

Análisis del comportamiento propulsivo de un remolcador de empuje



M.Colpachi, CEAN, FIUBA
B.Lechatpois, INSA, Rouen

RESUMEN

Se presenta el estudio del flujo alrededor de un remolcador de empuje clásico, de líneas hidrocónicas y dos líneas de eje.

El objeto del estudio fué comparar los resultados del modelo numérico con los obtenidos en el modelo físico.

El modelo numérico se desarrolló con un esquema de Volumen de Fuido (VOF) y se empleó un modelo RANS para el tratamiento de la turbulencia.

Se evaluó el efecto de la densidad de la malla y el efecto de confinamiento de las paredes presente en el ensayo del modelo físico y eventualmente en las riberas de las vías de navegación.

Adicionalmente se analizó el efecto de los propulsores tratados como discos actuadores y se visualizó las líneas de corriente y otros parámetros que afectan sensiblemente a la eficiencia del sistema propulsivo.

El ensayo físico se realizó sobre un modelo de aproximadamente 2.75m de eslora trabajando en Re aproximadamente $2.3e^{06}$.

Los resultados obtenidos en las mediciones sobre el modelo físico coinciden dentro de márgenes razonables con las predicciones numéricas.

Como resultado posterior se definirá un método eficiente para la optimización de las líneas y la disposición propulsiva.

LINEAS DEL REMOLCADOR

Para el estudio se eligió un remolcador de empuje convencional, adecuado al tráfico de la Hidrovía, con dos líneas de eje y con formas hidrocónicas. Dadas las condiciones en la que se espera que opere la flota se eligió un calado máximo de 2.40 m. El plano de líneas se presenta en la Figura 1.

Con el plano se construyó un modelo en escala 16, que posteriormente se ensayó en el CEAN. Las dimensiones principales del buque y el modelo se presentan en la Tabla 1.

DIMENSION	BUQUE	MODELO
Eslora [m]	45.00	2.750
Manga [m]	12.40	0.775
Calado [m]	2.40	0.150
Desplazamiento [t]	850	0.208

Tabla 1: Dimensiones principales

Se dispuso que cada línea de eje funcione con hélices de 2.0 m de diámetro con motores de 1200 kW

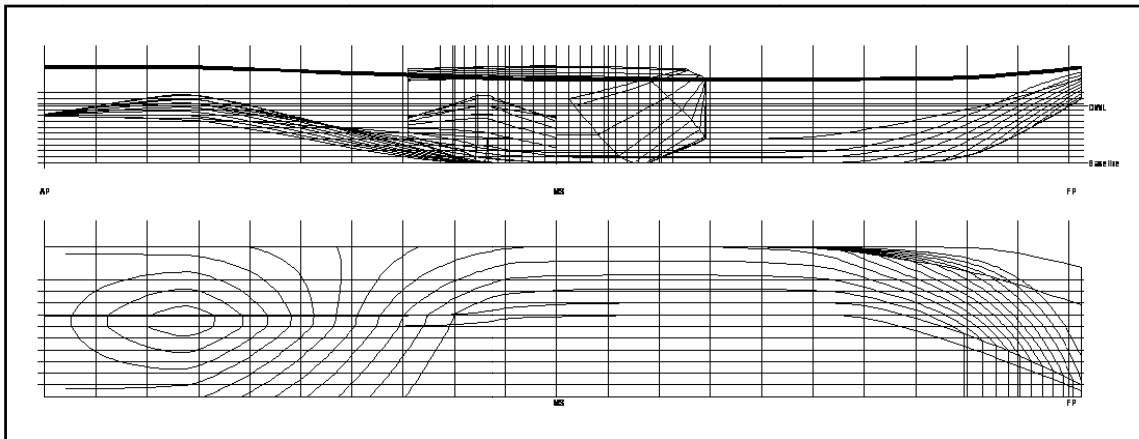


Figura 1: Plano de líneas

MODELO NUMERICO

El sistema de ejes empleado en los estudios tiene el origen en la intersección del plano de base (horizontal pasante por el punto más bajo del casco), el plano de simetría (crujía) y el plano de la sección media.

El eje x es positivo hacia proa, el eje y es positivo hacia estribor y el eje z es positivo hacia la cubierta.

El modelo numérico se desarrolló en base al método del volumen fluido VOF (Hirt C.W.) y se utilizaron dos implementaciones:

OpenFOAM, provisto por OpenCFD Ltd.

NUMECA, provisto en carácter de prueba por NUMECA

Ambas formulaciones poseen herramientas para el pre procesamiento y la discretización, para el cálculo propiamente dicho y para el post-procesamiento.

La turbulencia se modela mediante una formulación $k-\varepsilon$

El método VOF define una variable $0 \leq C \leq 1$ donde $C = 0$ indica una celda no perteneciente al agua y $C = 1$ indica una celda en el agua. La variable así definida cumple con la ecuación del transporte $\frac{\partial C}{\partial t} + U \cdot \nabla C = 0$.

Las propiedades físicas se calculan mediante

$$\rho = \sum_i c_i \rho_i; \mu = \sum_i c_i \cdot \mu_i; 1 = \sum_i c_i$$

Debiéndose cumplir además

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0$$

$$\frac{\partial \rho U_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho U_i U_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{\rho u_i u_j}) + f_i$$

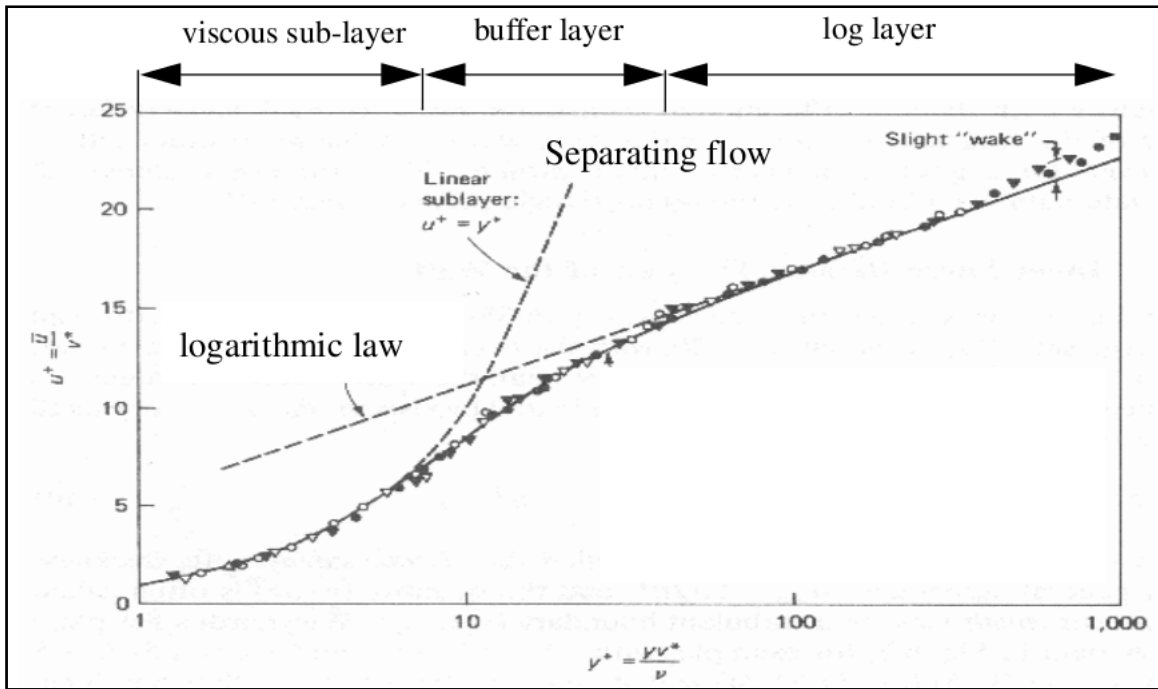


Figura 2: Perfil de velocidades en la capa límite turbulenta

La capa límite turbulenta se modeló mediante un perfil de velocidades sugerido por Lindgren (B., 2002) y representado en la Figura 2

La extensión del modelo se definió del siguiente modo

- Desde la proa: 1.5 LWL hacia $+x$
- Desde la popa: 2.5 LWL hacia $-x$
- Desde el costado: 1.5 LWL hacia $+y$
- Desde LWL: 0.5 LWL hacia $+z$
- Desde LWL: 1.5 LWL hacia $-z$

La influencia de la densidad de la malla se estudió corriendo el modelo con distintas mallas de la misma configuración. A partir de $2 \cdot 10^6$ celdas, los resultados de las fuerzas en la dirección x tienen poca variación. Los resultados de ambos modelos numéricos son consistentes con la práctica habitual de los remolcadores.

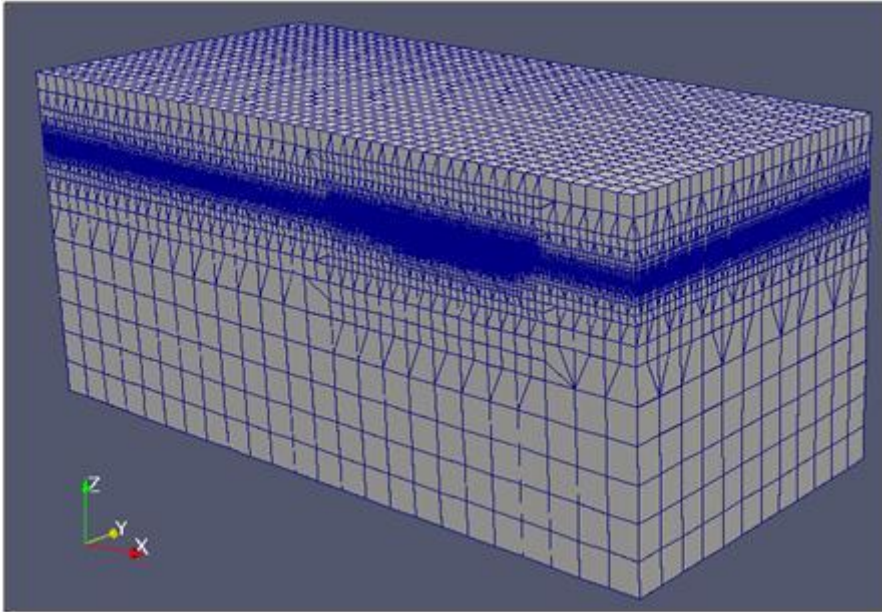


Figura 3 muestra el esquema del mallado. La Figura 4 muestra el efecto de la densidad de la malla.

La velocidad básica del ensayo fue de 1 m/s en el modelo (7.8 kt en el buque real) y se impuso mediante una rampa de crecimiento con el objeto de acelerar la búsqueda de la solución.

La presión en la superficie libre se fijó en $p_0 = 0$

El parámetro k se definió como $k = 3.75 \cdot 10^{-3} \left[\frac{m^2}{s^2} \right]$

El parámetro ε se definió como $\varepsilon = 4.72 \cdot 10^{-5} \left[\frac{m^2}{s^3} \right]$

La influencia de la densidad de la malla se estudió corriendo el modelo con distintas mallas de la misma configuración. A partir de $2 \cdot 10^6$ celdas, los resultados de las fuerzas en la dirección x tienen poca variación. Los resultados de ambos modelos numéricos son consistentes con la práctica habitual de los remolcadores.

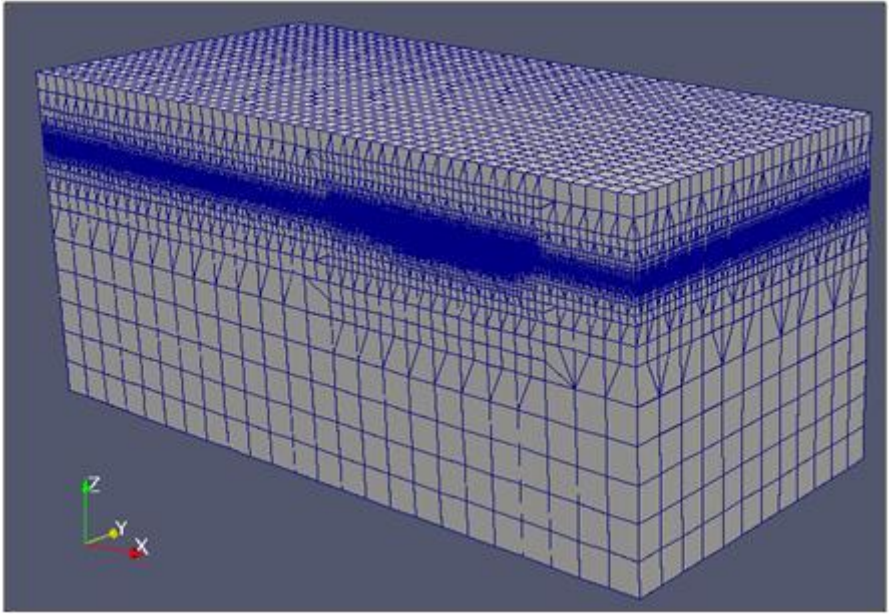


Figura 3: Esquema de mallado

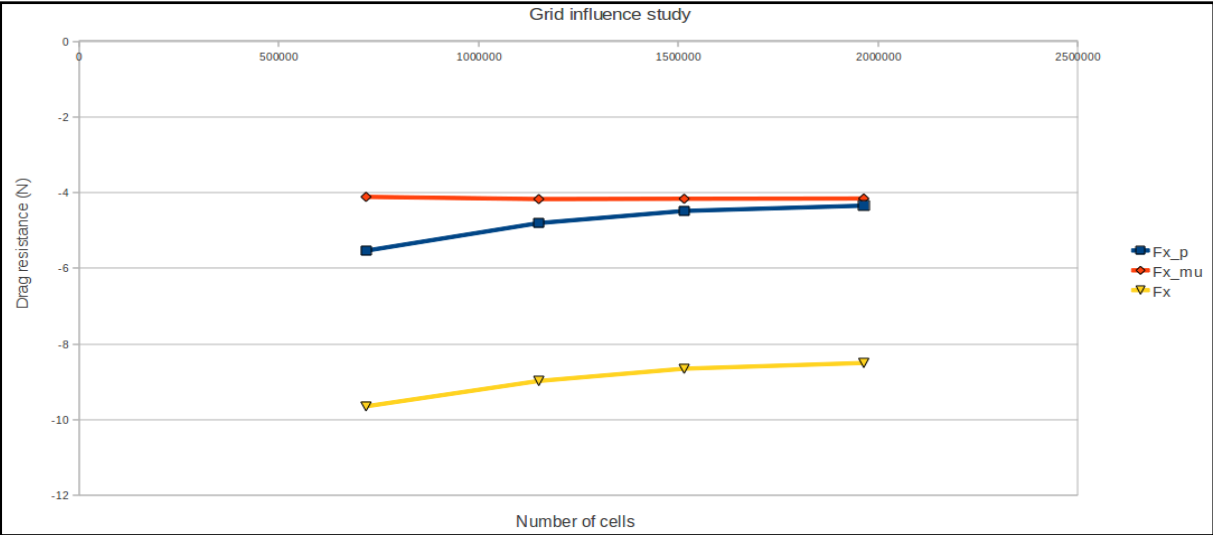


Figura 4: Influencia de la densidad de la malla

En el espejo plano de la proa, la elevación de la ola resultó aproximadamente de 0.05 m que, mediante la aplicación directa de Bernoulli corresponde a una velocidad, en el modelo, de $U = \sqrt{2 \cdot g \cdot 0.05} = 0.99 [m/s]$

La hélice se modeló simplídicamente como un disco actuante introduciendo el cambio en la cantidad de movimiento que genera en su plano.

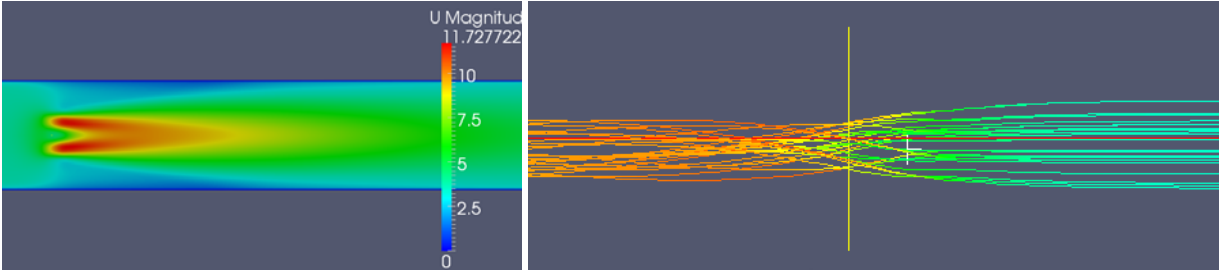


Figura 5: Velocidades y líneas de corriente generadas por el modelo del disco actuante

MODELO FISICO

En paralelo con el modelo numérico se realizó un modelo físico en escala 16 ensayando velocidades entre 0.6 m/s y 1.3 m/s correspondientes a velocidades del prototipo entre 4.6 kt y 10.1 kt



Figura 6: Modelo en escala 16

El proceso de medición sigue los patrones habituales de ITTC empleados en el CEAN. La estimulación de la turbulencia se realizó mediante un alambre de 0.5 mm colocado en la sección de 5% LWL desde la proa.

Las dimensiones del Canal son: Largo 72 m; ancho 3.6 m, profundidad 1.8 m.

ALGUNOS RESULTADOS

La fracción de volumen (denominada α_1 en la



Figura 7) muestra que la zona del túnel de la hélice queda vacía (sin agua) a la velocidad de régimen. Esto fue confirmado posteriormente durante el ensayo del modelo físico.

La formación de olas típica del remolcador fue visible en ambos ensayos (Figura 8) y el ensayo numérico permitió visualizar las líneas de corriente en el túnel sin propulsor (Figura 9) en la que se ponen de manifiesto las deficiencias de su geometría. Estas deficiencias se comprueban también en el buque con la hélice (Figura 10).

Los ensayos en marcha atrás también pusieron de manifiesto puntos críticos de la geometría del túnel y la popa, como se puede observar en las Figura 11, Figura 12 y Figura 13.



Figura 7: Distribución de la fracción de volumen C

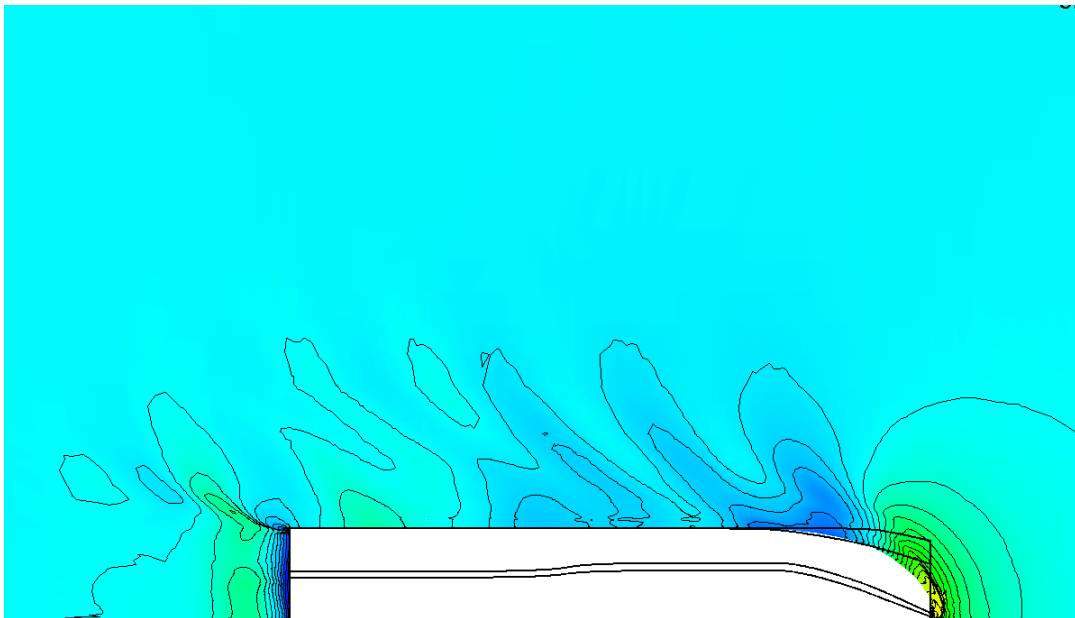


Figura 8: Contornos de las olas

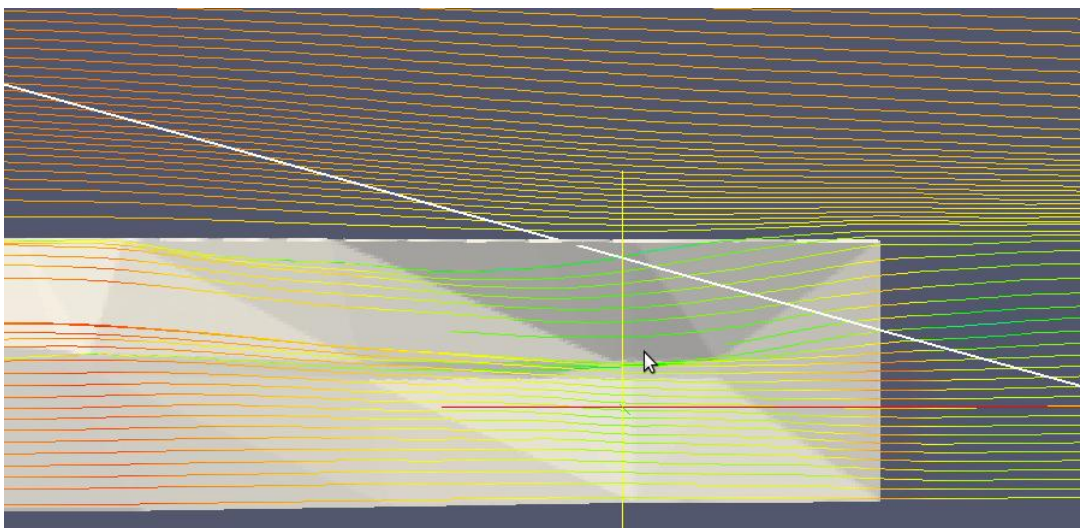


Figura 9: Líneas de corriente en la zona del túnel, sin propulsor.

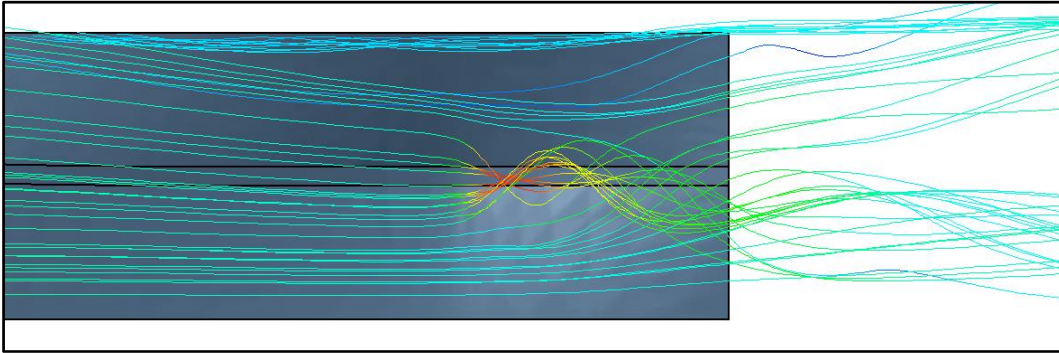


Figura 10: Líneas de corriente en la zona del túnel, con propulsor.

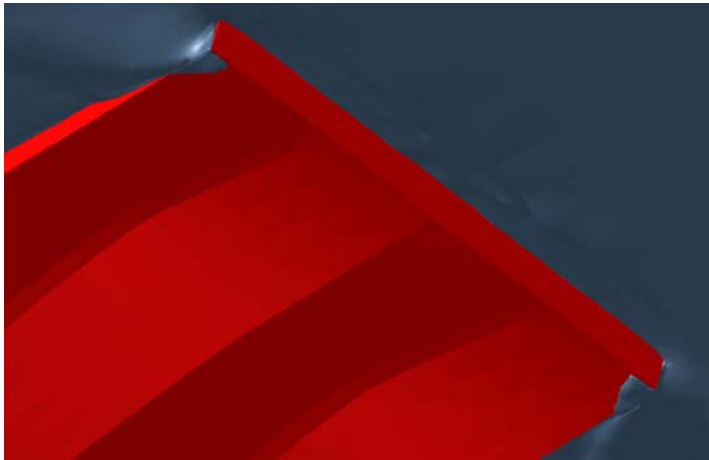


Figura 11: Aire atrapado en marcha atrás por defectos de la configuración del espejo

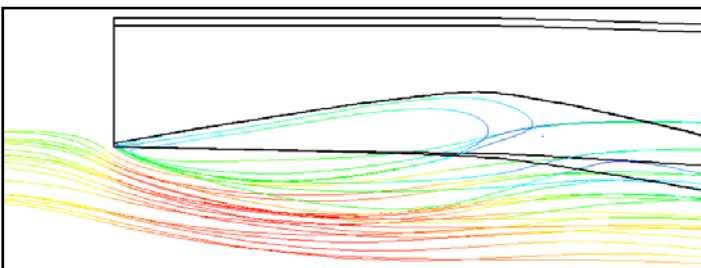


Figura 12: Recirculación en el túnel en la marcha atrás

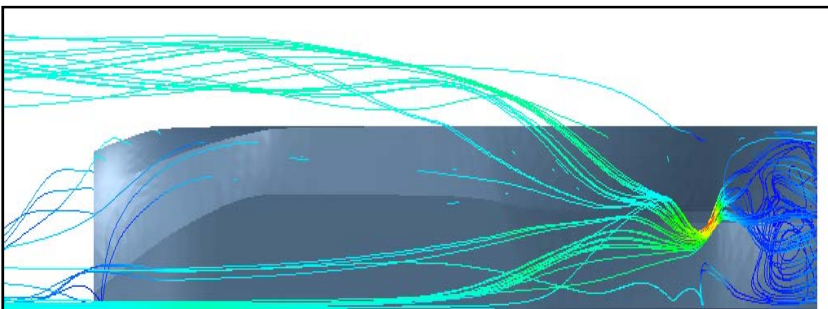


Figura 13: Flujo en marcha atrás en presencia de la hélice

Si bien el resultado de las mediciones de resistencia dio valores preliminares razonablemente coincidentes, el control de los resultados se efectuó recalculando el modelo para tomar en consideración el efecto de bloqueo de las paredes del canal con uno de los dos modelos numéricos (FINE MARINE) encontrándose coincidencias dentro del rango de 3% en todo el rango de velocidades (Figura 14).

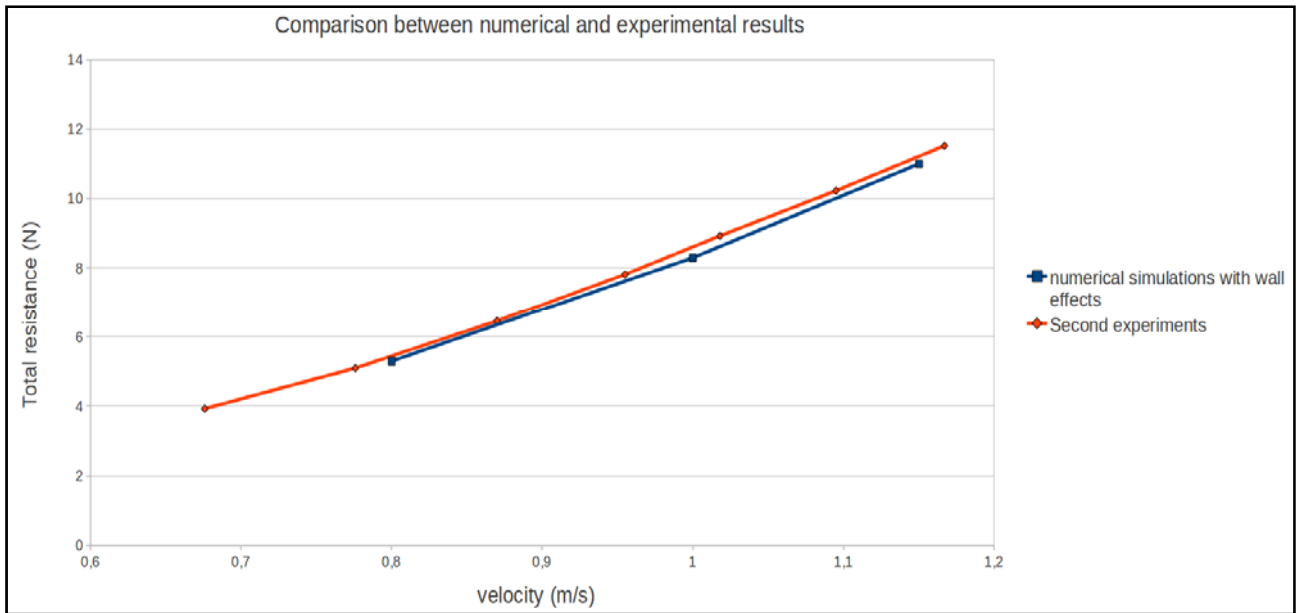


Figura 14: Resistencia al avance comparada

BIBLIOGRAFIA

Hirt C.W., N. B. *Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries.*

Lindgren B. *Flow Facility Design and Experimental Studies of Wall-Bounded Turbulent Shear-Flows*, 2002