

CONTROL DE FLUJO ACTIVO INDIRECTO EN CAVIDADES

M. García Sáinz^a, S. Delnero^a y J. Marañón Di Leo^a

^aUIDET-LaCLyFA- Departamento de Aeronáutica - FI – UNLP - CONICET
Calle 47 y 116 - (1900) La Plata - Argentina.
Email: mariano.garciasainz@ing.unlp.edu.ar

RESUMEN

Se estudian las características del flujo en el entorno de una cavidad ($L/P=1$, $L/A=1$) dotada de un sistema de inyección de aire, con la intención de evaluar su desempeño como dispositivo de control de flujo activo indirecto. Para ello se desarrollan una serie de ensayos de anemometría de hilo caliente en túnel aerodinámico de la UIDET-LaCLyFA de la Facultad de Ingeniería de la UNLP, con el objetivo de analizar los cambios en el patrón fluido-dinámico en las inmediaciones de la cavidad, debido a la inyección de aire en su interior. Dichos ensayos fueron realizados a un número de Reynolds de 2174 basado en el espesor de cantidad de movimiento, bajo condiciones de flujo turbulento ($It > 1\%$). Los resultados permitieron reconocer la estructura rotacional interna de la cavidad y cómo era alterada durante los pulsos de inyección. De la misma manera, se observaron los cambios en los perfiles de velocidad media e intensidad de turbulencia por encima del borde de ataque y borde de fuga, identificando los picos de frecuencias propias de los modos de Rossiter, y aquellos forzados indirectamente por la inyección interna. Resulta evidente la interacción de la capa de corte entre el patrón interno y el flujo externo a la cavidad, actuando como elemento de transmisión bidireccional.

Palabras clave: cavidad, control activo, inyección de flujo.

INTRODUCCIÓN

El patrón fluidodinámico que desarrolla una cavidad inmersa en flujo incidente turbulento responde a una compleja relación entre las características geométricas de la misma y las del flujo incidente, que de acuerdo a varios investigadores, está conformado por cuatro procesos fluidodinámicos elementales [1,2];

- Amplificación de las perturbaciones vorticosas por la capa de corte;
- Generación de ondas de presión a través de la interacción superficie-vórtice;
- Propagación aguas arriba de las ondas de presión;
- Conversión de las ondas de presión en ondas vorticosas en el borde a barlovento de la cavidad.

Debido al amplio espectro de aplicación, el flujo en cavidades resulta de gran interés tanto desde el punto de vista práctico como académico. Existen cavidades de las más diversas formas y tamaños que en determinadas condiciones generan efectos adversos, ya sea en detrimento del confort eólico hasta serios problemas estructurales por efectos de resonancia. Para una cavidad abierta típica, los niveles acústicos inducidos alcanzan los 160dB en régimen transónico [3], y alrededor de 130dB en vehículos de calle a 110km/h debido a que el lugar para pasajeros funciona como un resonador Helmholtz, e inclusive, los fenómenos de resonancia pueden significar un aumento del 250% de la resistencia aerodinámica [4]. Desde hace varios años se estudia su aplicación en combustión supersónica de motores scramjet [6].

La posibilidad de modificar el patrón de flujo exterior a la cavidad mediante inyección de aire en su interior hace posible considerar a la cavidad como mecanismo de control de flujo “indirecto”. Pero para poder analizar los efectos de las acciones de control, es necesario conocer primero los fenómenos que determinan el comportamiento fluidodinámico natural de la cavidad, para luego evaluar cuáles pueden ser los sistemas de control más adecuados para los resultados que se deseen obtener.

En el presente trabajo se analizan los resultados obtenidos de ensayos experimentales en túnel aerodinámico de la UIDET-LaCLyFA-FI-UNLP, al medir, mediante técnicas de anemometría de hilo caliente, la configuración fluido-dinámica sobre una cavidad rectangular abierta de 10cm. de lado

inmersa en flujo turbulento (intensidad de turbulencia $> 1\%$) para diferentes velocidades de la corriente libre, y considerando caudales y frecuencias de conmutación de inyección de aire.

METODOLOGÍA

Los ensayos se realizaron en el túnel aerodinámico cerrado de capa límite turbulenta de la UIDET-LaCLyFA (Figura 1), de 1m por 1,4m de sección de prueba, con la intención de estudiar el comportamiento del flujo en el entorno de una cavidad abierta de 10cm de lado, dotada de un lateral transparente para los ensayos de visualización con humo, y 18 picos de inyección de aire dispuestos en las paredes verticales, como se observa en la Figura 2.

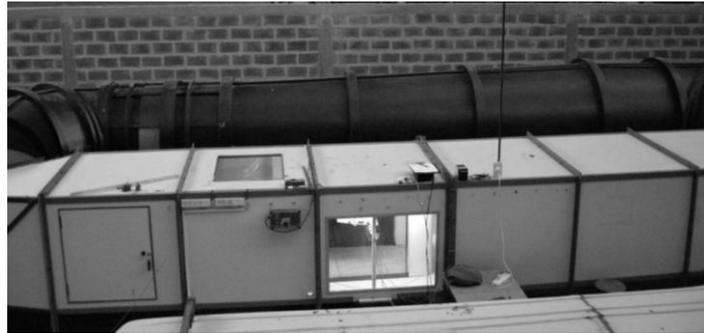


Figura 1. Túnel aerodinámico del LaCLyFA.

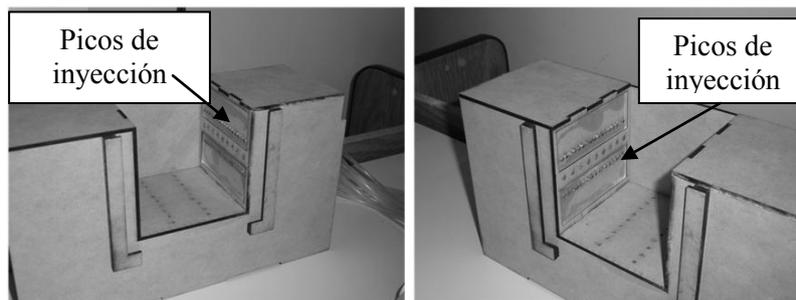


Figura 2. Configuración de la cavidad ensayada.

El estudio incluye la caracterización del sistema de inyección de aire de la Figura 3 dotado de electroválvulas de alta frecuencia (hasta 270Hz), para lo cual fue necesario implementar un banco de ensayo específico fuera del túnel aerodinámico.

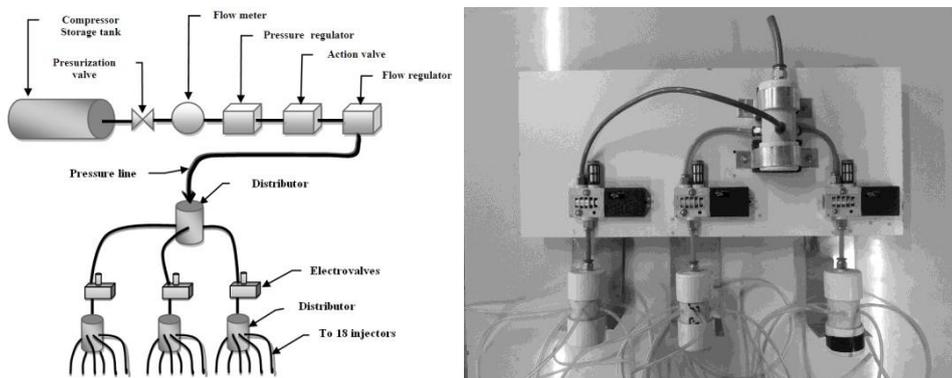


Figura 3. Sistema de inyección de aire.

El caudal de aire inyectado será expresado en términos de litros por minuto (L/min) dado que es la lectura directa que se obtiene del caudalímetro. Las mediciones se realizan por medio de un procedimiento térmico, calculando la cantidad de calor que se toma de una superficie calentada por medio del flujo de aire que circula a través del instrumento. El caudal medido se refiere a condiciones estándar físicas según DIN 1343 (ajuste de fábrica).

La cavidad fue instalada en el piso del túnel de viento sobre el cual se efectuaron los arreglos necesarios para asegurar el desarrollo adecuado de la capa límite aguas arriba de la cavidad. Los parámetros característicos del ensayo se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros característicos del ensayo.

L/P	L/A	L/ θ_0	Re_L	δ [mm]	δ^* [mm]	θ_0 [mm]	δ^*/θ_0	Re_{θ_0}
1	1	14.2	30761	85	8.73	7.04	1.24	2174

Ensayos de visualización con humo nos permitieron observar los patrones fluidodinámicos asociados al flujo dentro y en las inmediaciones de la cavidad, para estudiar el aspecto de las configuraciones fluidodinámicas y su evolución durante el ensayo. Luego, se realizaron los ensayos de relevamiento del perfil de velocidades sobre el eje longitudinal de la cavidad sin ningún dispositivo de control, discretizado en 7 estaciones comenzando 20cm aguas arriba y terminando 20cm aguas abajo de los límites de la cavidad. En particular la estación E3 coincide con el borde a barlovento, la estación E4 está a la mitad de la cavidad, y E5 en el borde a sotavento, tal como se observa en la Figura 4.

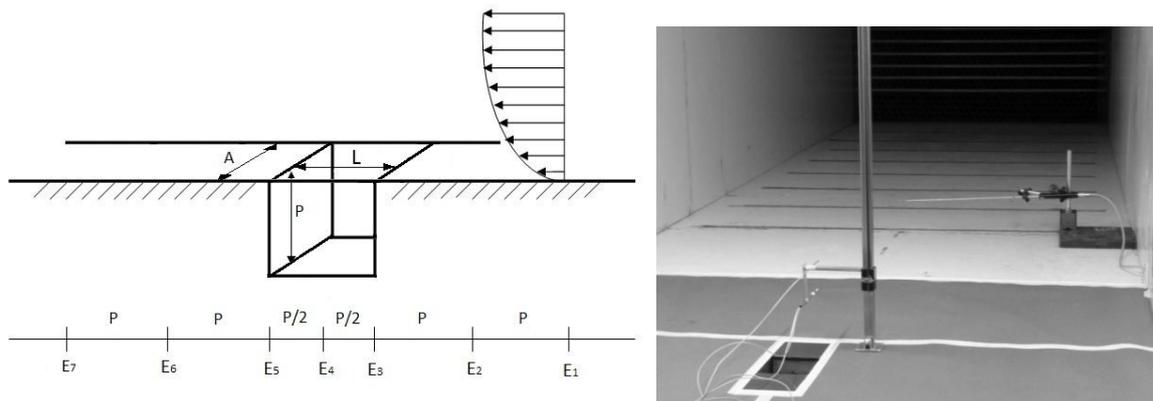


Figura 4. Estaciones de medición de velocidad.

Para cada estación se barre comenzando a 3mm desde el piso del túnel hasta 100mm de altura, con un paso de 1mm. Este ensayo se realiza con un anemómetro de hilo caliente de temperatura constante (Dantec StreamLine CTA98C10), empleando hasta tres puntas doble del tipo X-probe 55R51 en simultáneo, que permiten determinar la componente de velocidad longitudinal y vertical del flujo incidente. De esta manera se obtuvieron los perfiles de velocidades medias, distribución de intensidad de turbulencia, escalas de turbulencia, etc. para diferentes velocidades de la corriente libre.

El aire es inyectado al interior de la cavidad a través de los picos uniformemente distribuidos en la envergadura en dos hileras horizontales, ubicados a un tercio y dos tercios desde el techo de la cavidad, dispuestos de manera de favorecer el sentido de rotación del vórtice natural interior, tal como se observa en Figura 5.

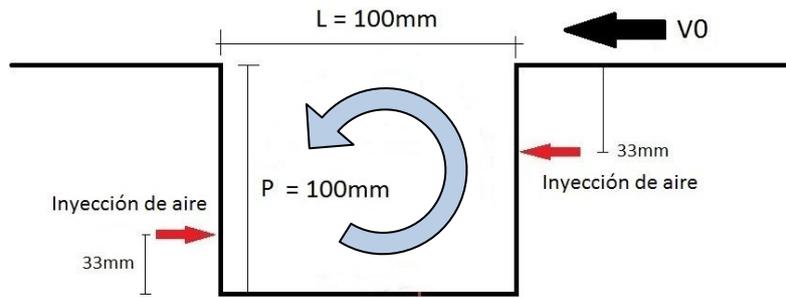


Figura 5. Puntos de inyección de aire.

También se realizaron ensayos de medición de velocidades en la capa de corte (“shear layer”) próximo al borde de ataque, en tres coordenadas en simultáneo a lo largo de la envergadura, como se observa en la Figura 6. La intención es analizar el comportamiento del flujo en la zona de “interface” entre el campo interior y el flujo exterior de la cavidad, como así también correlacionar el desarrollo tridimensional del flujo para esta cavidad de relación de aspecto 1. La posición relativa al borde de ataque se observa en la esquina superior derecha de la Figura 6.

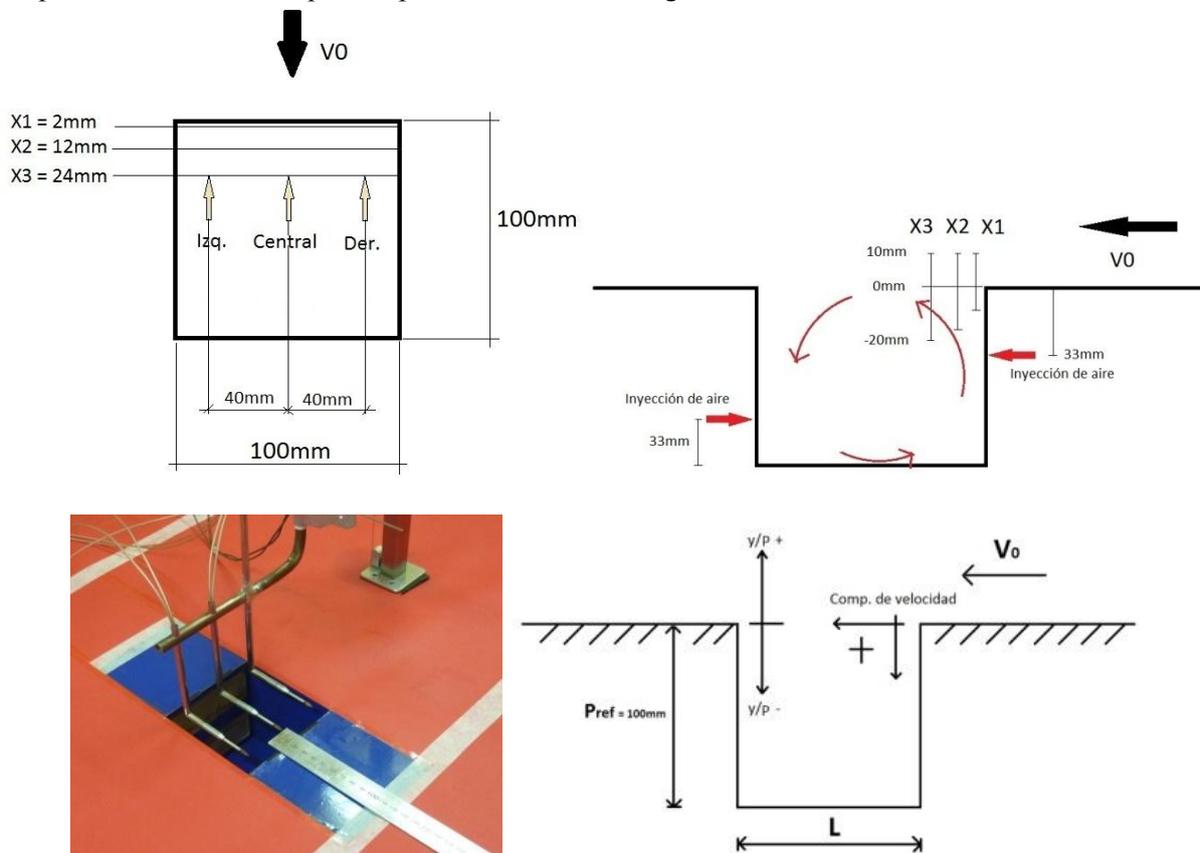


Figura 6. Relevamiento de la capa de corte y desarrollo tridimensional del flujo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados aquí presentados corresponden a una velocidad de la corriente libre de 5m/s, medido en la estación E1 (20cm aguas arriba de la cavidad).

El trabajo de Rockwell et.al [8], sugiere que la interacción de las estructuras vorticosas con el borde posterior de la cavidad afecta la zona de la capa de corte cercana al borde anterior, de manera que esta propagación aguas arriba se manifiesta en fluctuaciones de velocidad que refuerzan la generación de

estructuras vorticosas que sustentan el ciclo de las fluctuaciones de la capa de corte. Esto conduce a la convivencia de oscilaciones coherentes en un flujo no estacionario turbulento, y la completa interpretación del mecanismo físico generado por esta interacción requiere del análisis de mediciones instantáneas del campo de velocidades en todo el dominio.

Es preciso mencionar que la utilización de técnicas como PIV (velocimetría de imágenes de partículas), no solo permiten obtener información instantánea del campo de flujo completo, sino también eliminan la interferencia que las sondas de medición (como las utilizadas en anemometría de hilo caliente) generan sobre el campo de velocidades que se está midiendo, siendo preciso mencionar la relevancia de este aspecto en el caso del flujo sobre la cavidad.

No obstante, con la intención de evaluar el desarrollo de la capa de corte (shear layer), algunos investigadores obtuvieron información importante realizando mediciones de las fluctuaciones de velocidad en la capa de corte no estacionaria utilizando mediciones puntuales de anemometría (hilo caliente [8], anemometría láser-doppler (LDA) [10]). En particular, Pereira et. al. [11] obtuvieron espectros de velocidad en algunos puntos específicos dentro de la capa de corte; Schachenmann et. al. [12] caracterizaron las componentes en frecuencia y la distribución en la dirección del flujo de las ondas organizadas a lo largo de una cavidad rectangular abierta. Gharib et. al. [10] desarrollaron una serie de experimentos empleando anemometría láser-doppler (LDA) como parte del estudio de la influencia de las condiciones iniciales en el establecimiento de las oscilaciones “auto-sostenidas” y del mecanismo de realimentación, para desarrollar métodos de control de flujo sobre dichas oscilaciones.

En nuestro caso, al carecer de equipos para LDA y PIV, los resultados obtenidos mediante mediciones puntuales de velocidad serán complementados con mediciones de presiones instantáneas sobre la superficie de la cavidad, las cuales pueden relacionarse directamente con variaciones globales del patrón de flujo [2,8,9].

A través de ensayos experimentales, Rossiter [2] encontró una correlación empírica que representa las frecuencias resonantes de la cavidad. Dicha correlación está definida por la siguiente expresión [2]:

$$f = \frac{U (m - \gamma)}{L \left(\frac{1}{K} + M \right)} \tag{1}$$

Donde:

L: largo de la cavidad [m]

U: velocidad de la corriente libre [m/s]

M: Mach de corriente libre

K: constante; representa la proporción de la velocidad de los vórtices sobre la cavidad respecto a la velocidad de la corriente libre.

m: modo de frecuencia (número entero)

γ: constante igual a 0.25 según referencia [2].

Durante los ensayos sin inyección de flujo, se verificó en la estación E5 a 4mm por sobre el borde de la cavidad ($y/Pref = 0.04$), fluctuaciones que podrían corresponderse con los primeros modos de Rossiter como se presenta en la Tabla 2 y en el espectro de potencia de la Figura 7.

Tabla 2. Frecuencias de Rossiter.

L [m] =	0.1		m f [Hz]	
Ue [m/s]=	5		1	14.169
C [m/s]=	334		2	33.062
M =	0.01497		3	51.954
K =	0.38		4	70.847
γ =	0.25			

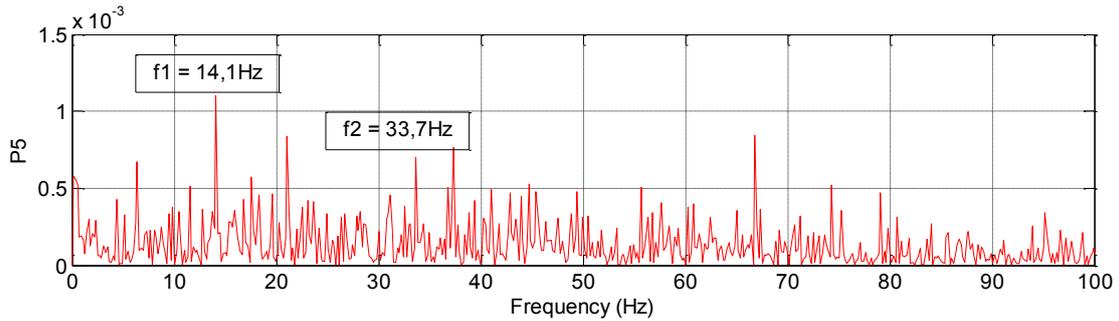


Figura 7. Espectro de potencia de la estación E5 - $y/Pref = 0.04$.

Los resultados de la caracterización del sistema de inyección interna de aire se presentan en la Figura 8; el espectro de frecuencias confirma que el aire es inyectado dentro de la cavidad a la misma frecuencia que es conmutada la electroválvula, existiendo una importante atenuación en la energía dada por la configuración del sistema, necesaria para asegurar la uniformidad de inyección en la envergadura de la cavidad.

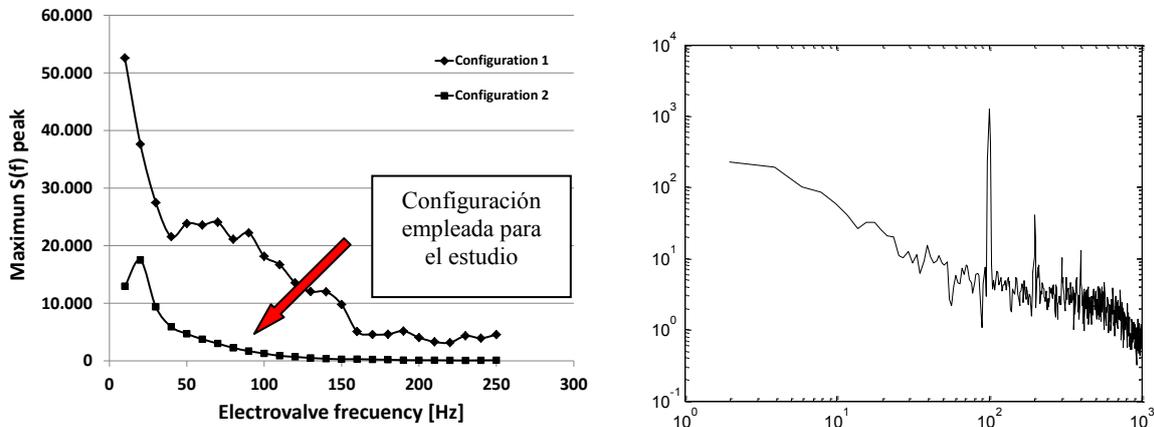


Figura 8. Caracterización del sistema de inyección de aire.

En la Figura 9 se observan los perfiles de velocidad media de la componente vertical para tres casos característicos (“sin inyección de aire”, “con inyección continua”, “inyección a 10Hz”), para las estaciones E3 (arriba a la izquierda), E4 (arriba a la derecha) y E5 (abajo al centro) de acuerdo a lo indicado en la Figura 4. Es notable el apartamiento respecto al caso sin inyección tanto en magnitud como en signo de la velocidad hasta $y/Pref = 0.3$ (30mm sobre la cavidad), disminuyendo rápidamente a medida que nos alejamos en la vertical.

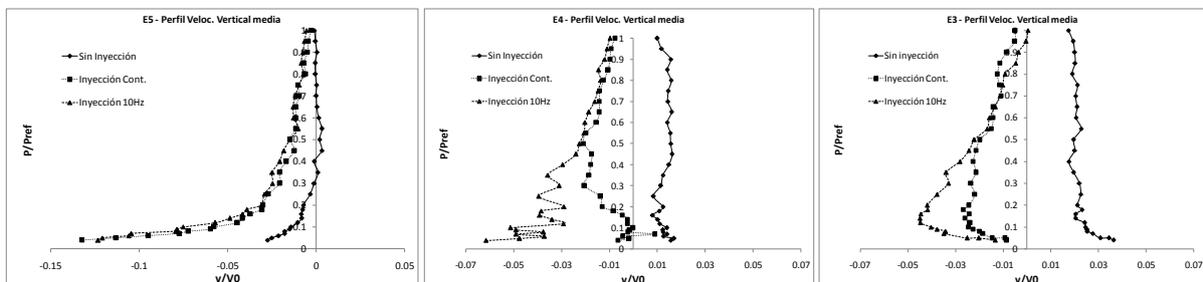


Figura 9. Componente vertical de la velocidad, en las estaciones E3, E4, E5.

En la Figura 10 se observa la variación del perfil de velocidades medias en la capa de corte, sin inyección de aire, mientras que la Figura 11 y Figura 12 ponen en evidencia la influencia del soplado continuo y a 10Hz, respectivamente, ambos casos con un caudal de 4L/min por inyector (total 72L/min).

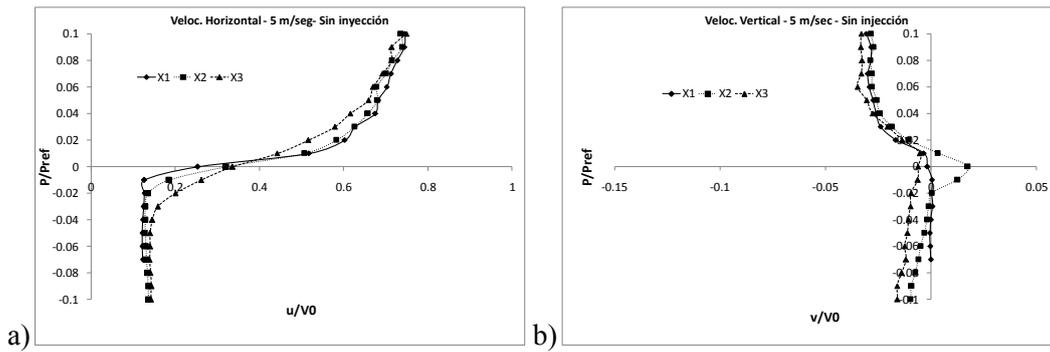


Figura 10. Perfiles de velocidad media, capa de corte, sin inyección.

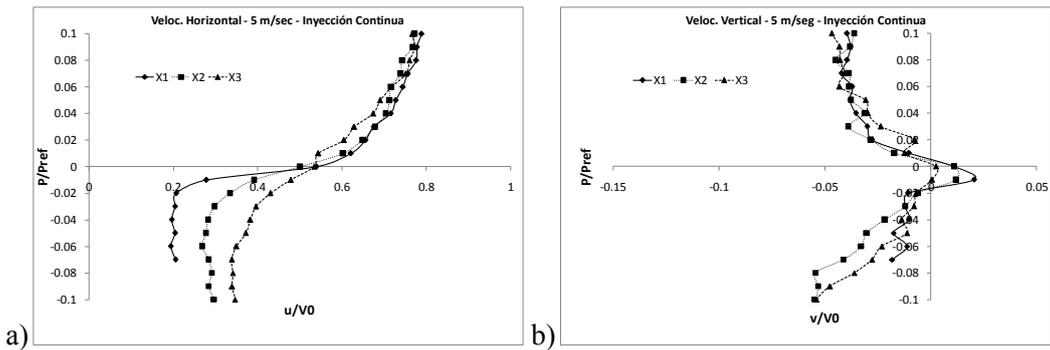


Figura 11. Perfiles de velocidad media, capa de corte, inyección continua.

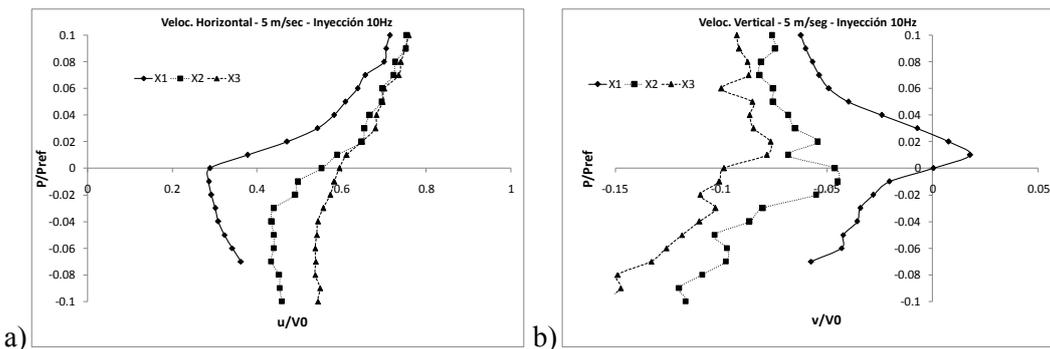


Figura 12. Perfiles de velocidad media, capa de corte, inyección 10Hz.

CONCLUSIONES

El flujo que abandona el borde de ataque de la cavidad evoluciona generando un patrón de estructuras vorticosas a medida que avanza hasta encontrarse con el borde de fuga; la solución final del flujo necesariamente responde a una compleja relación entre las características propias del flujo y la geometría de la cavidad.

Las oscilaciones propias de la capa de corte (shear layer) de la cavidad se evidencian a través de un pico bien definido en el espectro de frecuencias [7], y de acuerdo a lo enunciado en la referencia [2], es posible asumir que lo observado en el espectro presentado en la Figura 7 corresponde al primer modo de la cavidad ensayada en condiciones de flujo turbulento ($It > 1\%$).

Los perfiles de velocidad permiten observar el engrosamiento de la capa de corte hacia el borde posterior de la cavidad, como así también la alteración que sufren en función de la frecuencia de inyección, lo que hace evidente la posibilidad de ejercer control indirecto sobre el flujo exterior manipulando el flujo interior de la cavidad, razón que motiva el análisis experimental de nuestro trabajo de investigación.

No obstante, el carácter no estacionario del fenómeno y la fuerte dependencia con la geometría del dominio, se requiere información instantánea global que permita relacionar las variaciones del campo

de flujo instante a instante en cada sector de la cavidad. Por tal motivo se prevé a futuro completar estos resultados con mediciones de presiones instantáneas sobre la superficie de la cavidad.

REFERENCIAS

1. Roshko A: Some Measurement of Flow in a Rectangular Cutout; NACA TN Report-3488, 1955.
2. Rossiter J: Wind Tunnel Experiment on the Flow in Rectangular Cavities at Subsonic and Transonic Speeds; British ARC R& M No. 3428, 1964. (paper)
3. MacManus DG. and Doran DS: Passive control of transonic cavity flow, *Journal of Fluids Engineering: Transactions of ASME*, 2008, 130 (6) 064501-1-064501-4. (paper)
4. C. W. Rowley and D. R. Williams: Dynamics and Control of High-Reynolds-Number Flow over Open Cavities, *Annual Reviews of Fluid Mechanics* 38, January 2006, pp 251–276. (paper)
5. Asai T. and Nishioka M.: An experimental study on the mechanism of supersonic cavity flow oscillations; *Journal of Japan Society of Fluid Mechanics*, 2003, Vol. 22, pp. 131-145.
6. Cattafesta III L.N, Song Q., Williams D.R., Rowley C.W: Active control of flow-induced cavity oscillations; *Progress in Aerospace Sciences*, 2008, Vol. 44, pp 479-502.
7. Gharib M. and Roshko A.: The effect of flow oscillations on cavity drag; *Journal of Fluid Mechanics*, 1987, Vol. 177, pp. 501-530.
8. Rockwell D. and Naudascher E.: Review self-sustained oscillations of flow past cavities; 1978, *Journal of Fluids Engineering*. Vol. 100, Issue 2, pp. 152-165.
9. Lin J.C. and Rockwell D.: Organized Oscillations of Initially-Turbulent Flow Past a Cavity; 2000, US Department of Energy - Lockheed Martin Corporation, Report LM-00K80.
10. Gharib M., Roshko A. and Sarohia V.: Effect of Flow Oscillations on Cavity Drag and a Technique for their Control; 1985, Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology.
11. Pereira J. C. and Souza J. M.: Experimental and Numerical Investigation of Flow Oscillations in a Rectangular Cavity; 1995, *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 117, pp. 68-74.
12. Schachenmann A. and Rockwell D.: Self-Generation of Organizaed Waves in an Impinging Jet at Low Mach Numbers, 1982, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 117, pp. 425-441.
13. Sarohia V.: Experimental Investigation of Oscillations in Flows Over Shallow Cavities; 1977, *AIAA Journal*, Vol. 15, No. 7, pp. 984-991.