

CARACTERIZACIÓN NUMÉRICO-EXPERIMENTAL DEL FLUJO BIDIMENSIONAL ALREDEDOR DE PLANOS DE FLOTACIÓN DE UN BUQUE SARDINERO

Douglas Ulises Güingla Villón

RESUMEN

En la presente tesis se ha desarrollado el análisis del flujo bidimensional alrededor de tres Planos de Flotación de un buque sardinero con dos chinás, sin considerar el efecto de superficie libre. Basándose en la revisión bibliográfica, se describe el fenómeno de generación de vórtices alrededor de superficies sólidas bidimensionales, para comprender dicho fenómeno.

Se determinaron los flujos mencionados, primero experimentalmente con la técnica LDA, registrando las dos componentes de la velocidad, en el canal de circulación de la FIMCM; el rango de velocidad analizada fue 0.04-0.6 m/seg y los tres modelos empleados, de pared vertical, se construyeron de 40 cm de longitud, aproximadamente. Luego con el programa de simulación numérica COMSOL, que discretiza espacialmente el dominio con el método de Elementos Finitos, se resolvieron las ecuaciones de Navier-Stokes.

Para el análisis de resultados se graficaron las distribuciones de velocidad en cortes verticales, en la entrada al dominio, en Sección Media, y, en la zona de Popa a $x=5\%L$ y otro a 60 mm hacia atrás del anterior. En la zona de Popa se nota la formación de la estela, que se manifiesta con una reducción en velocidad, que llega en ciertos casos al cambio en dirección, denominada de Contraflujo. Los resultados Experimentales y Numéricos mostraron tanto tendencia como amplitudes muy parecidas, que se acercan conforme se incrementa la velocidad de entrada. De manera que se ha comprobado la eficacia del método numérico empleado en este caso.

Finamente se integraron las presiones numéricas sobre las superficies de los modelos, y se sumaron las componentes horizontales, lo que corresponde a la Resistencia Residual al avance. Se encontró mucha similitud en la tendencia de esta Fuerza, en los planos de flotación que incluyen las chinás.

Palabra clave: Flujo Viscoso Bidimensional.

SUMMARY

In this thesis has developed two-dimensional flow analysis around three plans flotation of a vessel with two Chinese sardine, without considering the effect of free surface. Based on the literature review, described the phenomenon of generation of vortices around two-dimensional solid surfaces, to understand this phenomenon.

Mentioned flows were determined, first experiment with the LDA technique, recording the two components of velocity in the channel flow of FIMCM, the speed range tested was 0.04-0.6 m / sec and the three models used, wall vertical, were constructed of 40 cm in length, approximately. Then the numerical simulation program COMSOL, which spatially discretized the domain with the Finite Element method, was resolved Navier-Stokes equations.

For the analysis of results were plotted velocity distributions in vertical cuts at the entrance to the domain, Media Section, and in the stern section $x = 5\% L$ and another at 60 mm rearward of the former. In the stern section one notes the formation of the wake, as evidenced by a reduction in speed, which in some cases the change in direction, called the Counterflow. Experimental and Numerical Results showed both trend and very similar amplitudes, approaching with increasing velocity. So it has proved effective numerical method used in this case.

Finely pressures were integrated onto the surfaces of numerical models, and added the horizontal components, which corresponds to the residual strength to progress. There was much similarity in the trend of this force, at the waterline, including the Chinese.

Keyword: Two-dimensional Viscous Flow.

1.- INTRODUCCIÓN.

1.1 Descripción de flujos laminares y turbulentos alrededor de cuerpos.

Las investigaciones elaboradas por Osborne Reynolds utilizando la visualización de flujos en conductos, establecieron la presencia de varios regímenes como características particular, [1].

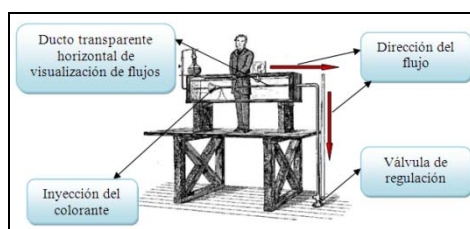


Figura 1. Esquema del tanque de Ensayos de Reynolds, [1].

Como se puede observar en la figura 1, para poder visualizar las características de los flujos, Reynolds empleó un método que inyecta colorante en una corriente de agua en el interior del tanque, a través de un conducto transparente horizontal el cual está unido a una tubería de desagüe. La circulación del agua en los ductos se debe a la diferencia entre la superficie libre del tanque y el desagüe; el ducto de desagüe al nivel del piso contiene una válvula para regular el caudal del agua desalojada, es decir la velocidad de la corriente.

1.2 Descripción del fenómeno la Separación de la Capa Límite.

Un aspecto importante cuando ocurre la separación de la capa límite, es la presencia de un gradiente adverso de presión en la parte posterior del cuerpo sólido, esto es $dp/dx > 0$. En el caso en que la presión decrece, se tienen un gradiente favorable de presión, esto es $dp/dx < 0$, en este caso no se

presentaría ninguna separación. En la figura 2 se describe el efecto del gradiente de presión en la dirección el flujo en los perfiles de velocidad de una capa límite alrededor de la superficie de un cuerpo sólido, [6].

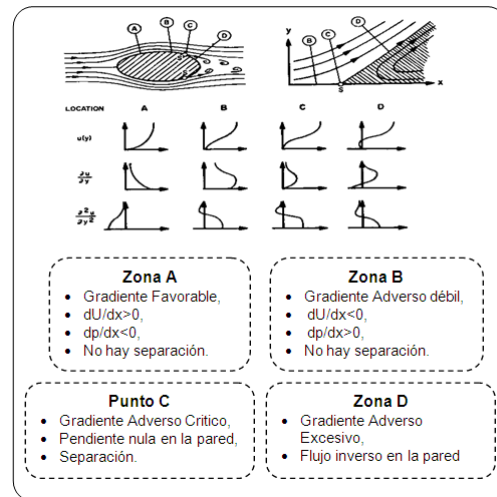


Figura 2. Perfiles de Velocidad y separación de la Capa Límite a lo largo de un cuerpo bidimensional, [6].

En el punto C se observa el punto crítico en el cual ocurre la separación de la capa límite. En este punto un gradiente puede ocasionar corriente inversa en la pared de cualquier superficie; a partir de este punto el espesor de la capa límite crece considerablemente y la corriente principal se desprende de la pared, [5].

En la zona posterior del cuerpo sólido, la capa límite generadas comienzan a separarse de la superficie del cuerpo, debido a que la parte en contacto con la superficie sólida se mueve más lentamente que la parte que está en contacto con el flujo libre. La capa límite separada se enrolla, generando una serie de vórtices discretos, [7]. Los vórtices generados en las paredes son arrastrados corriente abajo dentro de la estela generada por el paso del

cuerpo en el fluido. Este fenómeno se puede observar en la figura 3.

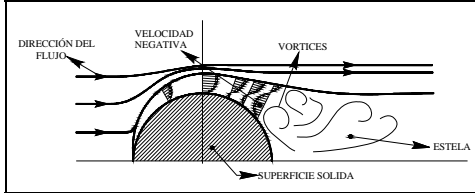


Figura 3, Fenómeno de la generación y movimiento de los Vórtices.

1.3 Descripción de la Ecuación de la Conservación de Momentum.

Las ecuaciones que representan las leyes de la Conservación son conocidas como ecuaciones de gobierno de la Dinámica de Fluidos, y describen el movimiento del fluido bajo la acción de las tensiones a las que son sometidos. Estas ecuaciones se derivan de la aplicación de la ley de la conservación de Momento Cinético a un elemento infinitesimal del fluido, estas últimas ecuaciones se originan al aplicar la segunda ley de Newton (Fuerza = masa x aceleración). Esta es una forma de expresar la segunda ley de Newton. Por conveniencia se analizarán las fuerzas actuantes sobre un elemento infinitesimal del fluido en movimiento, la distribución de fuerzas se puede observar en la figura 4.

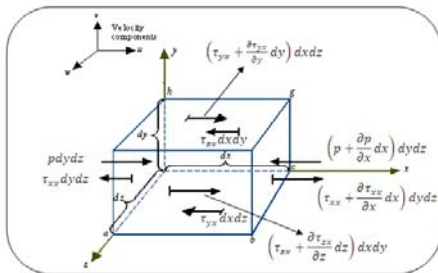


Figura 4, Fuerzas de superficie en dirección del eje coordenado “x”, [9]

Las ecuaciones de Navier-Stokes pueden ser expresadas en su forma Conservativa, reemplazando la parte izquierda de las

ecuaciones por la definición de la derivada sustancial como se expresa a continuación.

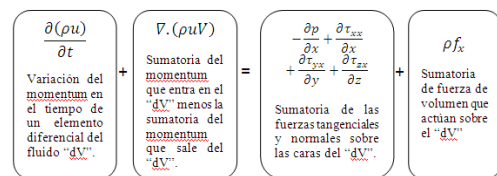
$$\rho \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = \frac{\partial(\rho\mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\mathbf{u}\mathbf{V}) \tag{9}$$

El desarrollo de esta expresión se puede observar en la referencia [9]. Sustituyendo la ecuación (9) en las ecuaciones (6) a (8) se tiene las ecuaciones de Navier-Stokes en su forma Conservativa.

Componente “x” de la ecuación Navier-Stokes en su forma conservativa:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \mathbf{V}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x \tag{10}$$

A continuación se muestra las características de cada término de las ecuaciones de Navier-Stokes:



Las ecuaciones de Navier-Stokes, “están representadas por un sistema de 3 ecuaciones diferenciales en derivadas parciales no lineales de segundo orden con 4 incógnitas. Añadiendo la ecuación de continuidad (que se deriva de la aplicación de la ley de Conservación de Masa a un elemento infinitesimal de fluido), se obtiene la ecuación que falta para completar el sistema de ecuaciones anterior”, [10]. Estas ecuaciones representan a un flujo Newtoniano e incompresible, considerando la viscosidad constante.

2.- DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DEL CAMPO DE VELOCIDADES ALREDEDOR DE PLANOS DE FLOTACIÓN.

2.1 Geometría y Construcción de los modelos.

El análisis del flujo del agua alrededor de buques es difícil de desarrollar y una forma de iniciarse en estos estudios es mediante el análisis bidimensional de los flujos alrededor de planos de flotación del buque Sardinero "Cavinko I" como se muestra en la figura 5.



Figura 5. Carenamiento del Buque Sardinero Cavinko I, año 2007.

Con las dimensiones obtenidas del plano de Líneas de formas se procedió a elaborar una maqueta electrónica del buque, con el fin de seleccionar y visualizar los planos de flotación a analizarse. En la figura 6, se presentan dos diagramas mostrando al buque en 3D y las flotaciones seleccionadas para el análisis experimental del flujo bidimensional.

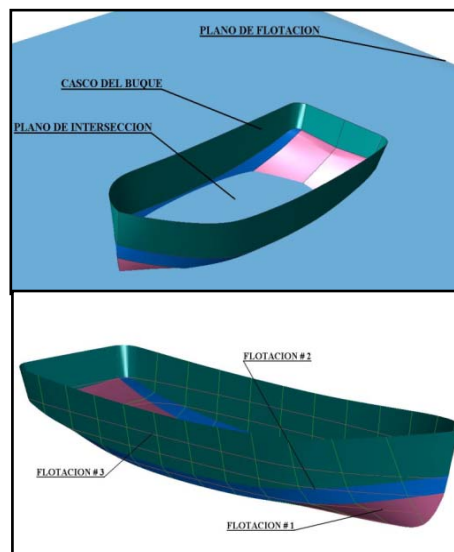


Figura 6. Diagrama Tridimensional del Buque Sardinero Cavinko I.

Como se muestra en la figura 9, se escogieron tres planos de flotación, definidos como **WP3** al de mayor longitud, el intermedio como **WP2** y finalmente al plano más bajo en el casco como **WP1**. Por restricción geométrica del canal de circulación donde se realizaron las pruebas se procedió a aplicar un factor de escala a las dimensiones del buque real, con el fin de ajustar al plano de flotación de mayor eslora a 40 cm de longitud.

Los modelos físicos fueron elaborados con paredes verticales, con una altura de 18 cm cada uno. El interior es hueco con el propósito de poder poner pesos dentro de cada uno de ellos, debido a que el material del que están contruidos es muy ligero. Sin los pesos los modelos serían arrastrados fácilmente por la corriente del agua en el canal de experimentación. A continuación en la figura 7 se muestran los modelos terminados.



Figura 7. Modelos terminados.

2.2 Proceso Experimental para la obtención de los campos de velocidades.

Para el análisis experimental del campo de velocidades alrededor de los planos de flotación especificados anteriormente, se utilizó la técnica LDA “Laser Doppler Anemometry”. Esta técnica mejora la precisión de los resultados obtenidos debido a que es un sistema no intrusivo, es decir no existe algún elemento físico que se deba introducir en el flujo para medir la velocidad en cada punto específico. Los modelos se colocaron en un canal de circulación de 60 cm de ancho como se muestra en la figura 8 y que es parte del laboratorio de Ing. Naval de la FIMCM.



Figura 8. Sistema LDA acoplado al canal de experimentación.

El primer paso para el análisis experimental es la selección de las posiciones de medición alrededor de los planos seleccionados donde se realizarán las mediciones. Por esto se elabora una malla en donde las coordenadas de cada punto de intersección son almacenadas en una tabla de puntos en un archivo con extensión Txt, como se muestra en la figura 9.

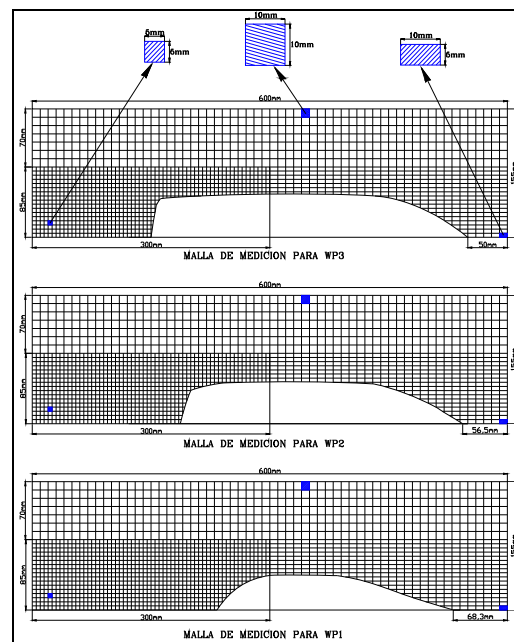


Figura 9. Malla y Tamaño de cuadrícula para cada Planos de Flotación.

El software BSA Flow en su versión 4.10 [11], permite la automatización del robot y el procesamiento de los datos tomados en cada punto de la malla, permitiendo la observación de los vectores de velocidad del flujo alrededor de cuerpos sólidos. Este software es parte del paquete de instrumentación experimental que utiliza la técnica LDA elaborado por la compañía Dantec Dynamics.

Con los pasos descritos anteriormente se procede a la obtención de los resultados

experimentales. En este caso durante las pruebas se obtuvieron algunos parámetros de importancia para cada modelo, como se puede apreciar en las tablas II a V.

Tabla III. Parámetros Experimentales para WP3.

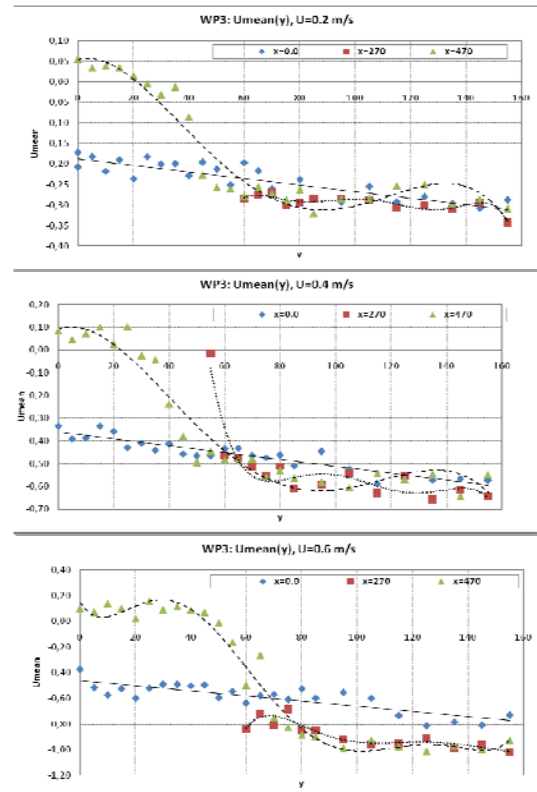
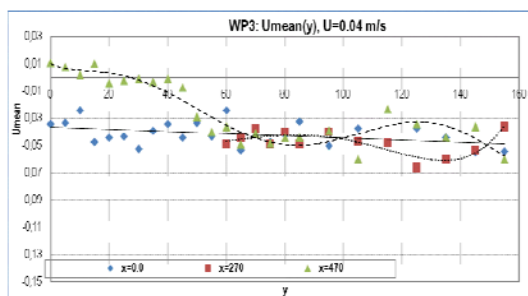
Tabla IV. Parámetros Experimentales para WP2.

Tabla V. Parámetros Experimentales para WP1.

2.3 Análisis del campo de velocidad de cada plano de flotación.

Para analizar la influencia de cada modelo en los campos de velocidad, se resumieron los valores en dirección “x” medidos en diferentes posiciones longitudinales. En la figura 18 se muestran los cortes realizados al inicio ($x=0.0$), en la zona central, y, a 5%L a Popa del “espejo” para el plano de flotación 3. En la figuras 10 se muestran los valores medios de la componente x de la velocidad, en los cortes anteriormente mencionados.

Figura 10. Velocidades medias x en tres cortes para el Plano de Flotación 3



3.- DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DEL CAMPO DE VELOCIDADES ALREDEDOR DE PLANOS DE FLOTACIÓN.

3.1 Partición del Dominio para la Modelización Numérica.

Para comenzar con la solución numérica se debe seleccionar el tipo de modelo numérico a emplearse dentro del programa, y la generación de las geometrías de los planos de flotación y sus entornos, y, luego se describe la partición del dominio en general.

Selección del Modelo Numérico:

A continuación se presenta en la Tabla VII las características del modelo a emplearse para el presente análisis.

CARACTERÍSTICA DEL MODELO	DIMENSIÓN DEL MODELO	(2D)
	FENÓMENO FÍSICO	FLUID DYNAMICS
	ECUACIONES DE GOBIERNO	IMCOMPRESIBLE NAVIER-STOKES
	TIPO DE ANÁLISIS	TRANSIENT ANALYSIS

Tabla VII. Características del modelo para la simulación numérica [12].

Definición de la geometría:

Para este análisis las dimensiones escogidas para el proceso de la simulación numérica para cada plano de flotación son las mismas que en el capítulo anterior, con el objetivo de poder comparar los resultados Numéricos-Experimentales de las mismas geometrías.

La técnica de particionar el dominio o dividir el espacio se lo conoce como el mallado del sistema (“meshing”). En la figura 11 se puede apreciar el mallado resultante para cada plano de flotación a simular.

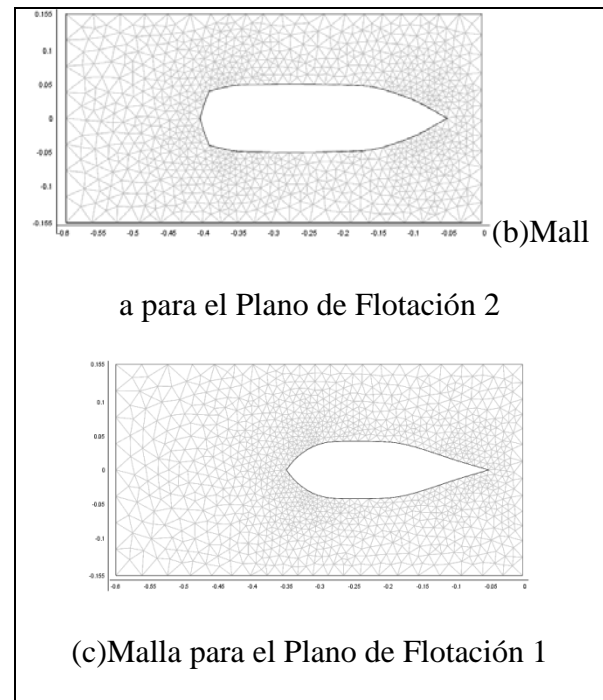
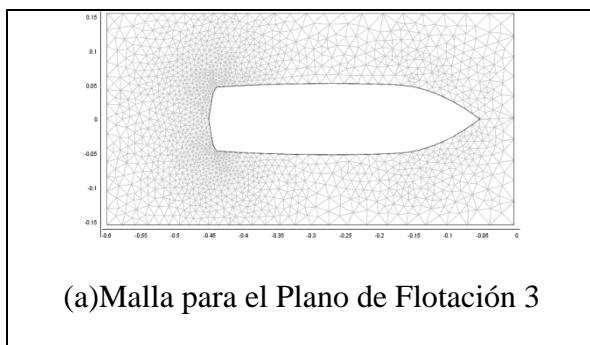


Figura 11. Malla de los Plano de Flotación para la Simulación Numérica.

3.2 Detalles del proceso de Modelización Numérica.

En general la simulación de un proceso de flujo viscoso consta de etapas a seguir, como se muestra a continuación:

- Definición de condiciones iniciales y de contorno,
- Simulación del sistema, y,
- Visualización de los resultados obtenidos mediante la simulación numérica.

Definición de condiciones Iniciales y de contorno:

Este es uno de los pasos más importantes en la simulación numérica, debido que aseguran la Unicidad y Existencia de la solución del problema con valores en la frontera, y en los procesos numéricos aseguran la convergencia de la solución. En la figura 12 se puede observar las condiciones de contorno a emplearse en los límites de los planos de flotación y de las

fronteras que limitan el dominio del sistema.

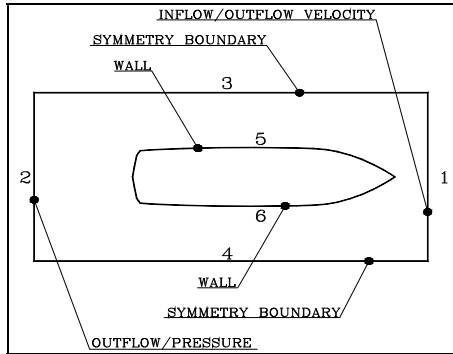
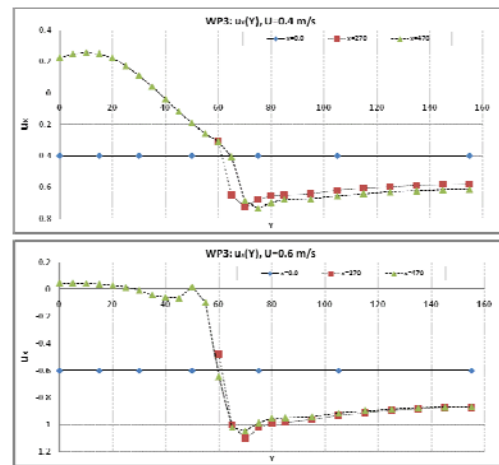
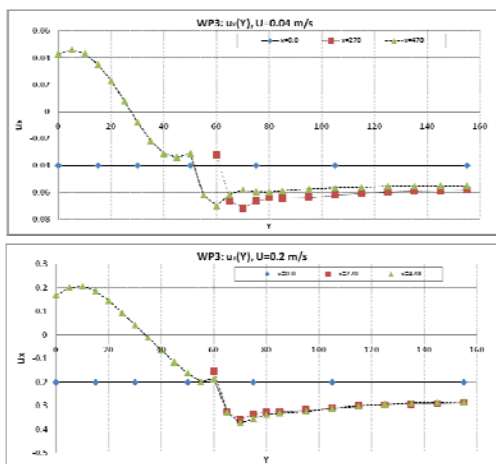


Figura 12. Esquema de las condiciones de contorno para la Simulación Numérica.

3.3 Campos de velocidad obtenidos para cada plano de flotación.

Una vez culminada la ejecución de la simulación numérica para cada plano de flotación, se prepararon cuatro gráficas para cada modelo, mostrando las velocidades en diferentes cortes a lo largo de los dominios. A continuación en las figuras 13 se muestran los cortes realizados a 5%L a Popa de cada modelo, similares a los que se realizaron para analizar los resultados experimentales.

Figura 13. Solución numérica de las velocidades x en tres cortes para el Plano de Flotación 3.



4.-COMPARACIÓN DE LOS ANÁLISIS EXPERIMENTALES Y NUMÉRICOS.

4.1.- Comparación de resultados Numéricos y Experimentales.

En este apartado se procederá a la comparación de los resultados numérico-experimental. En la figura 14 se puede apreciar la ubicación de los cortes realizados a cada plano de flotación para los análisis respectivos.

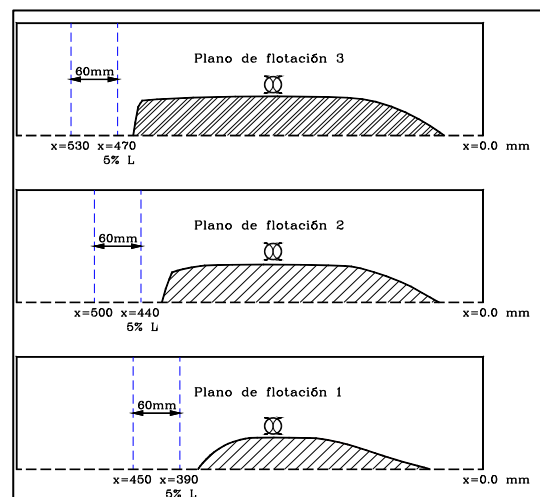


Figura 14. Cortes "x" en el campo de velocidades del flujo para la comparación Numérico-Experimental.

En las gráficas de las figuras 15, y 16, se pueden observar la tendencia de las velocidades Numérico-Experimental en los cortes mencionados. Para cada plano de flotación se mostrarán los resultados con velocidades de flujo libre de 0.04 y 0.6 m/seg, que representan las velocidades extremas tratadas.

Figura 15. Comparación de los Resultados Numéricos-Experimentales en corte a $x = 470$ mm para el Plano de Flotación 3, a $U=0.6$ m/seg.

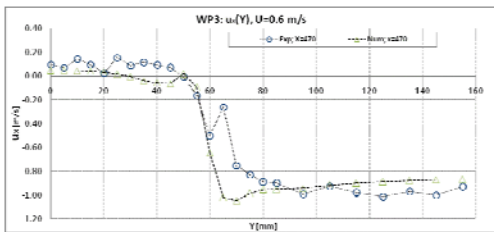
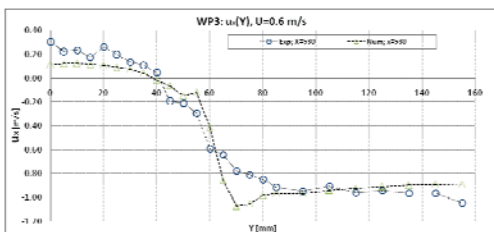


Figura 16. Comparación de los Resultados Numéricos-Experimentales en corte a $x = 530$ mm para el Plano de Flotación 3, a $U=0.6$ m/seg.



4.2.- Comparación entre Planos de Flotación.

Entre los resultados del proceso de simulación numérica, se obtiene la distribución de presiones en el dominio analizado, y a continuación se analizará su distribución sobre el cuerpo. Es decir, se graficaron los valores de la presión en los nodos que están sobre la superficie del cuerpo como se observa en la figura 17.

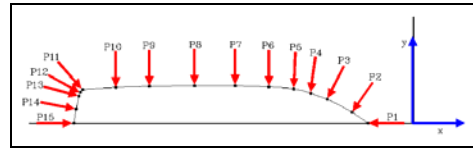


Figura 17. Esquemático de la distribución de presiones sobre la superficie de un plano de flotación.

Con los resultados de las presiones alrededor de los planos de flotación se procedió a integrarlas sobre la superficie y tomar la componente de la fuerza en dirección x, del flujo. Para esto, entre cada par de nodos consecutivos se promedió la presión, se estimó la longitud de aplicación de dicha presión, y se calculó la dirección de la normal al cuerpo. Esto para poder determinar la Resistencia Residual por unidad de longitud, para luego comparar los resultados entre los planos, como se muestra en la figura 46.

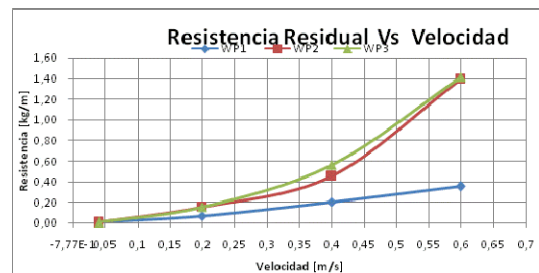


Figura 46. Comparación de la Resistencia Residual entre Planos de Flotación.

CONCLUSIONES

Luego de medir los campos de flujo bidimensionales alrededor de los planos de flotación de un buque pesquero, empleando la técnica de Anemometría Laser Doppler, y, de calcular dichos campos en forma numérica utilizando un programa de simulación que emplea el método de Elementos Finitos para la discretización espacial, se puede concluir:

1. De la revisión Bibliográfica, se deriva que cuando un fluido viscoso circula alrededor de superficies sólidas, se forman vórtices cercanos a la superficie del cuerpo debido a la separación de la capa límite. Las capas de fluido cercanas al cuerpo se enrollan hasta generar los vórtices, que luego son arrastrados por el propio flujo corriente abajo. La separación de la capa límite se la puede determinar por medio de la configuración del perfil de velocidad y la razón de incremento del espesor, los que a su vez dependen del gradiente de presión en dirección longitudinal. Cuando se incrementa la presión en la dirección del flujo, la presión detrás de cada partícula fluida (ayuda al movimiento), es menor a la presión en la parte frontal de ésta (se opone al movimiento), lográndose obtener un gradiente de presión adverso que incide en la separación de la capa límite. Finalmente si se tiene un gradiente de presión adverso elevado, este provoca que el flujo se invierta alterando la configuración del perfil de velocidad.
2. Para caracterizar los flujos alrededor de cuerpos bidimensionales con formas de Planos de flotación de un buque, se construyeron tres modelos, y mediante la técnica de Anemometría LDA se midieron las distribuciones de velocidad. Por limitaciones del equipo de bombeo, se trabajaron con velocidades de 0.04, 0.2, 0.4, y 0.6 m/seg para cada modelo. Se determinaron los campos de velocidades, aunque no fue posible obtener un flujo uniforme en la entrada a la zona de mediciones, pudiéndose observar en todas las mediciones una variación lineal hacia un costado. Para facilitar los análisis, se graficaron las distribuciones de velocidad en secciones a lo largo de los modelos y se determinó que en el corte realizado en Sección Media de estos, no se notó presencia de flujo invertido (Contraflujo); esto indica que hasta esta posición no hay presencia de gradiente de presión adverso que ocasione que el flujo se invierta y la capa límite se separe de la superficie de los modelos.
3. En las distribuciones de velocidad del último corte, realizado a 5%L hacia Popa de todos los modelos, se evidenció la presencia de contra Flujo, resultado que se esperaba por estar en la estela de los modelos. Finalmente se encontró que con el incremento de velocidad a partir de 0.2 hasta 0.6 m/seg la inversión del flujo también se incrementa, notándose máximos de velocidades de contraflujo de 0.241, 0.234, 0.155 m/seg, que representan el 40, 39, 26% de la velocidad del flujo libre (0.6 m/seg), para los Planos de Flotación 1, 2, 3, respectivamente.
4. Se pudo calcular el campo bidimensional de velocidad del flujo de forma numérica, para cada plano de flotación seleccionado, utilizando el programa de simulación numérica COMSOL MULTIPHYSICS 3.4 que emplea el método Elementos Finitos, para la discretización espacial. Se seleccionó como tipo de análisis el Transiente (TRANSIENT ANALYSIS), en un intervalo de tiempo de 0 hasta 5 segundos, con incrementos de 0.2 segundos para

todos los casos. A pesar de que se trataba de un análisis estable, únicamente de esta forma fue posible alcanzar Convergencia en los procesos numéricos. En los cálculos se impuso como condiciones de frontera a la entrada, flujo libre, como velocidad constante, para el casco como paredes sin deslizamiento relativo, para las fronteras superior e inferior como condiciones de simetría, y, finalmente en la salida del flujo, se impuso una presión uniforme igual a cero. De los resultados obtenidos de la distribución de velocidad en el corte a Sección Media del Plano de Flotación 1, se obtuvieron valores de máxima velocidad en la zona de contraflujo a 2 mm cerca de la superficie; representando el 10% de la velocidad del flujo libre, con lo que se concluye que para el plano mencionado la separación de la Capa Límite se presenta antes de la Sección Media en un punto a proa del plano de flotación. En cambio para los planos de flotación 2 y 3, se determinó que no existe presencia de Contraflujo, lo cual indica que la separación de la capa límite ocurre después de la Sección Media. Finalmente en el corte a Popa de los modelos, los resultados obtenidos demostraron que a las velocidades de flujo libre aplicadas a cada plano de flotación se nota la presencia de contraflujo, debido a la separación de la capa límite, resultados que se esperaban por estar este corte en la estela de los modelos.

5. Para la comparación de los resultados experimentales con los numéricos, se procedió a analizar el perfil de velocidad en el corte a $x=5\%L$ y

además en una nueva posición a 60 mm hacia popa de dicho corte. Se determinó que para bajas velocidades, la comparación de los perfiles de velocidad demostraron tener la misma tendencia, aunque es notorio que los valores de las velocidades obtenidas experimentalmente muestran la influencia de múltiples factores aleatorios, que hacen que varíen ostensiblemente de posición a posición; este comportamiento es muy diferente a los resultados obtenidos de forma numérica. Además se pudo determinar que a la velocidad más alta analizada, 0.6 m/seg, se tiene buena caracterización entre los resultados numéricos y experimentales.

6. Como parte de los resultados numéricos se obtuvo la distribución de presiones sobre la superficie de cada Plano de Flotación. Luego se integró dicha presión y se tomó la componente longitudinal de la fuerza que corresponde a la resistencia residual. La gráfica de esta componente de la resistencia versus la velocidad del flujo libre, muestra una pendiente notoria en los planos 2, y 3, debido a la presencia de chinas. A diferencia de ellas, el plano de flotación 1 no muestra grandes aumentos de resistencia con el incremento de la velocidad, debido este no incluye china alguna. Esto confirma el concepto de que al diseñar una embarcación de Desplazamiento, se debe evitar que el espejo esté muy sumergido, porque de otra forma, la reducción de presiones en esta zona “succiona” al buque; esto es, incrementa la resistencia a la avance.

RECOMENDACIONES

1. De los resultados obtenidos experimentalmente con los modelos representativos de los planos de flotación seleccionados, se observó que las velocidades a la entrada de la zona de medición no son constantes. Una de las posibles razones por las que se produce dicha variación, es la dirección del flujo en la descarga de la bomba del canal de recirculación. Se recomienda entonces para futuros proyectos, la elaboración de algún dispositivo que permita regular de manera continúa la velocidad del flujo en la entrada de la zona de medición.
2. La elaboración de las formas de los planos de flotación con las herramientas del programa de simulación numérica COMSOL, resultó complicada. Parece que la forma más recomendable de preparar las geometrías de los cuerpos a analizarse con el programa mencionado, es mediante la importación de dichas geometrías previamente elaboradas con el programa AutoCAD.
3. En un principio, para la Simulación Numérica bidimensional, se intentó trabajar con la opción Estable, pero debido a que no se logró alcanzar la convergencia de los resultados se decidió emplear el método Transiente. Para futuros proyectos se recomienda analizar en detalle los parámetros involucrados para la obtención de la convergencia de resultados empleando el método tipo Estable.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] **NAKAYAMA, Y.**, Introduction to Fluid Mechanics. Reprinted with revisions by Butterworth-Heinemann 2000.
- [2] **ARGÜELLES DÍAZ, K., PARRONDO GAYO, J., FERNÁNDEZ ORO, J.**, Prácticas de Mecánica de fluidos, Departamento de Energía, Universidad de Oviedo, 2005.
- [3] **UGARTE PALACIN, F.**, Mecánica de Fluidos II. Editorial San Marcos, Lima-Perú, 23 de septiembre de 1991.
- [4] **HUGHES, WILLIAM F., BRIGHTON, JOHN A.**, Dinámica de los Fluidos, teoría y 100 problemas resueltos, McGraw-Hill, 1970.
- [5] **WHITE, FRANK M.**, Mecánica de Fluidos, McGraw-Hill, 1991.
- [6] **NEWMAN, J. N.**, Marine Hydrodynamics. Massachusetts Institute of Technology, Third printing, 1980.
- [7] **LÓPEZ MEJÍA, O. D., TORO, J. R.**, Modelamiento Computacional de la calle de Vórtices de Karman por dinámica de Vorticidad.
- [8] **DAILY, JAMES W., HARLEMAN, DONALD R.F.**, Dinámica de los fluidos con aplicación a la ingeniería, Editorial Trillas, México 1975.
http://columbus.uniandes.edu.co:5050/dspace/bitstream/1992/358/1/mi_1244.pdf
- [9] **ANDERSON, JOHN D., JR.**, Computational Fluid Dynamics, McGraw-Hill, Inc. 1995.
- [10] **CARRO CEPEDA, F., HERNÁNDEZ GONZÁLES, F. A.**, Estudio de la Influencia de las Ruedas y los Pasos de Rueda en la Aerodinámica de un Automóvil. Universidad Politécnica de Catalunya. Abril del 2006.
<http://upcommons.upc.edu/pfc/handle/2099.1/2952>

- [11] **DANTEC DYNAMICS A/S.**, BSA Flow Software Version 4.10 Installation & User's Guide, 2006.
- [12] **COMSOL Multiphysics.**, User's Guide, © COPYRIGHT 1994-2007 by COMSOL AB. All rights reserved.
- [13] **COMSOL Multiphysics.**, Modeling Guide, © COPYRIGHT 1994–2007 by COMSOL AB. All rights reserved.
- [14] **AHRWEILLER FERRERA, CHLOÉ.**, Simulación de hidrogenación de aceite de girasol por el software comercial COMSOL MULTIPHYSIC 3.2. Universidad Politécnica de Catalunya. Departamento de ingeniería Química. Mayo del 2006.