

Asociación Argentina  
de Mecánica Computacional



Mecánica Computacional Vol XXXV, págs. 1001-1010 (artículo completo)  
Martín I. Idiart, Ana E. Scarabino y Mario A. Storti (Eds.)  
La Plata, 7-10 Noviembre 2017

## ESTUDIO NUMÉRICO DE CAVITACIÓN NO-ESTACIONARIA EN UN PERFIL HIDRODINÁMICO

**Diego Papparazzo, Rodrigo Raggi, Federico Bacchi y Ana Scarabino**

<sup>a</sup>*Grupo Fluidodinámica Computacional - GFC, Universidad Nacional de La Plata, Calle 116 entre 47 y 48, 1900 La Plata, Argentina, [gfc@ing.unlp.edu.ar](mailto:gfc@ing.unlp.edu.ar), <http://www.gfc.ing.unlp.edu.ar>*

**Palabras Clave:** CFD, cavitación, turbulencia, perfiles hidrodinámicos

**Resumen.** Representar numéricamente los cambios de fase implícitos en procesos de cavitación, con las correspondientes transferencias de masa entre fase vapor y fase líquido constituye un desafío importante, que se incrementa cuando el flujo alcanza un régimen turbulento. En este caso el acoplamiento de los modelos de turbulencia y de cavitación, con los utilizados para resolver las ecuaciones de Navier-Stokes, han probado generar dificultades para alcanzar la convergencia de las soluciones, en particular a altos ángulos de ataque. El presente trabajo detalla el estudio realizado mediante simulaciones numéricas bidimensionales sobre un perfil hidrodinámico Clark-Y, mediante el uso del software ANSYS 18.0, reproduciendo ensayos reportados en la bibliografía, con el objetivo de determinar la variación de coeficientes de sustentación y arrastre, y estudiar la evolución e inestabilidad del efecto de cavitación. Tanto los ensayos como las simulaciones numéricas fueron realizados para un nro. de Reynolds constante, de  $8.3e5$ , variando el número de cavitación entre 0.5 y 4, y el ángulo de ataque del perfil entre 2 y 10 grados. Los resultados obtenidos con el modelo de cavitación de Schnerr y Sauer y un modelo de turbulencia *k-epsilon Realizable* muestran una excelente concordancia con los valores experimentales para pequeños ángulos de ataque, reproduciendo correctamente los coeficientes de sustentación y resistencia, así como el número de cavitación en que este efecto comienza a manifestarse. Sin embargo, a ángulos de ataque mayores, junto con la dificultad para lograr la convergencia de la solución, crece el error en la misma. Por ello se está trabajando actualmente en simulaciones con el modelo de turbulencia *k-omega SST*, que, si bien demanda mayores recursos computacionales al no utilizar “funciones de pared” y requerir por lo tanto una discretización fina de la capa límite, suele ser más adecuado para la simulación de flujos desprendidos.

## 1 INTRODUCCIÓN

Los progresos recientes tanto en hardware como en modelos computacionales han permitido la simulación de flujos complejos, incluyendo casos con cavitación, logrando resultados cualitativos y en algunos casos también cuantitativos, para problemas que van desde perfiles hidrodinámicos hasta flujos complejos en bombas y turbinas. Sin embargo, la Mecánica de Fluidos Computacional frecuentemente es incapaz de predecir las características de la cavitación en un flujo básico, como el de un perfil, y las variaciones de fuerzas de sustentación y resistencia como consecuencia de la aparición de cavitación no estacionaria (Kato, 2011).

Para altos números de Reynolds, como los que aparecen en la mayoría de las aplicaciones de perfiles hidrodinámicos (bombas, turbinas, submarinos), la modelación numérica enfrenta la dificultad adicional de acoplar a las ecuaciones que modelan el flujo y la cavitación, aquellas que modelan los efectos de la turbulencia. La dificultad de modelar en forma numérica flujos turbulentos con cavitación ha sido descripta y referenciada con profundidad en Coussirat et al, 2016.

Es sabido que la cavitación en perfiles hidráulicos bidimensionales a alto número de Reynolds depende del ángulo de ataque del perfil y el número de cavitación del flujo. A moderados ángulos de ataque y números de cavitación se vuelve un fenómeno no estacionario, y la burbuja de cavitación que se origina en la cara sometida a succión puede volverse inestable y oscilar, pudiendo en ciertos casos producir desprendimientos de nubes de burbujas. Estas oscilaciones introducen fuerzas periódicas importantes y modifican los coeficientes de sustentación y resistencia de los perfiles (Wade and Acosta, 1996).

El trabajo de investigación experimental de Watanabe et al, 2014, identifica claramente cinco regímenes diferenciados de cavitación sobre perfiles, que van desde el flujo sin cavitación hasta el establecimiento de super cavitación, pasando por distintas etapas de transición estacionarias y no estacionarias.

En este trabajo, y como etapa previa a un estudio numérico de distintos perfiles hidráulicos en condiciones de cavitación, se han reproducido numéricamente con el software Ansys Fluent los experimentos de Watanabe et al, para calibrar y validar el modelo numérico a emplear en trabajos futuros.

## 2 METODOLOGÍA

### 2.1 Descripción del experimento a simular

Los experimentos realizados por S. Watanabe, W. Yamaoka y A. Furukawa (Watanabe et al, 2014), en el Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Kyushu, Japón, consisten en la implementación de un túnel hidrodinámico, con el objetivo de realizar mediciones de coeficientes de sustentación y arrastre sobre un perfil hidrodinámico Clark-Y 11.7%, y registrar la evolución de la cavitación sobre el mismo para diferentes ángulos de ataque y números de cavitación, mediante celdas de carga dispuestas en dos direcciones y cámara de alta velocidad para la documentación de imágenes.

El túnel de agua utilizado para realizar el ensayo posee una sección constante rectangular en el tramo donde fue montado el perfil para la realización del ensayo, con una altura de 200 mm y un ancho de 81.5 mm. Los instrumentos de medición fueron montados de manera

horizontal en el centro de uno de los lados el propio túnel; las paredes tanto superior como inferior y lateral fueron fabricadas en acrílico transparente con el fin de la visualización y grabación del ensayo, con dos cámaras de alta velocidad montadas tanto en la parte superior como lateral del túnel filmando a 8000 cuadros/s.

Con el objetivo de obtener una relación entre las fuerzas de sustentación y arrastre del perfil bajo efectos de cavitación, ambas fuerzas fueron medidas de manera simultánea mediante galgas extensiométricas montadas en una celda de carga.

El perfil hidrodinámico ensayado se corresponde con la denominación Clark-Y 11.7%, con cuerda de 100 mm y una envergadura de 81mm, apenas menor que el ancho del canal, para garantizar un flujo bidimensional sin que la fricción de los extremos altere las mediciones.

Durante el ensayo, la velocidad de la corriente se mantuvo como parámetro invariable, tomando como valor 8.3 m/s, de modo que el número de Reynolds se mantuvo constante en  $8.3 \times 10^5$ , correspondiente a un régimen de capa límite turbulenta.

Debido a la naturaleza del ensayo, el parámetro de control es el número de cavitación, el cual es función de la presión de vapor del fluido en el cual se está llevando a cabo el ensayo,  $P_v$ , su respectiva densidad en fase líquida,  $\rho$ , la cual se asumió como parámetro invariable, la velocidad de la corriente,  $V_\infty$ , y la presión absoluta de la corriente libre a la que se realizaron las mediciones,  $P_\infty$ . Esta última fue el parámetro que se modificó sucesivamente para realizar un barrido sobre los números de cavitación,  $\sigma$ , de interés, de valores entre 0.4 y 4.0.

El número de cavitación en los experimentos fue definido como

$$\sigma = \frac{P_\infty - P_v}{\frac{1}{2} \rho V_\infty^2} \quad (1)$$

Por lo tanto, esa fue la definición que se adoptó para las simulaciones. Además, debido a la configuración del ensayo y por sus ventajas para el cómputo se asumió como hipótesis flujo bidimensional.

La relación entre la altura del túnel (200 mm) y la cuerda del perfil (100 mm) es igual a 2, lo que implica que las paredes superior e inferior del túnel afectarán tanto la distribución del perfil de velocidad como la del campo de presiones sobre el perfil, especialmente a altos ángulos de ataque. Como el objetivo de esta fase del estudio es la validación de los modelos numéricos y no la determinación de las curvas del perfil en flujo libre, en las simulaciones se definió el dominio acotado por las paredes superior e inferior de la sección de prueba del túnel de agua, para reproducir lo más fielmente posible las condiciones experimentales. Durante el ensayo las mediciones fueron realizadas para ángulos de ataque entre  $2^\circ$  y  $10^\circ$  con intervalos de  $2^\circ$ .

## 2.2 Descripción del modelo numérico

Las simulaciones fueron realizadas en el Grupo Fluidodinámica Computacional de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata, con el software *ANSYS 18.0*, mediante el solver *Fluent*, y las herramientas disponibles de modelado de geometría y mallado *Design Modeler* y *Ansys Meshing* respectivamente.

Se llevó a cabo el modelado del respectivo perfil y túnel con distintas mallas, para el estudio y comparación de los modelos matemáticos de turbulencia *k-ε Realizable* y *k-ω SST*, ampliamente utilizados en el modelado de flujos turbulentos sobre perfiles, tuberías y

aplicaciones industriales (Wilcox, 1994).

Inicialmente se realizó un estudio sin tener en cuenta la cavitación, con el objetivo de poner a punto cada malla, seleccionar el modelo de turbulencia y tener resultados comparables con bibliografía sobre perfiles en general.

Los modelos de turbulencia  $k-\varepsilon$  *Realizable* y  $k-\omega$  *SST* poseen características diferentes, no solo desde el punto de vista de los recursos computacionales y tiempo de cálculo requerido, sino que también los procedimientos de cálculo en la zona de la capa límite requieren mallas diferentes: el modelo  $k-\varepsilon$  *Realizable* utiliza “funciones de pared”, por lo que la recomendación usual es definir la altura del primer elemento de la malla de modo que la variable adimensional  $y^+$  del primer nodo esté entre 30 y 300, mientras que el modelo  $k-\omega$  *SST* resuelve las ecuaciones de transporte dentro de las regiones viscosa y “buffer” de la capa límite turbulenta, requiriendo una discretización razonable de ambas regiones, con la recomendación de situar el primer nodo con un  $y^+$  cercano a 1 (Stanford “Simulation of Turbulent Flows”). Por esta razón se procedió a realizar comparaciones de los resultados de ambos modelos en conjunto con los obtenidos de forma experimental, para futuras aplicaciones en flujos bajo los efectos simultáneos de cavitación y turbulencia.

El modelado de la cavitación se llevó a cabo con la opción “*Mixture*”, en el cual la cavitación se calcula bajo el modelo de Schnerr y Sauer (Schnerr y Sauer, 2000).

Las etapas del estudio fueron:

- Modelado de la geometría del perfil y su respectivo dominio en donde se albergará su respectiva malla.
- Modelado de la geometría del túnel de agua, el cual albergará una malla independiente de la del perfil.
- Mallado del dominio perteneciente al perfil en dos dimensiones.
- Mallado del dominio perteneciente al túnel de agua en dos dimensiones.
- Simulación numérica del modelo asumiendo la hipótesis de flujo monofásico.
- Aplicación de correcciones necesarias en el mallado durante simulaciones bajo la hipótesis de flujo monofásico.
- Estudio del modelo multifásico utilizado y realización de simulaciones.
- Aplicación de correcciones necesarias en el mallado durante la etapa de modelado multifásico.
- Comparación de resultados obtenidos durante las simulaciones y el ensayo experimental.

### 2.3 Dominio y mallado

El dominio del túnel de agua actualmente se modela como un rectángulo de 200 mm de altura y 2000 mm de largo, manteniendo una relación de aspecto de 2 y 20 respectivamente con respecto a la cuerda del perfil. Se lo subdivide en 22 regiones para facilitar un mallado óptimo.

El dominio del perfil hidrodinámico es una circunferencia de 68 mm de radio, manteniendo una relación de aspecto con la cuerda del perfil de 1.36, posicionado con su centro a 325mm de la entrada del túnel y a 1675 mm de la salida, de este modo se asegura que el flujo este completamente desarrollado antes de incidir sobre la superficie del perfil, y se dispone de un túnel suficientemente largo para la evaluación del desarrollo del flujo luego de ser perturbado por el mismo. La Figura 1 muestra la estrategia de división del dominio en zonas. La sección circular que contiene al perfil puede rotarse para variar fácilmente el ángulo de ataque sin necesidad de un remallado.

La división en subdominios permitió hacer una malla estructurada en bloques, con un total de aproximadamente 60000 elementos para el modelo  $k-\varepsilon$  *Realizable* y aproximadamente el doble para el  $k-\omega$  *SST*, que requiere una discretización interna de la capa límite. Las Figura 2 y Figura 3 muestran distintos detalles de la malla.

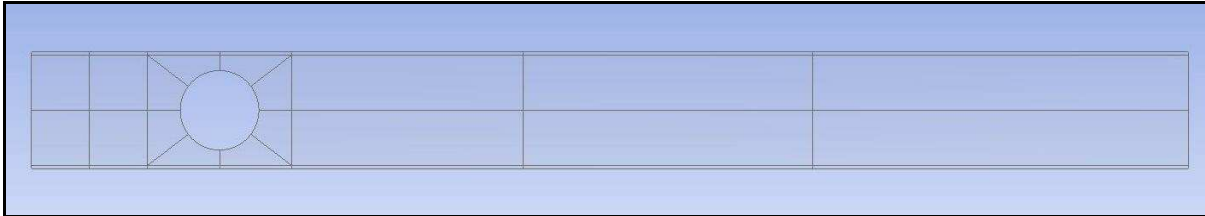


Figura 1: División del dominio de la geometría del túnel en 22 regiones de mallado independiente.

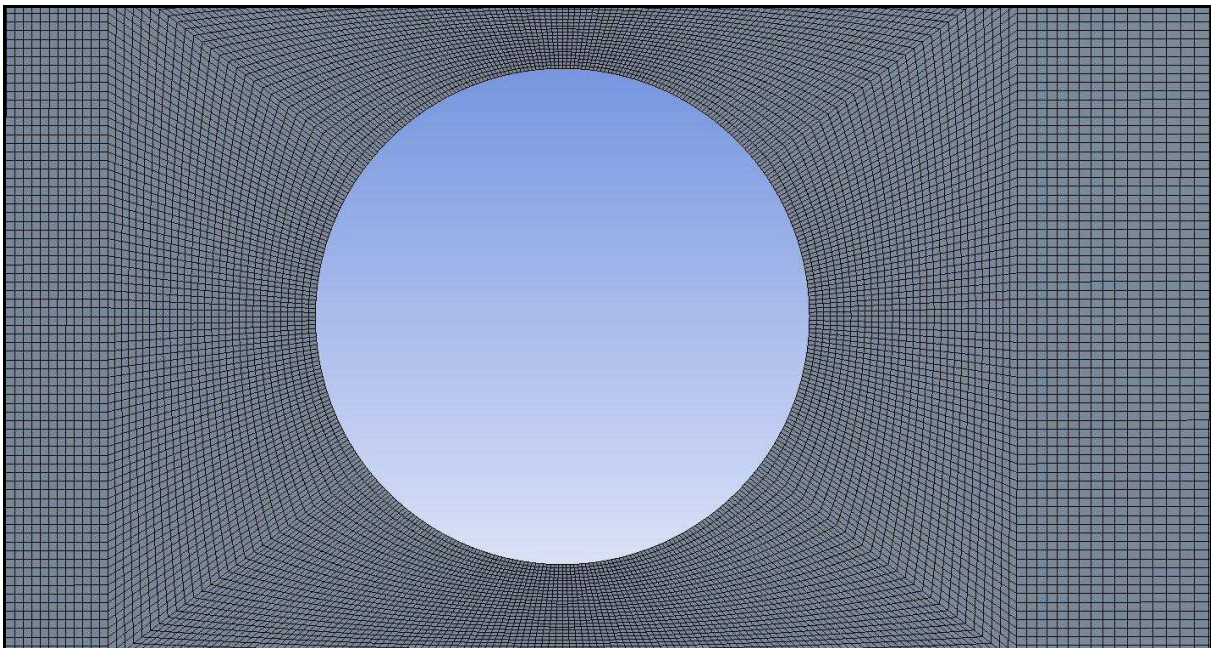


Figura 2: Detalle de la malla correspondiente al túnel de agua

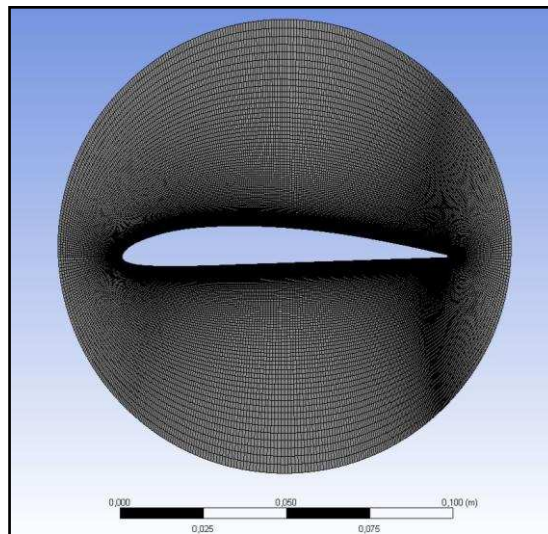


Figura 3: Detalle de la malla en el bloque correspondiente al perfil para el modelo  $k-\omega$  SST

## 2.4 Modelo de cómputo

Las simulaciones fueron llevadas a cabo mediante el solver ANSYS Fluent, en el cual fueron configuradas tanto las condiciones de borde como la interacción en la interfaz de ambas mallas, modelos matemáticos de resolución de ecuaciones, interacciones entre fases, escalas de residuos, y otros parámetros.

Tanto las simulaciones de modelos monofásicos como de modelos multifásicos fueron realizadas con la siguiente configuración básica: se utilizó un modelo bidimensional plano, conformado por dos mallas en la cual se ajusta el ángulo de ataque del perfil rotando la malla circular que lo contiene mediante la creación de una interfaz en sus perímetros.

El sistema de ecuaciones planteado está basado en presiones, y para su resolución se utilizaron los modos estacionario, pseudotransitorio y transitorio como corrida final, para capturar la evolución del flujo a través del tiempo.

Los valores de referencia fueron tomados a la entrada del túnel, definiendo el área y cuerda del respectivo perfil. La presión dinámica a la entrada y salida se mantuvo constante debido a que el ensayo experimental fue realizado a una velocidad invariable de 8.3 m/s, tomando como parámetro variable la presión absoluta a la entrada para así modificar el número de cavitación para caso en particular.

## 3 RESULTADOS

### 3.1 Dificultades encontradas durante la modelización

El procedimiento a seguir debió definirse por prueba y error, luego de realizar una serie de intentos en los cuales la convergencia de las soluciones se veía comprometida para bajos números de cavitación y a grandes ángulos de ataque, donde la evolución de la cavitación se desarrolla de manera abrupta.

Los resultados indicaron que la evolución de la cavitación puede estudiarse de manera detallada mediante simulaciones, obteniéndose de forma relativamente rápida resultados para bajos ángulos de ataque con el modelo de turbulencia  $k-\varepsilon$  *Realizable*, incrementándose el tiempo de cálculo y la dificultad de convergencia a medida que se incrementa el ángulo de ataque.

Para el caso de las simulaciones realizadas mediante el modelo de turbulencia modelo  $k-\omega$  *SST*, se halló una alta dificultad para converger las soluciones a medida que se incrementaban los ángulos de ataque y disminuía el número de cavitación.

Se hizo énfasis en uso de las herramientas disponibles para el control de los residuos, sobre todo para los correspondientes a la fase vapor, lo cual generalmente limita la convergencia de las soluciones, al crecer rápidamente los residuos cuando se varían parámetros como la presión absoluta, la que gobierna el número de cavitación. Esta debía reducirse paulatinamente de a pequeños intervalos para poder obtener soluciones estables.

Tanto para el modelo realizado con  $k-\omega$  *SST* como con  $k-\varepsilon$  *Realizable*, con la finalidad de encontrar las causas de la dificultad de convergencia de los modelos, se realizaron múltiples cambios en las mallas, ajustes de parámetros y cambios en los modelos matemáticos aplicados para hallar el procedimiento de cálculo adecuado. Debido a la inestabilidad del fenómeno, los parámetros definidos no pueden alterarse de manera abrupta, sobre todo la presión absoluta, que debe recorrer un gran espectro de valores de a intervalos muy pequeños. Sin embargo, no fue posible llegar a resultados confiables con el modelo  $k-\omega$  *SST*, por lo que solo se reportan los resultados obtenidos con el modelo de turbulencia  $k-\varepsilon$  *Realizable*.

### 3.2 Resultados experimentales de Watanabe *et al*

En sus experimentos se encontraron cinco regímenes de cavitación diferenciados:

- I – Flujo sin cavitación
- II – Cavitación estable (estacionaria)
- III – Cavitación parcial oscilante (regiones acotadas de cavitación, cuya forma varía periódicamente, sin desprenderse).
- IV – Transición oscilante a súper-cavitación (formación y desprendimientos periódicos de burbujas)
- V – Súper cavitación (grandes regiones de cavitación extendidas más allá del perfil).

Estos regímenes, así como su efecto sobre los coeficientes de sustentación,  $C_L$  y de resistencia,  $C_D$ , del perfil, pueden apreciarse en la Figura 4 y la Figura 5. Puede verse cómo al disminuir el número de cavitación, se produce un incremento de la resistencia al establecerse los regímenes de cavitación II y III, acompañados de un leve incremento en la sustentación. Al ingresar en los regímenes IV o V, la resistencia vuelve a disminuir, pero la sustentación cae drásticamente.

### 3.3 Resultados numéricos con el modelo de turbulencia $k-\varepsilon$ *Realizable*

La Figura 4 y la Figura 5 muestran también los valores de coeficientes de sustentación y resistencia obtenidos con el modelo de turbulencia  $k-\varepsilon$  *Realizable* para ángulos de ataque  $\alpha$  de  $2^\circ$ ,  $6^\circ$  y  $10^\circ$  y números de cavitación  $\sigma$  variables entre 0.8 y 3.14. Los intervalos de número de cavitación cada vez menores al acercarse éste a 1 fueron necesarios para poder obtener soluciones no divergentes, según se explica en el ítem 3.1. Particularmente en el caso de 10

grados la convergencia a bajos números de cavitación resultó dificultosa, debiendo obtenerse soluciones sucesivas reduciendo este parámetro muy lentamente hasta poder alcanzar soluciones que fueran estables y de valores similares a los reportados en el experimento. Puede observarse que las simulaciones reproducen los resultados experimentales, tanto cualitativa como cuantitativamente, de un modo aceptable, aunque con una transición más gradual a los regímenes IV y V.

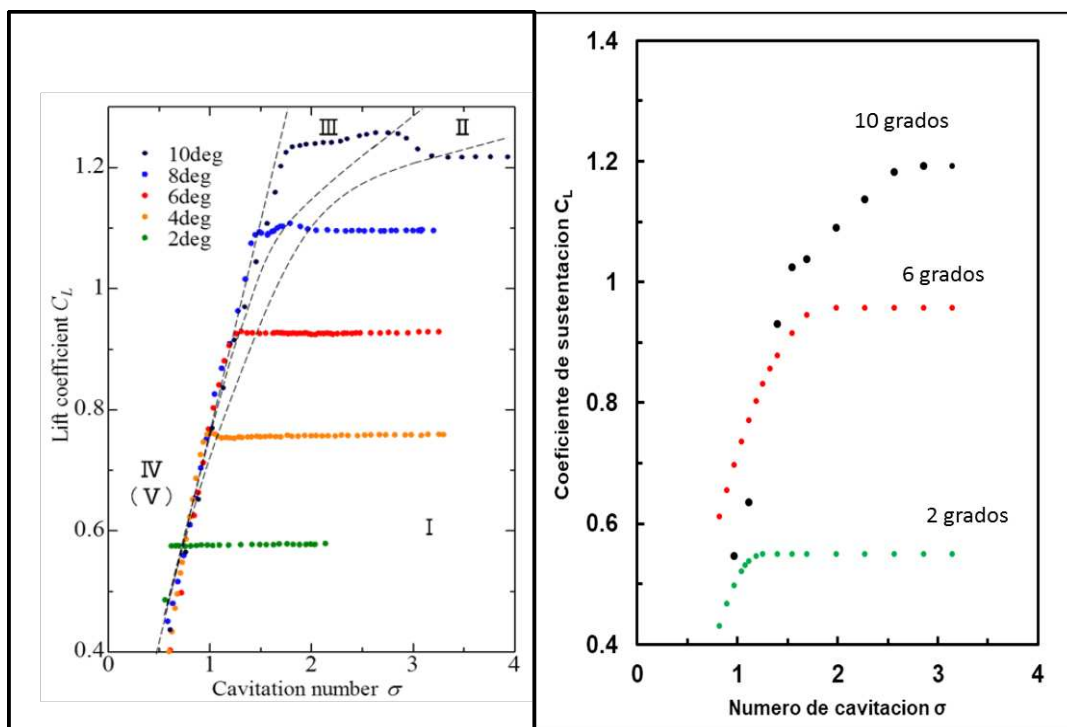


Figura 4: Variación con el ángulo de ataque y el número de cavitación de los coeficientes medios de sustentación de un perfil Clark-Y. Izquierda: determinados experimentalmente (reproducida de [Watanabe et al, 2014](#)). Derecha, obtenidos de forma numérica.

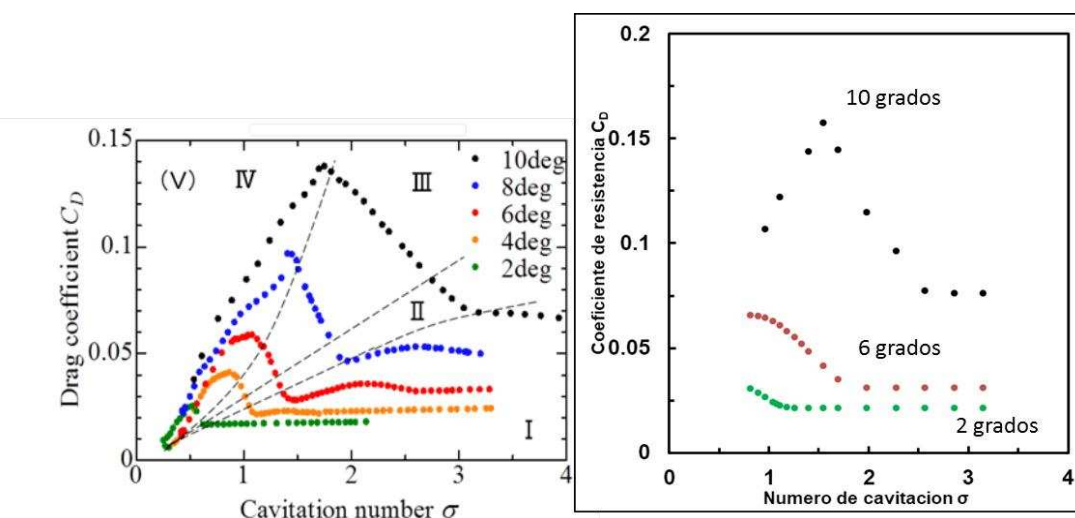


Figura 5: Variación con el ángulo de ataque y el número de cavitación de los coeficientes medios de resistencia de un perfil Clark-Y. Izquierda: determinados experimentalmente (reproducida de [Watanabe et al, 2014](#)). Derecha, obtenidos de forma numérica.



Para ejemplificar la configuración del flujo, se muestran (Figura 6 y Figura 7) secuencias de imágenes de la distribución de la fracción de vapor a 10 grados de incidencia para  $\sigma = 1.68$  y 0.96, mostrando los efectos de cavitación no estacionaria detectados en las simulaciones, los que se corresponden con el régimen III (cavitación parcial oscilante) y IV (cavitación oscilante de transición a súper cavitación) respectivamente, definidos por Watanabe *et al.* Estas oscilaciones y cambios de fase en la capa límite y entorno del perfil hacen que la convergencia de las simulaciones resulte un desafío, requiriéndose distintas aproximaciones desde configuraciones más estables hasta poder alcanzar la configuración final deseada.

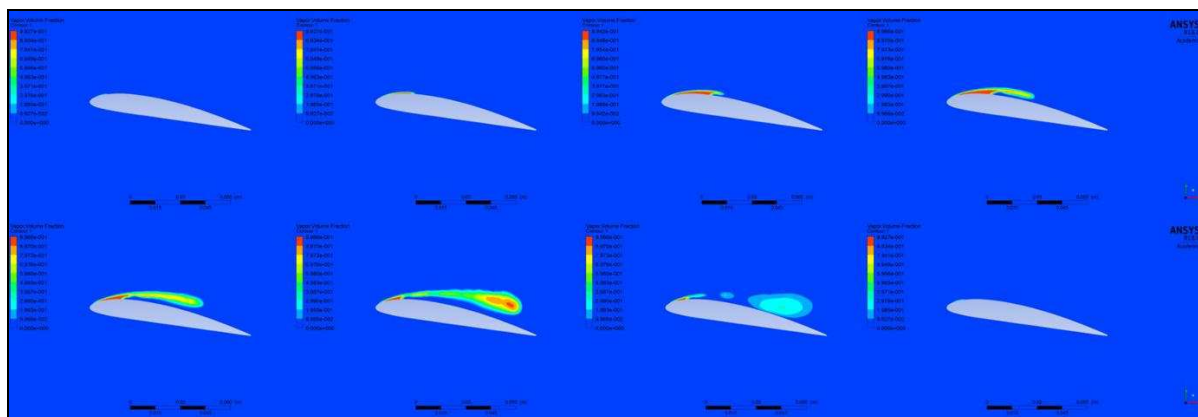


Figura 6: Evolución de la fracción de vapor para 10 grados de incidencia y  $\sigma = 1.68$ . Imágenes cada 0.012 segundos. La escala de colores va desde 0 (azul) hasta 1 (rojo).

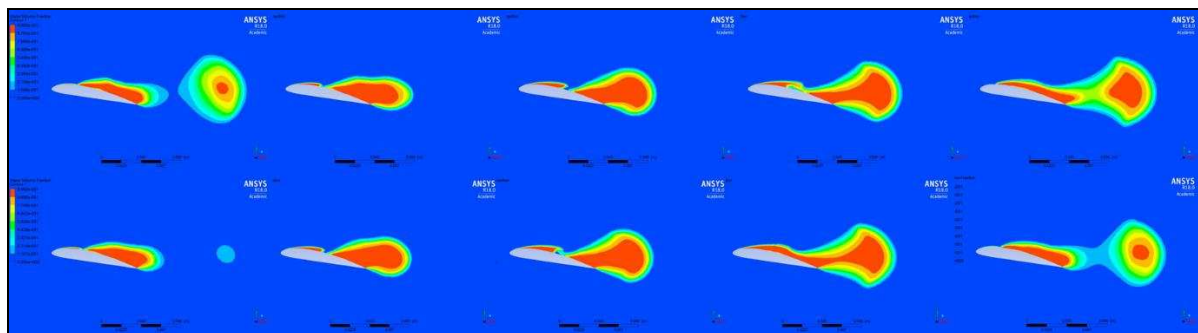


Figura 7: Evolución de la fracción de vapor para 10 grados de incidencia y  $\sigma = 0.96$ . Imágenes cada 0.006 segundos. La escala de colores va desde 0 (azul) hasta 1 (rojo).

#### 4 CONCLUSIONES

Para poner a punto y validar el modelo a emplear, se implementó un modelo numérico 2-D en ANSYS Fluent para estudiar las fuerzas fluidodinámicas resultantes sobre un perfil Clark-Y de espesor 11.7% en una corriente de agua. Se seleccionó este perfil para poder comparar los coeficientes calculados de sustentación y resistencia con los obtenidos experimentalmente y reportados en la bibliografía. También se pudo hacer una comparación del régimen de cavitación hallado en las simulaciones con los reportados en dicho trabajo.

El modelado numérico del flujo a altos ángulos de ataque y bajo número de cavitación

resultó una tarea de dificultad mayor a la esperada, requiriendo numerosas pruebas con distintos tipos de solvers, discretizaciones temporales y aproximaciones a la solución para poder alcanzar la convergencia de la solución a valores confiables. Los resultados obtenidos con el modelo de turbulencia  $k-\varepsilon$  *Realizable* y el modelo de cavitación *Mixture* reprodujeron correctamente las fuerzas y configuraciones, tanto estacionarias como no estacionarias halladas en los experimentos. Consideramos por lo tanto haber logrado la validación del modelo numérico. El modelo  $k-w$  *SST* presentó muchas dificultades para la convergencia en los casos de cavitación no estacionaria, por lo que se optó por continuar el estudio con el  $k-\varepsilon$  *Realizable*.

Como trabajo futuro, se continuará intentando estabilizar el modelo numérico con el modelo de turbulencia  $k-w$  *SST* y aplicará el know-how adquirido para la caracterización numérica de distintos perfiles hidráulicos en condiciones de número de cavitación variable, tanto por el valor intrínseco de la información obtenida, como también para su utilización en sistemas de generación de energía hidráulica a través de turbinas hidrocinéticas.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue llevado a cabo en el marco de un Convenio de Cooperación entre el Grupo Fluidodinámica Computacional – GFC de la Facultad de Ingeniería de la UNLP y el Instituto de Energía de la Universidad Nacional de Cuyo, para el Programa de Investigación sobre Minigeneración Hidroeléctrica en Canales de Riego.

## REFERENCIAS

- Coussirat, M. G., Moll F.H. and Fontanals A., Capability of the present cavitating and turbulence models for confined flow simulations, *Mecánica Computacional* Vol XXXIV: 1989-2007, 2016.
- Kato, C. 2011, Industry-University collaborative project on numerical predictions of cavitating flows in hydraulic machinery – Part I: Benchmark test on cavitating hydrofoils - *Proc. ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference 2011*, AJK 2011-06084.
- Sauer J., Schnerr, G.H., Unsteady Cavitating Flow -A New Cavitation Model Based on a Modified Front Capturing Method and Bubble Dynamics, *Proceedings of FEDSM' 2000 ASME Fluids Engineering Summer Conference*, June 11-15, 2000, Boston, Massachusetts, USAFEDSM2000-11095.
- Stanford University: “Simulation of Turbulent Flows”.  
<https://web.stanford.edu/class/me469b/handouts/turbulence.pdf>
- Wade, R. B. and Acosta, A. J., Experimental observations on the flow past a plano-convex hydrofoil. *ASME J. Basic Eng.*, 88: 273-283, 1996.
- Watanabe, S., Yamaoka, W. and Furukawa, A.: “Unsteady Lift and Drag Characteristics of Cavitating Clark Y-11.7% Hydrofoil”, 27th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems (IAHR 2014), *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 22 052009, 2014.
- Wilcox D., *Turbulence Modeling for CFD*. La Cañada Inc, DCW Industries, 1994.