

ESTUDIO DE SENSIBILIDAD DE PARÁMETROS DE MODELOS EN FLUJOS CAVITANTES EN RÉGIMEN NO ESTACIONARIO

E. Franco Cappa^a, Flavio H. Moll^a, Miguel G. Coussirat^a, Ernesto F. Gandolfo Raso^a, Alfred Fontanals^b, Alfredo Guardo^b.

^a*Grupo LAMA- Universidad Tecnológica Nacional-Facultad Regional Mendoza, Argentina;*

^b*Departamento de Mecánica de Fluidos, EUETIB-Universitat Politècnica de Catalunya, España.*

Palabras Clave: cavitación, validación, calibración, CFD, turbulencia, turbomáquinas.

Resumen. La cavitación es un complejo fenómeno físico que se presenta generalmente en flujos turbulentos afectado por varios factores, como la presión del sistema y la concentración de gases no condensables disueltos. Para analizar este comportamiento se han desarrollado modelos matemáticos, algunos de los cuales se encuentran dentro de software de simulaciones comerciales.

Para ser aplicados, junto con modelos de turbulencia, deben fijarse cierto número de parámetros de calibración que han sido establecidos sólo para un número reducido de tipos de flujo (geometrías simples, variables del fluido típicas, flujo no desprendido, etc.). Cuando empieza a aparecer el flujo inverso, incluso en geometrías simples, la capacidad de predecir correctamente el fenómeno de cavitación es menor y se cree que un estudio cuidadoso de sensibilidad de parámetros es útil a la hora de realizar aplicaciones de simulación a casos industriales.

Este trabajo amplía resultados ya obtenidos anteriormente, estudiando en detalle los modelos de mejor comportamiento ya seleccionados, producto de la experiencia adquirida. Se busca ahora identificar la mejor combinación de parámetros a través de la comparación de resultados experimentales de flujos cavitantes, de características fuertemente no estacionarias, de típica aparición en turbomáquinas hidráulicas (TMH), extendiendo los trabajos de calibración ya realizados anteriormente. Se ha seguido utilizando geometrías simples (tipo Venturi) con el objeto de centrarse en los modelos de turbulencia y cavitación ya probados para casos estacionarios y por tener una abundante información experimental de flujos cavitantes en estas geometrías. Los trabajos de validación/calibración se llevaron a cabo comparando perfiles de velocidad del fluido, la presión en la zona cavitante y la frecuencia del ciclo de crecimiento y decrecimiento de la cavidad, entre otras variables, ajustando los coeficientes de producción/disipación de energía turbulenta y algunos parámetros típicos del modelo de flujo cavitante los que pueden influir en la exactitud y estabilidad de las predicciones numéricas.

1 INTRODUCCIÓN

La cavitación se corresponde a una estructura bifásica (líquido-vapor) cuando la presión del líquido disminuye hasta su presión de vapor, p_v . Esta disminución de p_v puede deberse a diversos factores relacionados con la hidrodinámica del flujo y las propiedades físicas del fluido, pudiendo presentar diferentes características en cuanto a su configuración, (e.g. de burbujas, de lámina, supercavitación, etc., e.g. ver: [Hammit, 1980](#), [Brennen, 1995](#), [Franc y Michel, 2004](#)). Una completa descripción de la fenomenología de la cavitación hidrodinámica relacionada con los intereses del presente trabajo puede encontrarse en [Moll et al., 2011](#), [Moll et al., 2012](#) y en [Gandolfo et al., 2013](#).

Numerosos experimentos se han hecho para intentar caracterizar el tipo de cavitación. Trabajos realizados sobre geometrías simples tales como orificios, (e.g., [Nurick, 1976](#)), expansiones abruptas (e.g. [Callenaere et al., 2001](#)), Venturis ([Stutz et al., 1997a](#), [Stutz et al., 1997b](#), [Stutz et al., 2000](#), [Sato et al., 2003](#), [Barre et al., 2009](#)), o álabes sumergidos en una corriente (e.g., [Le Q. et al., 1993](#)), muestran que el estado de cavitación desarrollada tiene estructuras de vaporización/colapso de burbujas, similares a las que aparecen en dispositivos hidráulicos industriales, en ciertos casos de tipo periódica en su desarrollo, y dependen del estado fluidodinámico del flujo, siendo algunas de ellas más agresivas desde el punto de vista del daño por cavitación. En estos experimentos se han definido y se emplean diferentes parámetros de gran utilidad para clasificar el tipo de cavitación de cara a su estudio más detallado.

Para el caso de cavitación de lámina estacionaria, los casos de orificios, ([Nurick, 1976](#)), muestran que puede definirse el tipo de cavitación sólo en función de un parámetro de cavitación, σ (ver Ec. (1)), definido en función de presiones a la salida del orificio y velocidades medias, (ver más detalles en [Moll et al., 2011](#)). Su rango de variación en cuanto al tipo de cavitación es limitado, pues es difícil observar fenomenología asociada a procesos no estacionarios debido a que las escalas del flujo bifásico en estos procesos son pequeñas. Para el caso de álabes, la situación ya es más compleja debido a que intervienen más parámetros y pueden observarse efectos de oscilaciones/desprendimientos de las cavidades formadas, con más claridad. La frecuencia de estas oscilaciones y desprendimientos puede ser medida de forma relativamente simple y es por lo tanto un parámetro bien definido que puede relacionarse con el tipo de cavitación existente. Debido a que la frecuencia de desprendimiento no puede relacionarse directamente entre experimentos, muchas veces se adoptan parámetros adimensionales para la evaluación del comportamiento dinámico de una cavidad desarrollada ([Dular et al., 2009](#)). Un parámetro clásico para identificar este efecto es el número de Strouhal, Sr (ver Ec. (2)). También, existe amplia información de la descripción del comportamiento global de las cavidades que se desarrollan en la parte superior del álabe bajo un cierto ángulo de ataque, α , y en relación a un cierto parámetro de cavitación σ (ver Ec. (1)), definido específicamente para este tipo de problemas, ver más detalles en [Le Q. et al., 1993](#), [Moll et al., 2011](#) y [Moll et al., 2012](#). Para el caso de expansiones abruptas, la altura del escalón pasa a ser un parámetro relevante también ([Callenaere et al., 2001](#)). Para dispositivos tipo Venturi, ya sea de Venturis 2D, ([Stutz et al., 1997a](#), [Stutz et al., 1997b](#), [Stutz et al., 2000](#), [Barre et al., 2009](#)), o axi-simétricos ([Abuaf et al., 1981](#), [Sato et al., 2003](#)), la cavitación se caracteriza de forma similar a los experimentos ya discutidos; en función de una cierta geometría del dispositivo, del σ , definido ad-hoc, del Sr y de los ángulos de inclinación de la pared convergente/divergente del mismo, α/β , ([Figura 1](#)).

En este caso, la definición para el σ , está dada por:

$$\sigma = (p - p_v) / (0,5 \rho v_\infty^2) \quad (1)$$

donde p es la presión de referencia (absoluta) en una posición definida a la entrada de la zona de ensayo, p_v presión de vapor, ρ es la densidad del fluido y v_∞ es la velocidad de la corriente libre en dicha entrada. La combinación de valores para σ (ver Ec. (1)), y β permite definir distintos tipos de flujo cavitante de forma similar a lo presentado para otras geometrías, en donde el tipo de flujo cavitante es función de σ y la geometría. El Sr se define convenientemente como:

$$Sr = (fL)/v_\infty, \quad (2)$$

donde f es la frecuencia característica de la oscilación, L es una longitud característica y v_∞ es la velocidad ya definida.

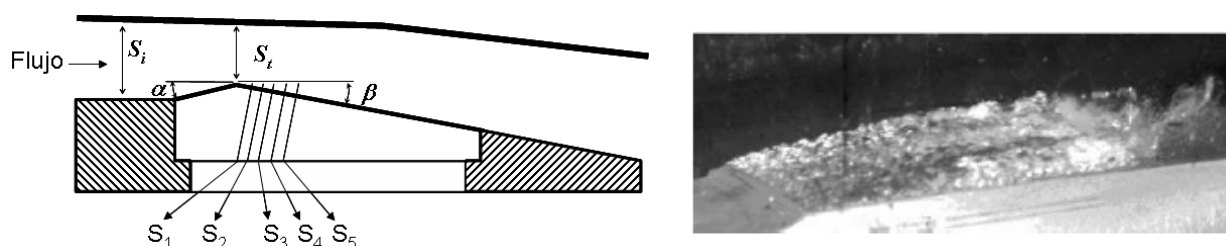


Figura 1: Izquierda Geometrías simplificadas Venturis para estudios de cavitación: 1) de lámina, estacionaria, (steady attached sheet cavitation, $\alpha=4,5^\circ$, $\beta=4^\circ$, según Stutz et al., 1997a, Barre et al., 2009), 2) lamina/nube, no estacionaria (unsteady sheet/re-entrant jet cavitation, $\alpha=18^\circ$, $\beta=8^\circ$, según Stutz et al., 1997b y Stutz et al., 2000). Derecha: Desarrollo de la burbuja sobre la pared del Venturi, ($\alpha=4,5^\circ$, $\beta=4^\circ$, ppm ~ 8 , $v=7.2$ m/s, steady attached sheet cavitation)

En el caso de Venturis 2D las referencias citadas presentan resultados experimentales muy completos de la fracción de vapor y perfiles de velocidades dentro de la burbuja (estaciones S_1 , S_2 , S_3 , S_4 y S_5 , ver Figura 1) y de la longitud de la cavidad, usando como referencia la isolínea de fracción de vapor 0,2 o 0,3, en una geometría básica como la mostrada en la Figura 1, con cambios en los ángulos α y β que permite modificar la estructura del flujo cavitante desde cavitación de lámina estacionaria (steady sheet attached cavity) hasta cavitación del tipo lamina/nube no estacionaria, en donde aparece el fenómeno de recirculación del flujo (unsteady sheet/re-entrant jet cavity). Se midió también el nivel de turbulencia en la entrada, los parámetros relacionados con σ , (ver Ec.(1)), la temperatura, la p_v y el nivel de gases disueltos en el agua. Asimismo se indica cual es el grado de incerteza de las medidas experimentales y la metodología utilizada para su cálculo. En este caso la altura de la garganta S_t y de la sección de la entrada S_i , es 43,7 mm y 50 mm. Y tiene un ancho uniforme de 40 mm. La distancia horizontal a la garganta de cada una de las estaciones de medición es $S_1=5,1$ mm, $S_2=20,9$ mm, $S_3=38,4$ mm, $S_4=38,4$ mm y $S_5=73,9$ mm.

Los experimentos muestran que cuando la velocidad es de 7,2 m/s en la sección de entrada al Venturi y los ángulos son $\alpha = 4,5^\circ$, $\beta = 4,0^\circ$ respectivamente, la cavidad formada es muy estable caracterizada por una longitud casi constante en el tiempo, aunque la región de cierre de la burbuja muestra pequeñas fluctuaciones debido a pequeños desprendimientos de burbujas de muy pequeño tamaño, y a un incipiente y muy localizado fenómeno del tipo re-entrant jet en el final de la cavidad, esto es, existe flujo reverso en las cercanías de la pared del Venturi en esa zona. No se han observado para este caso ciclos periódicos de grandes desprendimientos. Estos ciclos si se observan cuando se incrementan los ángulos a $\alpha = 18,0^\circ$, $\beta = 8,0^\circ$ para velocidades incluso menores (del orden de 7,0 m/s) que las del caso anterior. Se observa que aparece una cavidad con su comienzo establemente vinculado a la pared en la zona de la

garganta del Venturi, que va creciendo progresivamente hasta que en su extremo corriente abajo se inicia un proceso de re-entrant jet que hace que la cavidad se desprenda y se convecte corriente abajo. Este proceso es cíclico y se pueden identificar frecuencias características de desprendimiento.

La predicción, o mejor, la posibilidad de evitar daños por cavitación ha sido el objeto de muchos de los experimentos ya mencionados. Este fenómeno, por su complejidad (hay múltiples dependencias entre parámetros del fluido/flujo) no es posible de predecir mediante formulaciones teóricas. Generalmente se considera que los principales parámetros que influyen en el comienzo de la cavitación y sus siguientes estados son la geometría por donde fluye el fluido, la presión absoluta y la velocidad del flujo, y la presión crítica, $p_{crít}$, que es asociada en la mayoría de los casos a la presión de vapor, p_v , que es la presión en donde el líquido comienza a sufrir el cambio de fase a fase vapor. La evidencia experimental (e.g. Keller, 1992), indica que el fenómeno de cavitación está regido fuertemente por dos grupos principales de parámetros: los que caracterizan el fluido (e.g., su viscosidad, su cantidad de núcleos, esto es, impurezas y gases disueltos, que afectan el comienzo de la cavitación), y otras que caracterizan el flujo (e.g., velocidad media, su nivel de turbulencia, el desarrollo de capas límites, desprendimientos). Muchos de estos parámetros son difíciles de medir y luego no son tenidos en cuenta. Estos resultados, provenientes de una extensiva experimentación, indican que es necesario tener una clara identificación tanto de los efectos viscosos como de la calidad del agua (impurezas llamadas núcleos) para asegurar reproductibilidad de resultados. Desafortunadamente, mucha de la información experimental no indica claramente los valores de estos parámetros tan importantes.

Según lo previamente reseñado, para el estudio de estos flujos, históricamente, se han utilizado ensayos experimentales. Más recientemente se ha empezado a usar mecánica de fluidos computacional (CFD por sus siglas en inglés) para caracterizar este tipo de flujos, debido a que la estructura de los bancos de ensayo es compleja, con numerosos sensores para la medición de parámetros de interés y de alto costo de los experimentos. Luego, es de interés evaluar si mediante modelado CFD se puede caracterizar el tipo de estructura que posee la zona de vaporización/colapso de las burbujas en diferentes dispositivos hidrodinámicos. El modelado CFD de flujos cavitantes recién se ha comenzado a abordar intensivamente desde hace una década, debido a que este tipo de flujo muestra una gran complejidad, (ver detalles en Moll et al., 2011, Moll et al., 2012 y en Gandolfo et al., 2013). Una buena cantidad de referencias de estos trabajos numéricos con desarrollo y aplicación de CFD a experimentos en geometrías simples tales como escalones, orificios, Venturis, cuerpos sumergidos aislados (cuerpos romos y álabes) e incluso turbo máquinas hidráulicas, también pueden verse en Moll et al., 2011, Moll et al., 2012 y en Gandolfo et al., 2013. Estos desarrollos hacen que al presente, dentro de un código numérico CFD comercial (e.g. ANSYS-Fluent v13, 2010), o abierto (e.g. OpenFoam, v2.1.1, 2012), utilizado para las simulaciones del presente trabajo, se dispongan de varios submodelos: A) para la turbulencia: del tipo EVM (Eddy Viscosity Models), (e.g.: Spalart-Allmaras (S-A), $k-\varepsilon$ en sus diferentes versiones, $k-\omega$ en sus diferentes versiones), o del tipo Reynolds Stress Model (RSM), o del tipo Large Eddy Viscosity (LES) o Detached Eddy Viscosity models (DES), (ver más detalles sobre estos modelos en e.g.: Launder et al., 1975, Wilcox, 1993, Versteeg et al, 1996, Durbin et al., 2001). B) para la cavitación: ej: Singhal et al., 2002, Zwart et al., 2004.

El estado actual de desarrollo en el ámbito de modelado numérico de flujos turbulentos y bifásicos (e.g., cavitación) industriales, y su costo en términos de tiempo de CPU, implica generalmente sólo el uso de modelos del tipo EVM que representan las fluctuaciones de manera escalar, o del tipo RSM que tienen en cuenta la forma tensorial de estas fluctuaciones. Más recientemente se han presentado simulaciones con modelos tipo LES combinados con

modelado de la interfase líquido-vapor del tipo Volume of Fluid (VOF) (e.g. [Nouri et al., 2011](#)) que presentan detalles de fracción de vapor y perfiles de velocidad junto con estructuras de flujo cavitante en Venturis, pero las opciones del tipo LES están aún lejos de ser aplicadas a modelado industrial. Por lo que la selección/combinación más idónea de submodelos del tipo EVM/RSM+cavitación, así como sus respectivas calibraciones, es aún un tema abierto, tanto en términos de buena aproximación a los resultados experimentales, como de tiempo de CPU consumido, en la aplicación de CFD.

Relacionado con la selección de submodelos adecuados para la turbulencia y para la cavitación, en trabajos previos a éste ([Moll et al., 2011](#) y [Moll et al., 2012](#)) ya se estudió con bastante detalle que combinación de submodelos era la mejor en casos de orificios y Venturis. Específicamente, para el modelado de la cavitación se definió el uso de modelo de Singhal por ser más completo frente a otras opciones. En estos trabajos puede encontrarse una completa referencia de todos los submodelos utilizados, incluyendo discusiones sobre algunos de los parámetros de modelado que permitían ajustar los resultados experimentales de una manera más eficiente. Una de las conclusiones obtenidas, respecto del modelado de la turbulencia, es que no puede definirse claramente la superioridad de un submodelo sobre otro. La calidad de las aproximaciones obtenidas es siempre "problema-dependientes". Es por ello que muchas veces se justifica el uso de más de un modelo ([Coussirat, 2003](#)) a los efectos de tener una cierta garantía de que las aproximaciones obtenidas sean adecuadas. Para el caso de flujos cavitantes la aproximación RANS+EVM/RSM+Singhal; conduce a una separación de baja frecuencia entre las escalas computadas directamente o mediante modelado. Para el caso de una gran cantidad de flujos cavitantes no estacionarios con frecuencias de desprendimiento periódico por debajo de 100 Hz esta aproximación es suficientemente buena (ver más detalles en [Moll et al., 2011](#)), aunque también se sabe que la mayoría de los EVM tienen dificultades cuando se aplican a estos casos, debido a la sobre-predicción de la viscosidad turbulenta que reduce el desarrollo de inestabilidades típicas en flujos con cavitación de lámina (i.e., attached sheet cavitation, ver [Goncalves et al., 2009](#)). Una posibilidad de ajustar mejor estos casos es la limitación de la viscosidad turbulenta en esas zonas, lo que ha conducido a numerosas estrategias para hacer esto (e.g. [Coutier Delgosha et al., 2003a](#), [Vaidyanathan et al., 2003](#), [Goncalves et al., 2009](#), [Barre et al., 2009](#)). Más específicamente, y en lo que respecta a la calibración de los submodelos mediante estudios de sensibilidad a sus parámetros internos, [Coutier-Delgosha et al., 2003a](#), para el caso de Venturis y cavitación del tipo lamina/nube, señalan la fuerte dependencia existente entre el modelado de cavitación y de la turbulencia como era de esperarse. Estos autores muestran que la sobrepredicción de viscosidad turbulenta en la parte posterior de la cavidad conduce al cómputo de una consecuente sobrepredicción de la fracción de vapor en esa zona. El trabajo de [Vaidyanathan et al., 2003](#), muestra que adecuadas combinaciones de parámetros que afectan la producción/disipación de turbulencia en conjunto con los parámetros que regulan la evaporación/condensación de fases pueden mejorar la predicción de la fracción de vapor en diferentes geometrías de cuerpos sumergidos, pero sólo usando un modelo k- ϵ . Similares resultados para el caso de Venturis han sido presentados por [Reboud et al., 2003](#), incluyendo efectos de compresibilidad en el modelado de la turbulencia, para varios modelos turbulentos, pero sólo incluyendo estudios de sensibilidad de parámetros relacionados con el control de la viscosidad turbulenta para el modelo k- ϵ .

Uno de los objetivos del presente trabajo es ampliar los estudios de sensibilidad de parámetros ya realizados en trabajos previos ya reseñados, extendiéndolos a un mayor número de modelos turbulentos y a casos de cavitación del tipo lamina/nube, donde los efectos no estacionarios ya son importantes, pues el efecto de re-entrant jet afecta fuertemente el comportamiento de la zona de vaporización/condensación de la cavidad, generándose ciclos de compresión-expansión-desprendimiento dentro de la misma. A partir de lo expuesto, se

pretende explorar esta posibilidad con más detalle utilizando los datos experimentales de [Stutz et al., 1997a](#), [Stutz et al., 1997b](#), [Stutz et al., 2000](#) y [Barre et al., 2009](#), debido a la amplia información experimental para caracterizar la estructura del flujo cavitante.

Para el caso cuasi-estacionario estudiado por [Barre et al. \(2009\)](#), los experimentos indican que existe una cavidad cuasi-estacionaria, con leves cambios en la longitud de la cavidad y con pequeñas fluctuaciones en la parte final de la misma. En [Moll et al. \(2012\)](#) y [Gandolfo et al. \(2013\)](#) se simuló este caso como estacionario, esperando ver solamente (en promedio) el efecto de flujo reverso. En los resultados obtenidos no se manifestó este efecto, si detectado en los experimentos. Se procedió entonces a simular un caso no estacionario de esta configuración experimental.

2 METODOLOGÍA DESARROLLADA

Como parte de las actividades de I+D que actualmente se desarrollan en la Facultad Regional Mendoza de la Universidad Tecnológica Nacional, (FRM-UTN), existe un proyecto orientado a caracterizar la fenomenología de la cavitación y el daño que ésta produce en TMH, siendo el desarrollo de este proyecto de carácter interdisciplinario. Una parte del trabajo a desarrollar implica la construcción de un banco de ensayos experimentales (tipo Venturi) que contempla la introducción de probetas recargadas con distintos tipos de aleación, para analizar la resistencia de éstas al daño por cavitación, mediante el análisis de la estructura microscópica de la probeta ensayada y de la tasa de pérdida de material que ésta sufre después de un cierto tiempo de ensayo. Los resultados obtenidos pretenden identificar las mejores aleaciones que puedan luego ser utilizadas como material de base en la construcción o de recargue de zonas afectadas por el daño, durante la reparación de TMH. En la realización de cada ensayo del banco, los costos de operación y el tiempo del ensayo (alrededor de 150 h en promedio) son elevados, luego, se pretende disminuir el número de ensayos. Un objetivo dentro del proyecto es tratar de identificar mediante CFD el tipo de configuración hidrodinámica (geometría del Venturi/probeta y parámetros del flujo circulante por el dispositivo de ensayo) que permita la disminución de tiempos de ensayo, vinculada con el tipo de flujo cavitante en la zona de ensayo, pues se sabe que ciertos tipos de cavitación son más agresivos que otros en lo que respecta a provocar daño en el material de recargue de las probetas. Relacionado con estas tareas de CFD, en trabajos previos ([Moll et al., 2011](#), [Moll et al., 2012](#) y [Gandolfo et al., 2013](#)) ya se presentaron algunos resultados relacionados con estudios de validación y de sensibilidad a parámetros de CFD para flujos cavitantes. La experiencia adquirida en estos trabajos previos permite, a partir de una definición idónea de algunos parámetros (e.g. tamaño de celdas, y^+ , etc.) disminuir los estudios de independencia de resultados a la calidad/tamaño de celdas de la malla de cálculo. Este trabajo amplía resultados ya obtenidos, estudiando en detalle los modelos de mejor comportamiento ya seleccionados, producto de la experiencia adquirida. Se ha seguido utilizando geometrías simples (tipo Venturi) con el objeto de centrarse en los modelos de turbulencia y cavitación ya probados para casos estacionarios y por tener una abundante información experimental de flujos cavitantes en estas geometrías. Un detalle interesante en el caso de Venturis, es que es posible controlar la zona en donde comienza a formarse la cavidad, ya que ésta comienza en la garganta por ser la zona de menor presión, siendo así el problema más controlado y por tanto ventajoso. Los trabajos de validación/calibración se llevaron a cabo comparando perfiles de velocidad del fluido, la presión en la zona cavitante y la frecuencia del ciclo de crecimiento y decrecimiento de la cavidad, entre otras variables, ajustando los coeficientes de producción/disipación de energía turbulenta y algunos parámetros típicos del modelo de flujo cavitante los que pueden influir en la exactitud y estabilidad de las predicciones numéricas.

3 DEFINICIÓN DE LOS MODELOS NUMÉRICOS

Para la simulación mediante CFD se utiliza el método de los volúmenes finitos. Se parte de los datos experimentales dados en [Barre et al. \(2009\)](#), en donde se presentan experimentos para flujos cavitantes del tipo de lámina (Venturi de 4°) y de lámina nube con re-entrant jet (Venturi de 8°). Se definieron mallas de cálculo partir de las geometrías de los bancos experimentales y de la definición de las condiciones de borde específicas para cada caso, las que surgen de análisis de los datos experimentales.

3.1 Mallado, tipo de flujo y condiciones de borde

Se usaron parámetros de mallado (tamaño de celda, y^+ , etc.) para definir su calidad y la independencia de resultados con la malla, ya estudiados en el trabajo previo de [Moll et al. \(2011\)](#). El flujo se modeló como 2D, ya que estudios previos usando geometrías completamente 3D no afectaron mucho la calidad de los resultados obtenidos ([Moll et al., 2011, 2012](#) y [Gandolfo et al. \(2013\)](#)). Se comprobó nuevamente que valores del parámetro y^+ en el rango de 15 - 50, con algunos valores de $y^+ < 15$; implicaban una muy débil dependencia de los resultados a la malla. Para el caso de cavitación de lámina cuasi-estacionaria (steady attached sheet cavity) de [Barre et al. \(2009\)](#), se usó la presión de vapor y la concentración de gases no condensables del ensayo. La temperatura, en todos los casos es de 293.15 K. Se definieron las condiciones de frontera: velocidad a la entrada y presión estática a la salida, según datos del ensayo. Como precaución, se extendió el dominio de cálculo en la entrada lo suficiente como para dar lugar al desarrollo de una capa límite en el flujo y estabilizar el flujo. La magnitud de esta extensión se calcula en función del número de Reynolds, Re , del sistema de manera similar al caso de tubería de sección circular. Para lograr las condiciones de flujo cavitante en el modelo CFD, a partir de la presión estática inicial definida en la salida, se fue disminuyendo de modo de lograr el valor de σ adecuado en una sección de referencia en la entrada al igual que se hizo en el experimento ($\sigma = 2,4$). Se comprobó también que el flujo tiene una configuración más estable si se extiende el dominio de cálculo a la salida del Venturi una cierta longitud en la dirección del flujo y con sección constante. Esta estrategia ya se utilizó en los trabajos anteriores e implica una mejora en la convergencia y en los tiempos de CPU invertidos para lograrla.

3.2 Parámetros de modelado y esquemas de discretización utilizados

A partir de calcular el tiempo característico de evolución de la cavidad (tiempo promedio aproximado de duración de un ciclo de crecimiento/decrecimiento definido a partir de los datos experimentales ([Goncalves et al., 2009](#), $\Delta T = 4,55 \times 10^{-4}$ s). A partir de este dato, se establecieron tres pasos de tiempo: 1×10^{-3} , 1×10^{-4} y de 1×10^{-5} s, para tratar de capturar las oscilaciones de la cavidad mediante CFD. Los parámetros de modelado son similares al caso de flujo estacionario, esto es: esquemas de estabilización del tipo upwind de segundo orden o QUICK, acoplamiento presión-velocidad mediante algoritmo tipo SIMPLE. Se fijaron los residuos normalizados en 10^{-5} y se utilizaron los pasos de tiempo definidos para la simulación no estacionaria. Todos los casos han sido simulados en doble precisión, con un solver del tipo "Pressure-Based" y formulación de la velocidad "Absolute" (ver más detalles en [ANSYS-Fluent v13, 2010](#)).

3.3 Submodelos para la turbulencia y para la cavitación utilizados

Partiendo de la experiencia obtenida en [Moll et al., 2011, 2012](#) y [Gandolfo et al. \(2013\)](#), se definió el uso de los modelos de Spalart-Allmaras (S-A), Standard $k-\epsilon$ y RSM combinado con el "full cavitation model" de [Singhal et al., 2002](#), para la cavitación, (más detalles de estos modelos en [ANSYS-Fluent v13, 2010](#)).

Para el caso de cavitación de lámina cuasi-estacionaria de Barre et al., 2009, se estudió con un poco más de detalle los parámetros relacionados con la turbulencia. Cuando se usó el modelo de turbulencia de S-A, de 1 ecuación de transporte, que simula la producción/transporte/disipación de la viscosidad turbulenta, se modificó el parámetro asociado a la producción de viscosidad turbulenta ($C_{\omega 2}$), mientras que cuando se usaron tanto el modelo Standar k- ϵ como un RSM se probaron distintas combinaciones de los parámetros C_{μ} y $C_{1\epsilon}$ que afectan al cálculo global de la viscosidad turbulenta. Los valores iniciales para las constantes de estos modelos se han obtenido por numerosas iteraciones de ajuste de datos para una amplia gama de flujos turbulentos y actualmente, en los códigos de CFD se permite modificar estos parámetros. Sin embargo esta no es una tarea trivial, pues hay que tener claridad en los efectos que producen tales cambios en las ecuaciones de transporte de las cantidades asociadas al estado turbulento del flujo. En el caso del modelo de S-A, la modificación de parámetros que afectan la viscosidad turbulenta es más "sutil" ya que sólo se afecta su producción y no su transporte o disipación. En el caso del modelo de cavitación utilizado (Singhal et al., 2002,) se utilizaron los valores de los parámetros definidos por defecto en el código numérico. En conjunto con el análisis previo, el estudio de la influencia en los resultados de los pasos de tiempo definidos, permitió concentrarse en identificar los pasos de tiempo más adecuados para lograr independencia de resultados al paso de tiempo elegido para la discretización numérica y evitar el aliasing en los resultados numéricos.

4 RESULTADOS OBTENIDOS

4.1 Caso de Barre et al., 2009 ($\beta = 4^\circ$, cavitación de lámina cuasi-estacionaria)

En busca de poder capturar flujo reverso en los perfiles de velocidad obtenidos para cada punto estación (S_1, S_2, S_3, S_4 y S_5 , ver Figura 1) a través de una simulación CFD no estacionaria. Se comenzó modelando tres diferentes pasos de tiempo para el estado no estacionario del flujo, utilizando la combinación de parámetros de mejor ajuste obtenido mediante CFD estacionario, de los resultados experimentales presentado en Gandolfo et al., 2013; donde se definió para el modelo de cavitación el de Singhal, con un valor de $7,5 \times 10^{-6}$ ppm para fracción de gases disueltos, y para el de turbulencia el de RSM con un coeficiente C_{μ} de 0,09.

Del análisis comparativo de los valores obtenidos por el modelo numérico con los datos experimentales (Barre et al., 2009), el refinamiento en el paso de tiempo utilizado para el cálculo no fue capaz de capturar las pequeñas fluctuaciones en el final de la cavidad señalada en los experimentos, que se correspondería con una cavitación de lámina cuasi estacionaria con flujo re-entrante incipiente, en donde empiezan a manifestarse los efectos transitorios según los experimentos. Al igual que en el caso estacionario, se sobrepredice el coeficiente de cavitación y la longitud de la cavidad. Similares resultados (no mostrados) se obtuvieron con el modelo Standar k- ϵ con los mismos coeficientes, como era de esperarse.

En el análisis de los perfiles de velocidad modelados se observa un razonable ajuste con los datos experimentales en las estaciones 1 y 2, no así para las estaciones 3, 4, y 5 donde no se captura el flujo reentrante (Figura 2 y Figura 3), de manera similar al caso estacionario ya presentado en Gandolfo et al., 2013. Así mismo los resultados obtenidos no mostraron diferencias significativas para los diferentes pasos de tiempo estudiados.

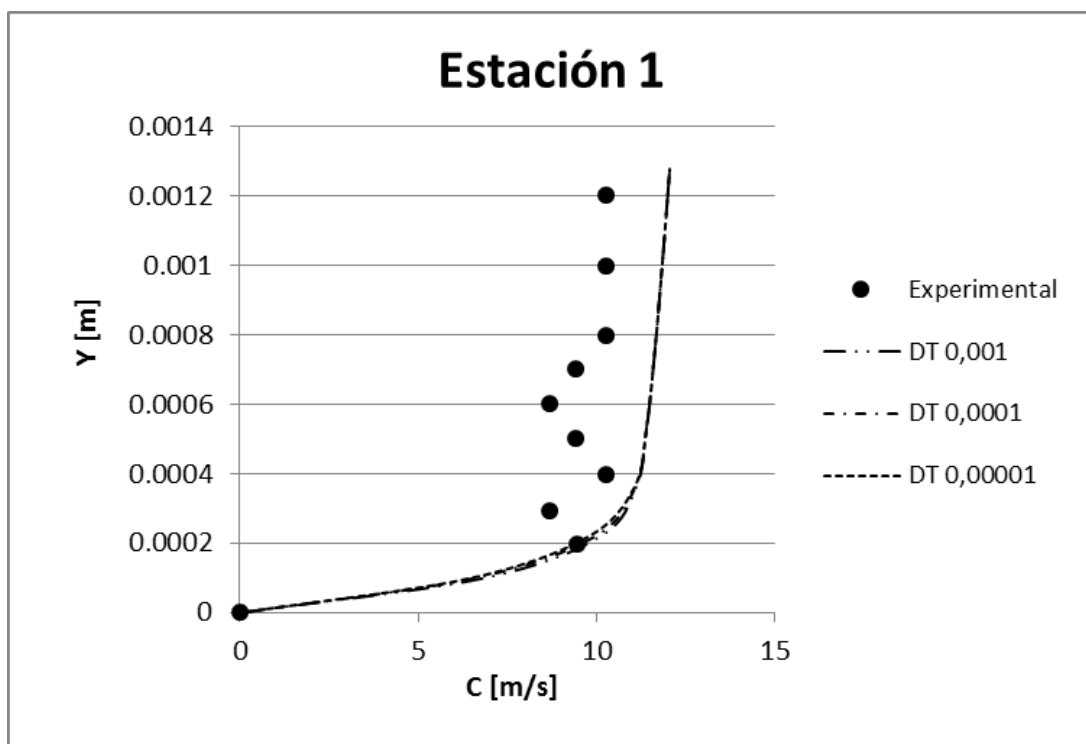


Figura 2: Perfiles de velocidades para estación 1 con pasos temporales de $\Delta T= 1,0E-3$; $1,0E-4$ y $1,0E-5$ segundos

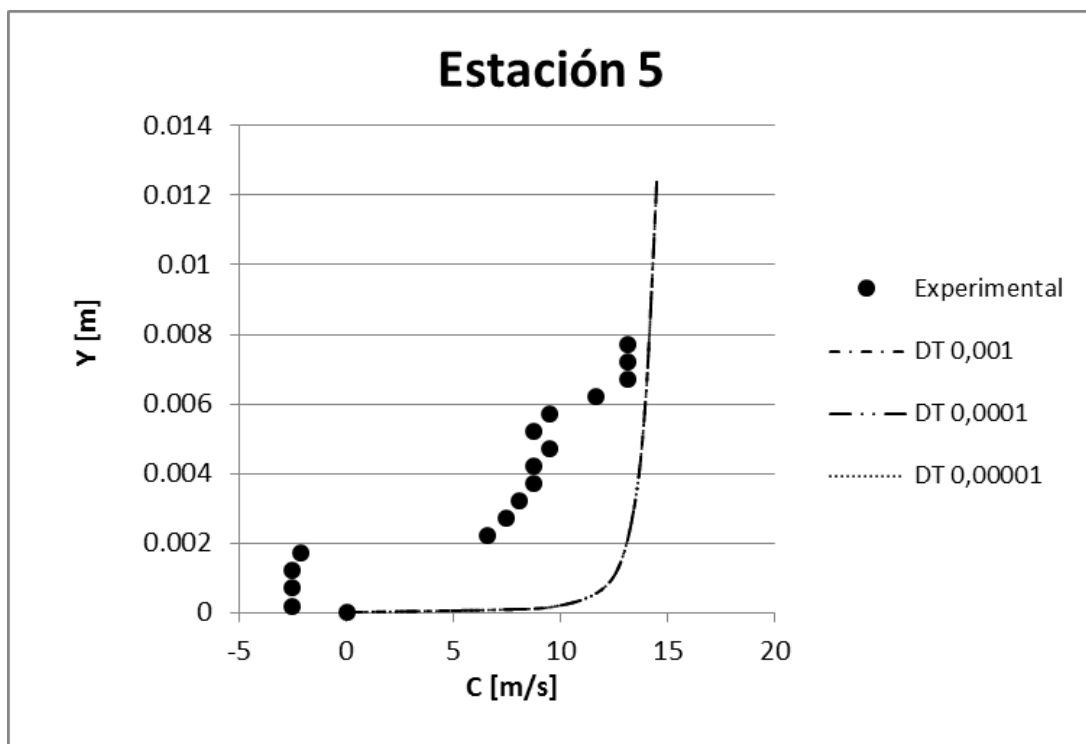


Figura 3: Perfiles de velocidades para estación 5 con pasos temporales de $\Delta T= 1,0E-3$; $1,0E-4$ y $1,0E-5$ segundos

De igual modo se analizó las fracciones de vapor calculadas, llegando a conclusiones similares, esto es, buen ajuste para las estaciones 1 y 2, y una sobrepredicción en la fracción de vapor para las restantes estaciones 3, 4 y 5; ver [Figura 4](#) y [Figura 5](#).

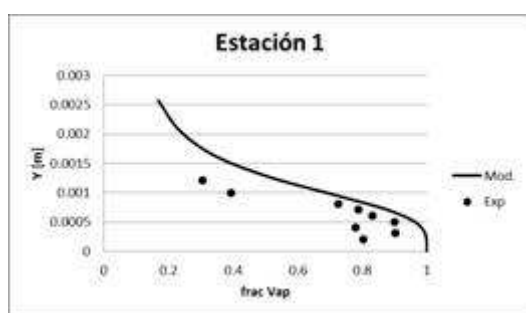


Figura 4: Fracción de vapor para estación 1 con paso temporal de $\Delta T = 1.0E-5$ segundos

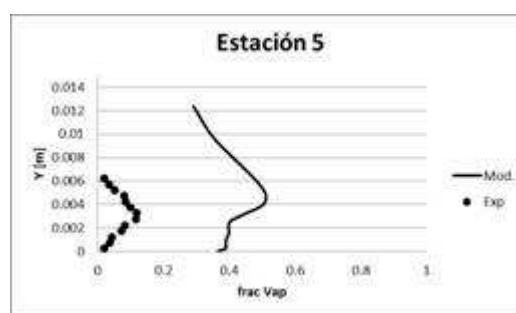


Figura 5: Fracción de vapor para estación 5 con paso temporal de $\Delta T = 1.0E-5$ segundos

4.2 Caso de Barre et al., 2009 ($\beta = 8^\circ$, cavitación de lámina/nube con re-entrant jet)

En este caso los efectos no estacionarios ya se manifiestan claramente, como muestran los experimentos. Las principales variables a observar para comparar lo registrado experimentalmente con el modelado CFD, son la fracción de vapor en la garganta del Venturi, la presencia de flujo reverso (re-entrant jet) en las cercanías a la pared inferior y las fluctuaciones de estas propiedades.

El modelo Standard k- ϵ ha sido utilizado ampliamente desde que fue desarrollado (Launder et al., 1975) debido su razonable exactitud para un amplio número de flujos y transferencia de calor de aplicación industrial. Éste posee varios parámetros de ajuste, entre ellos C_μ , y C_ϵ los cuales se encuentran calibrados para casos de flujos simples. Actualmente no está completamente relevado el impacto de estos parámetros de calibración y su importancia en diferentes escenarios de aplicación, sabiendo que en muchas situaciones tal calibración es específica del problema (ver e.g. Bardow et al. 2007). Para el caso del modelo RSM, pese a su mayor complejidad, pues es un modelos tensorial y no del tipo EVM, existe un conjunto de parámetros similares, con similares comentarios respecto de su calibración y generalidad. Esto hace necesario que se busque identificar la influencia estos parámetros para la predicción de flujos turbulentos/cavitantes para este caso particular. Se ha comenzado por estudiar las constantes C_μ y $C_{\epsilon 1}$ del modelo Standard k- ϵ debido a que se identifica más directamente su efecto sobre la viscosidad turbulenta.

En la [Tabla 1](#) se muestran valores representativos del rango estudiado para los parámetros del modelo ya señalados. Los valores predefinidos por defecto para los coeficientes son: $C_{1\epsilon} = 1,44$ y $C_\mu = 0,09$. Con valores mayores que los predefinidos de C_μ se obtuvieron mejoras de los resultados con respecto a los obtenidos con los valores predefinidos de los parámetros. El efecto de incrementar estos parámetros implica el incremento de la viscosidad turbulenta, lo que incrementa la transferencia de materia del estado de agregación líquido hacia el gaseoso, con un aumento de la cavidad de vapor en la zona de la garganta con dimensiones similares a las observadas experimentalmente.

| | | | | | | |
|-----------------|------|-------|------|-------|------|------|
| $C_{1\epsilon}$ | 1,44 | 1,44 | 1,44 | 0,7 | 2,8 | 1,65 |
| C_μ | 0,09 | 0,045 | 0,9 | 0,045 | 0,09 | 0,18 |

Tabla 1: Rango de coeficientes ajustados para el modelo k- ϵ

Por otro lado el fenómeno de desprendimiento observado y la presencia de flujo reverso que lo produce, se vio disminuido. Esto explica que este tipo de cavitación, caracterizado por efectos no estacionarios presente condiciones más estables de lo esperado, con tendencia a

amortiguarse lo que conduce a un comportamiento estacionario. En la [Figura 6](#) se compara la dirección de la velocidad para dos valores del parámetro representativos del rango estudiado.

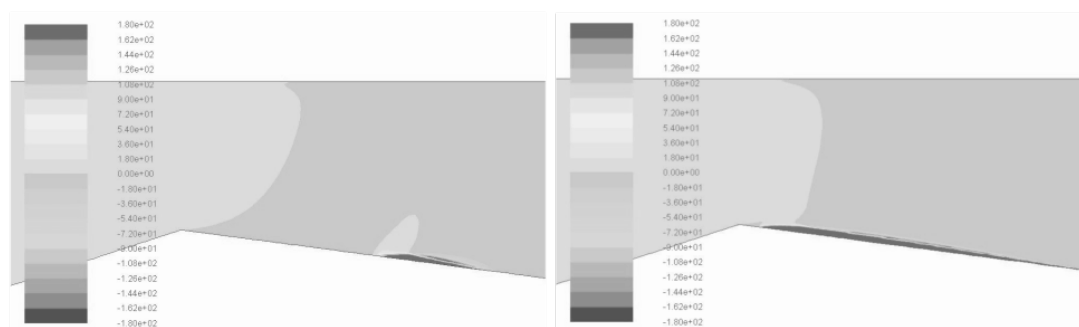


Figura 6: Dirección de la velocidad para $C_{\mu} = 0,18$ (izq.) y $C_{\mu} = 0,045$ (der.). Nótese el incremento de la zona de flujo reverso en la zona de la pared inferior del Venturi (-180°)

Al disminuir el valor de C_{μ} , se obtuvo el efecto contrario, obteniendo una cavidad de menor volumen y con un comportamiento más estable debido a que está confinada sólo a una pequeña zona de la garganta y no influenciada por velocidades en dirección contraria a la dirección media del flujo. El flujo reverso también mostró ser muy sensible a las variaciones de $C_{1\varepsilon}$. Valores menores en un 10% al definido por defecto llevaron a la desaparición de efectos no estacionarios y por ende a un flujo con características estables. Con valores mayores del estándar comienzan a aparecer zonas con desprendimiento de capa límite, acercándose al comportamiento real. Para valores aproximadamente mayores en un 20%, los perfiles de velocidad de la capa límite mostraron flujo reverso de características no estacionarias en gran parte de la zona divergente, inclusive en la pared superior. Lo que al parecer según los datos experimentales disponibles, es excesivo, por lo que este valor puede ser tomado como límite para futuros trabajos.

Es también de interés el cálculo obtenido con la combinación de parámetros ensayada por [Bardow et al.](#) (2009). Esto es, valores de $C_{1\varepsilon}=1,37$; $C_{\mu}=0,11$ más otros ajustes de calibración que permiten una correcta caracterización para el caso de flujo entre dos placas paralelas. Pero para este sistema el flujo obtenido, es netamente estacionario, con una cavidad gaseosa de dimensiones similares a las experimentales pero sin generación de flujo reverso (más detalles se pueden ver en el manuscrito de referencia).

El otro modelo utilizado fue S-A, el cual resulta de especial interés ya que se trata de un modelo de una ecuación, lo que hace que el tiempo de CPU se vea disminuido en relación al modelo Standard k- ε o al RSM. Esto en casos no estacionarios como el estudiado, puede ser significativamente ventajoso. Para este modelo el parámetro de estudio fue el denominado $C_{\omega 2}$, que afecta directamente la producción de energía cinética turbulenta, no su valor global. El rango estudiado fue $0,15 < C_{\omega 2} < 0,6$; siendo el valor por defecto el de 0,3. Los resultados obtenidos mostraron que para las condiciones estudiadas, cambios dentro del rango indicado, tienen sólo influencia leve sobre las características más significativas del flujo. En la [Figura 7](#) se muestra la fracción de vapor para los valores extremos del intervalo estudiado. Se puede apreciar un leve aumento de la cavidad con la disminución de este parámetro.

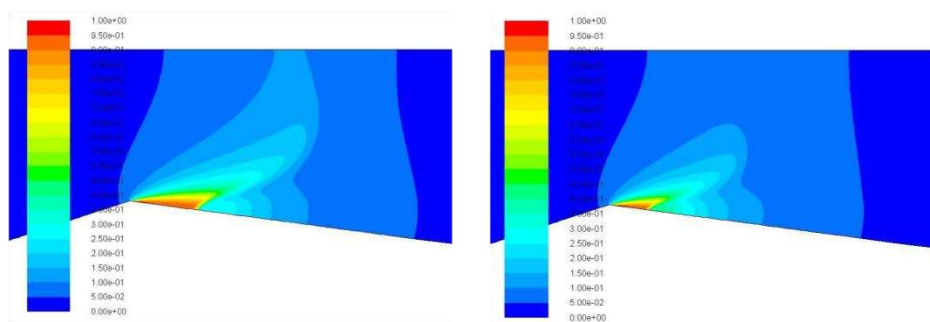


Figura 7: Fracción de vapor para $C_{o2}=0,6$ (izq.) y $C_{o2}=0,15$ (der.).

Para el menor valor del parámetro, en la [Figura 8](#) se muestra el registro de la presión media en la entrada de la geometría a través del tiempo, y en la figura izquierda el análisis de frecuencia por transformada de Fourier de la señal de presión, los resultados muestran menores frecuencias a las obtenidas experimentalmente ([Coutier-Delgosha et al., 2003b](#)). El Strouhal obtenido es aproximadamente un 30% menor al rango característico para esta geometría. Es de esperar que aumentando la inestabilidad del flujo, a través de mejorar la caracterización del desprendimiento de la capa límite, la frecuencia se acerque al rango buscado. En trabajos anteriores ([Gandolfo et al., 2013](#)) comportamientos similares se obtuvieron para otras geometrías, pero con mayor diferencia entre la duración de los ciclos experimentales y calculados.

En la [Figura 9](#) a la derecha se muestran fotogramas obtenidos para medio ciclo, hasta aproximadamente el mayor valor de la cavidad (70 mm aprox.), ya que a partir de este punto la zona ocupada por vapor disminuye. Estos resultados experimentales se obtuvieron a partir del procesado y promediado de imágenes para el hemisiclo de crecimiento/desprendimiento de la cavidad. Puede observarse que siempre queda una cavidad "fija" que crece y decrece (se muestra sólo su crecimiento) y otra parte se desprende y convecta corriente abajo. A la izquierda en la figura, se muestra la misma secuencia de tiempo pero obtenida mediante CFD. Se puede observar que para todos las combinaciones de submodelos utilizados, la predicción del desprendimiento de la cavidad gaseosa no alcanza el comportamiento experimental. se predice una cavidad gaseosa levemente menor a la observada experimentalmente, aunque la comparación es solo cualitativa, ya que la información experimental no indica datos de fracción de vapor y tampoco se observa claramente la zona de desprendimiento que luego se convecta.

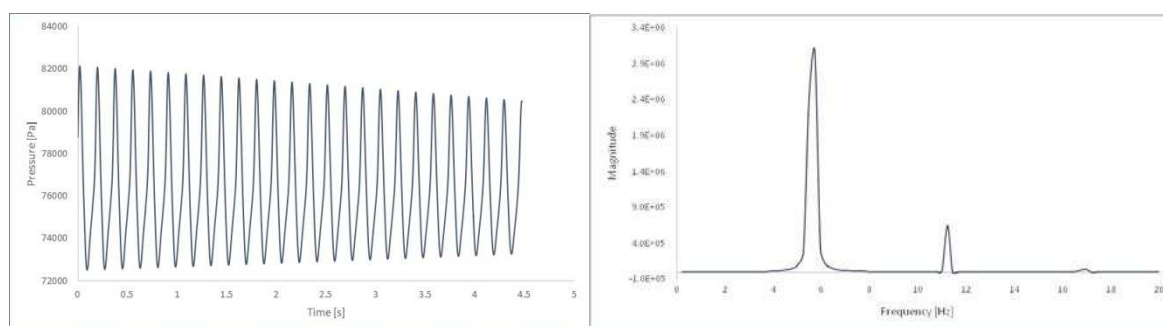


Figura 8: Izquierda, registro de presión en la entrada de la geometría. Derecha, transformada de Fourier

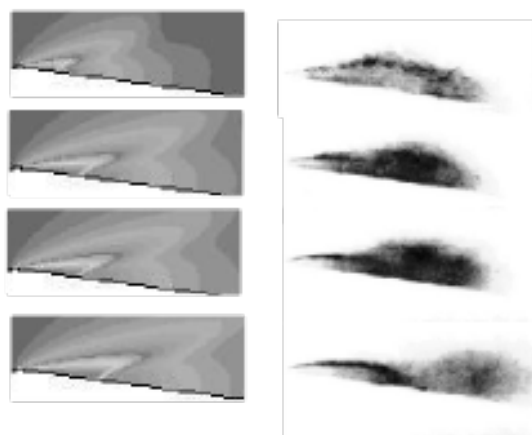


Figura 9: Secuencia de la evolución de la fase Vapor, numérica (izquierda) y experimental (derecha)

Para evaluar el comportamiento de la velocidad del fluido, se representa en la [Figura 10](#) la dirección. Al igual que lo observado en el experimento, numéricamente se produce flujo reverso debido al desprendimiento de la capa límite en la pared inferior. Se deja para un futuro trabajo la evaluación cuantitativa de este comportamiento.



Figura 10: Ángulo de la velocidad. -180° representa una dirección contraria a la velocidad media del fluido

5 CONCLUSIONES

Se han simulado flujos en Venturis con configuración de flujo cavitante con estructura cuasi-estacionaria y no estacionaria probando la sensibilidad de parámetros que controlan el cálculo de la viscosidad turbulenta.

Se trataron de detectar las estructuras no estacionarias y el flujo reverso para el caso de $\beta = 4^\circ$ mediante un modelado no estacionario, ya que resultados previos obtenidos en [Gandolfo et al. \(2013\)](#), no mostraban estos efectos, definiendo tres pasos de tiempo (1×10^{-3} , 1×10^{-4} y 1×10^{-5}). Los resultados obtenidos mostraron ser muy poco sensibles a esta variación obteniéndose perfiles de velocidad y fracciones de vapor iguales para los valores adoptados. Así mismo con ningún paso de tiempo se pudo caracterizar el fenómeno de flujo reverso que presenta el experimento en el final de la cavidad de vapor.

En el caso netamente no estacionario ($\beta = 8^\circ$), se pudo comprobar que una adecuada modificación de los parámetros que controlan el cálculo de la viscosidad turbulenta permiten capturar los efectos de flujo reverso en la zona de la cavidad. Asimismo las frecuencias de fluctuación de la presión en la garganta del Venturi medidas experimentalmente son

reproducidas con cierta aproximación mediante CFD, lo que permite decir que los resultados obtenidos son prometedores. La comparación de perfiles de velocidades y fracciones de vapor en las diferentes estaciones permitirá un análisis más detallado de la capacidad de obtener mediante CFD estructuras del flujo cavitante cuando se esté en condiciones de cavitación del tipo lamina/nube en presencia de efectos de re-entrant jet.

6 AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Tecnológica Nacional por el apoyo económico a través del proyecto 25/j059 y los fondos obtenidos del Ministerio de Ciencia y Tecnología de Argentina, MinCyT (proyecto PRH-PME-38) para el desarrollo del presente trabajo.

REFERENCIAS

- Abuaf N., Wu B., Zimmer G., Saha P., "A study on non equilibrium flashing of water in a converging-diverging nozzle", NUREG/CR1864. Office of Nuclear Regulatory Research, BNL-NUREG-51317-Vol 1 N.Y. (USA)
- Ansys Fluent, user ad theoretical guides, www.fluent.fr, 2010.
- Bardow, A., Bischof, C.H., Bucker, H.M., Sensitivity-based analysis of the k- ϵ model for the turbulent flow between two plates. *Chemical Engineering Science*, 63:4763 – 4775, 2008.
- Barre S. Rolland J., Boitel G., Goncalves E., and Fortes Patella R., "Experiments and modeling of cavitating flows in venture: attached sheet cavitation", *European Journal of Mechanics B/Fluids* 28, pp. 444-464, Elsevier, 2009.
- Brennen C., "Cavitation and Bubble Dynamics", Oxford University Press, 1995.
- Callenaere M., Franc J., Michel J. and Riondet M., "The Cavitation Instability Induced by the Development of a Re-Entrant Jet", *J. Fluid Mech.*, 444, pp 223-256, 2001.
- Coussirat M., "Theoretical/Numerical Study of Flows with Strong Streamlines Curvature", PhD Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, Spain, 2003.
- Coutier - Delgosha O., Fortes Patella R., Reboud J., "Evaluation of the turbulence model influence on the numerical simulation of unsteady cavitation", *Journal of Fluids Engineering*, 42, pp 527-548, 2003.
- Coutier - Delgosha O., Reboud J., Delannoy Y., "Numerical simulation of the unsteady behaviour of cavitating flows", *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, pp 38-45, ASME, 2003.
- Dular M, Bachert R, "The issue of Strouhal number definition in cavitating flow", *Journal of Mechanical Engineering* 55,11, 666:674, 2009.
- P. and Pettersson R., "Statistical theory and modeling for turbulent flows", 1^{era} edición, Wiley 2001.
- Franc J. and Michel J., "Fundamentals of Cavitation", Kluwer academic publishers, 2004.
- Gandolfo E, Cappa F, Moll F, Coussirat M, Fontanals F, Guardo A, "Validacion/calibracion de modelos para flujos cavitantes, aplicación al diseño en ingeniería", ENIEF 2013
- Goncalves E, Fortes Patella R, "Numerical simulations of cavitating flows with homogeneous models", *Computer & Fluids*, pp 1682-1696, Elsevier, 2009.
- Hammit F, "Cavitation and multiphase flow phenomena", McGraw-Hill, 1980.
- Keller P, "Cavitation Inception -new scaling laws, developed by consideration of a parameter of influence generally blurring experimental results", *Imech E* 1992.
- Launder G, Reece J, and Rodi W, "Progress in the Development of a Reynolds-Stress Turbulence Closure", *J. Fluid Mech.*, 68(3):537-566, 1975.
- Le Q, Franc J, and Michel J, "Partial Cavities: Global Behaviour and Mean Pressure Distribution", *J. Fluids Engng*, vol 115, pp 243-248, 1993.
- Moll F, H, Manuele D, Coussirat M, Guardo A, Fontanals A, "Caracterización del tipo de cavitación mediante dinámica computacional de fluidos para posteriores aplicaciones al estudio experimental del daño de cavitación". ENIEF 2011.
- Moll F, Manuele D, Coussirat M, Cappa F, Gandolfo E, Guardo A, Fontanals A, "Optimización de

- un banco de ensayos de cavitación mediante fluidodinámica computacional orientado al estudio experimental del daño por cavitación", MECOM 2012.
- Nurick W, "Orifice Cavitation and its Effect on Spray Mixing", Journal of Fluids Engineering, pp 681-687, 1976.
- Nouri N, Mirsaeeedi S, Moghimi M, "Large eddy simulations of natural cavitating flow in Venturi-type sections", Proc. IMechE 125 Part C, 225:369, 2011
- Reboud J, Coutier-Delgosha O, Pouffary B, Fortes-Patella R, "", Fifth International Symposium on Cavitation, Osaka Japan, November 1-4, 2003.
- Sato K, Hachino K, Saito Y, "Inception and dynamics of traveling bubble type cavitation in a Venturi", 4th ASME JSME Joint Fluids Engineering Conference, Honolulu, Hawaii, USA, 2003.
- Singhal K, "Mathematical Basis and Validation of the Full Cavitation Model", Journal of Fluids Engineering, pp 617-624 Sept. 2002.
- Stutz B, Reboud J, "Two phase flow structure of sheet cavitation", Phys. Fluids 9(12), pp. 3678-3686, American Institute of Physics, 1997.
- Stutz B, Reboud J, "Experiment on unsteady cavitation", Experiments in fluids 22, pp. 191-198, Springer-Verlag, 1997.
- Stutz B, Reboud J, "Measurements within unsteady cavitation", Experiments in fluids 39, pp. 545-552, Springer-Verlag, 2000.
- The OpenFOAM® Foundation, www.openfoam.org
- Vaidyanathan R, Senocak I, Wu J, and Shyy W, "Sensitivity evaluation of a transport-based turbulent cavitation model", Journal of Fluids Engineering, 125, pp 447-458, Mayo 2003
- Versteeg H and Malalasekera W, "An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method", Addison-Wesley, 1996.
- Wilcox D, "Turbulence Modeling for CFD"; La Cañada Inc, 1993, by DCW Industries.
- Zwart P, Gerber A, Thabet B, "A two-phase flow model for predicting cavitation dynamics", International Conference Multiphase Flow (ICMF) Yokohama, 2004.