
0.76	1.21	0.70	1.20				
0.78	0.98	0.72	1.11				
0.81	0.85	0.75	0.75				
0.83	0.68	0.77	0.89				
0.85	0.60	0.79	1.00				
0.88	0.66	0.83	1.00				
0.90	0.52	0.85	0.86				
0.92	0.62	0.87	1.14				

trabajos, esto se explica de la siguiente forma: en la zona $y \leq 0.76$ el flujo se encuentra en la zona de recirculación, por lo tanto el gradiente de velocidad tiene una magnitud baja, para la zona $y \geq 0.78$ el gradiente de velocidad se incrementa como resultado de la contracción provocada por el escalón, en esta zona el flujo entra a una zona de contracción (vena contracta), en la cual el flujo se acelera provocando la tendencia del perfil observada en la gráfica, la magnitud de la inclinación del perfil para el trabajo actual resulta ser menor por que la relación de contracción utilizada en éste trabajo, es mucho menor en comparación con las relaciones de contracción utilizadas por los trabajos de las referencias^{13,14,15,16,17} tal y como se muestra en la tabla I.

CONCLUSIONES

El comportamiento del flujo de un escalón al frente depende fuertemente del número de Reynolds y de las relaciones de contracción y de aspecto. De forma particular en este trabajo se investigó el efecto que el uso de una sección transversal muy pequeña tiene sobre el flujo, se encontró que la inclinación del perfil se ve afectada por esta sección transversal, valores menores de inclinación para el perfil actual se encontraron en comparación con inclinaciones para trabajos con números de Reynolds mayores, lo que significa que las dimensiones de la sección transversal tienen una influencia predominante en la inclinación que el perfil pueda presentar, sin embargo se observa que la tendencia del perfil es exactamente la misma que para los casos de estudio con los que se comparó.

REFERENCIAS

1. Sherry, M. , Lo Jacono, D. , Sheridan, J., An experimental investigation of the recirculation zone formed downstream of a forward facing step, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 98, 888–894, 2010.
2. Oztop, H. F., Mushatet, K. S., Yılmaz, İ., Analysis of turbulent flow and heat transfer over a double forward facing step with obstacles, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, doi: 10.1016, 2012.
3. Morales Contreras, O. A., Barbosa Saldaña J. G., Jiménez Bernal J. A., Gutiérrez Torres C.

- del C., Caracterización numérico-experimental del vórtice adyacente al escalón de un conducto con contracción, *Revista Ingenierías*, 56, 7-14, 2012.
4. Marino, L., Luchini, P., Adjoint Analysis of the Flow over a Forward Facing Step, *Theor. Comput. Fluid Dyn.*, 23, 37-54, 2009.
 5. Wilhelm, D., Kleiser, L., Application of Spectral Element Method to Two-Dimensional Forward-Facing Step Flow, *Journal of scientific computing*, 17, 619-627, 2002.
 6. Wang, Y. X., Gaster, M., Effect of surface steps on boundary layer transition Experiments in *Fluids*, 39, 679-686, 2005.
 7. Hahn, C., Becker, S., Ali I., Escobar, M., Investigation of flow induced Sound Radiated by a Forward Facing Step, *New Res. In Num. and Exp. Fluid Mech. VI, NNFM 96*, 438-445, 2007.
 8. Smith, D. R. y Smits, A. J., Multiple Distortion of a Supersonic Turbulent Boundary Layer, *Applied Scientific Research*, 51, 223-229, 1993.
 9. Largeau, J. F., y Moriniere, V., Wall pressure fluctuations and topology in separated flows over a Forward Facing Step, *Exp. Fluids*, 42, 21-40, 2007.
 10. Jiménez-Bernal, J. A., Juárez-Montalvo, A., Gutiérrez-Torres, C. del C., Barbosa-Saldaña, J. G., Rodríguez-Jiménez, L. F., Turbulent Flow Over a Facing Step at Several Reynolds Numbers, *Proceedings of the ASME 2011 International Mechanical Engineering Congress & Exposition IMECE2011*, 2011.
 11. Juárez Montalvo, A., Estudio Experimental del Flujo Sobre un Escalón Mediante la Técnica PIV, Tesis de Maestría Instituto Politécnico Nacional, 2011.
 12. Durbin, P. A., Pettersson Reif, B. A. *Statistical Theory and Modelling For Turbulent Flows*, Edt. John Wiley & Sons ltd, 2001.
 13. Liu, Y. Z., Ke, F., Sung H. J., Unsteady separated and reattaching turbulent flow over a two dimensional square rib, *Journal of Fluids and Structures*, 24, 366-381, 2008.
 14. Addad, Y., Laurence, D., Talotte, C., Jacob, M. C., large eddy simulation of a forward backward facing step for acoustic source identification, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 24, 562-571, 2003.
 15. Hattori, H., Nagano, Y. Investigation of turbulent boundary layer over forward facing via direct numerical simulation, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 31, 284-294, 2010.
 16. Camussi, R., Felli, M., Pereira, F., Aloisio, G., Di Marco, A., Statistical properties of wall pressure fluctuations over a forward facing step, *Phys. Fluids* 20, 075113; doi: 10.1063/1.2959172, 2008.
 17. Leclercq, D. J. J., Jacob, M. C., Louistot A., Talotte, C., Forward-backward facing step pair: aerodynamic flow, wall pressure and acoustic characterization, *AIAA-2001-2249*, 2001.

