

MÉTODO DE DISEÑO HIDRODINÁMICO DE EMBARCACIONES QUE NAVEGAN EN MEDIO BIFÁSICO

Marzan Tachel, Z¹, Prieto Fernández, A. P², Borrego Rodríguez, L³, Pérez Amador, G.A⁴

^{1,3,4} CIDNAV, ² CIDNAV-UTH,

¹ e-mail: zaiki@nauta.cu

RESUMEN

En la fase de diseño conceptual del buque, desde el punto de vista hidrodinámico, uno de los factores más relevantes es la resistencia al avance. Una vez definido su valor, es posible determinar la potencia necesaria para alcanzar la velocidad demandada. Optimizar las formas del casco del buque en función de la velocidad contribuye a disminuir la resistencia al avance y la potencia de la instalación propulsora. En los límites del presente trabajo se desarrolla un método de diseño hidrodinámico de embarcaciones que navegan en medio bifásico.

Palabras claves: resistencia al avance, velocidad, método de diseño hidrodinámico.

1. INTRODUCCIÓN

El casco de un buque se diseña para que su deslizamiento sea óptimo en condiciones normales de navegación. Todo movimiento del casco modifica el flujo del agua alrededor, y al destruir la armonía de las líneas de corriente, contribuye al incremento de la resistencia al avance.

La componente de resistencia al avance producida por la variación de la presión que genera el movimiento del casco entre los medios: aire/agua, se denomina resistencia de ola. Su magnitud se define mediante ensayos de modelos físicos a escala reducida en condiciones controladas de los canales de pruebas de remolque, según los procedimientos de la ITTC. [1]

En el presente trabajo se estudia el modelo del casco de la embarcación: Lancha Rápida Multi-escalón (LR). Se aborda el fenómeno de la crisis de resistencia al avance por incremento de la componente de ola.

Para el desarrollo del proyecto “Lancha Rápida” se aplicaron procedimientos, donde el diseño conceptual tributó directamente a la elaboración del proyecto de detalle, la construcción de modelos a escala reducida para la validación en canales de pruebas. Se estudiaron dos modelos de casco: Mono-escalón y Multi-escalón. Se estableció experimentalmente la supremacía de este último, tanto por la estabilidad en marcha ante la variación dinámica de pesos. Se desarrolló un prototipo que alcanzó velocidades promedio entre 12-14 nudos, que no responde a los resultados esperados.

Se evidenció que la forma del casco determina la resistencia al avance, por lo que se demanda aquella conformación que permita reducir la potencia propulsora capaz de alcanzar el rango de velocidades solicitadas. Teóricamente la resistencia al avance es proporcional al cuadrado de la velocidad. En los límites del presente trabajo, al incumplimiento de esta función cuadrática se le denomina: crisis de resistencia al avance en medio bifásico.

Estos antecedentes definen la siguiente situación problemática: teniendo en cuenta que las embarcaciones desarrolladas no alcanzan las velocidades previstas para su empleo en las condiciones de mar en calma, debido a la crisis de resistencia al avance, se define el siguiente problema científico: ¿Cómo influye la forma del casco en el control de la resistencia de ola para el incremento de la velocidad?

La identificación del problema permitió definir como objetivos los siguientes: determinar las características hidrodinámicas de las formas de cascos de lanchas rápidas; determinar la componente de ola de la resistencia al avance, en la generación de la crisis de resistencia y evaluar el sistema de control de la crisis de resistencia al avance.

Para dar solución al problema, se realiza el análisis de los fenómenos hidrodinámicos mediante la modelación física a escala, tocando como criterio de semejanza el número de Froude. Se emplean los métodos investigativos: la observación, la simulación computacional y la experimentación mediante los ensayos en modelos a escala y el procesamiento estadístico de los resultados.

Los límites de la investigación se definen en los términos de navegación en medio bifásico (aire/agua) que considera una superficie libre homogénea, donde se desprecian las capas de mezclas; formulación de modelos analíticos, numéricos y físicos a escala reducida; tecnología en función del nivel de desarrollo de las fuerzas productivas del astillero e integración con la economía nacional, que minimizan las importaciones y los costos de investigación.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

En los límites del presente trabajo se asume que el modelo científico es una representación abstracta, conceptual, gráfica o física de fenómenos, sistemas o procesos a fin de analizarlos y describirlos [2]. Un modelo permite determinar un resultado final a partir de los datos de entrada. Se considera que la creación del modelo es una parte esencial de toda la actividad científica.

En la presente investigación se utiliza el modelo físico a escala reducida que tiene como instalaciones experimentales el banco de centraje, el banco de inercias, el estanque de pruebas de estabilidad estática, el canal de pruebas hidrodinámicas y la acuatoria restringida.

Instalación experimental

La instalación experimental se compone de modelos, soportes, equipos de medición y sistema de adquisición y almacenamiento de datos. A continuación, se describen estos elementos.

Modelos

Tecnología de construcción

El modelo a escala reducida del prototipo de una embarcación multiescalón, con una compleja geometría en popa, con un quillote central y un espejo de popa recto. Ver figura 1.

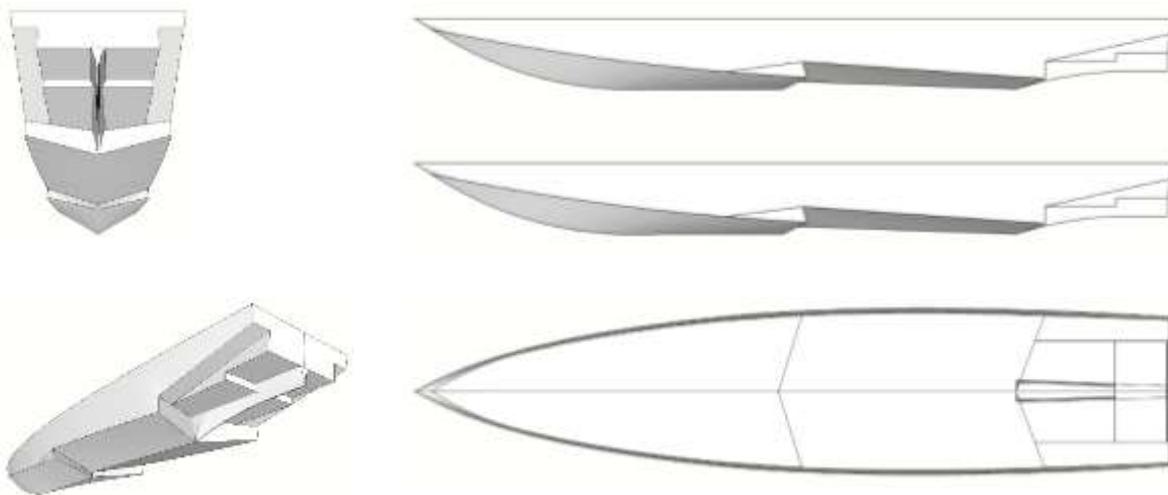


Fig.1. Modelo geométrico computarizado.

El casco se concibió a partir de una estructura longitudinal aligerada, ubicada en el plano diametral hasta la quilla, con dieciocho refuerzos estructurales transversales, cuadernas y el espejo de popa. Para el cierre superior por el plano de la cubierta se monta una platabanda, conformando así una estructura que permitiera acoplar el forro y obtener la forma final. El mismo principio fue utilizado para la construcción de la superestructura, que cuenta con una estructura aligerada en el plano diametral y siete cuadernas.

Equipos de medición

Carro calibrador eléctrico 200VCA, 3F, 50/60Hz., motor propulsor de 11kW 220 VCD. Control de la velocidad por potenciómetro de la corriente compaund a través del bloque DS100. Control del tiempo de aceleración / desaceleración restringido a 6 (s), mediante el bloque Linaer Time Kit (LTK), velocidades régimen de baja: 0,03 – 0,6(m/s); régimen de alta: 0,3 – 6,0 (m/s), el cambio

de régimen se realiza a través del reductor mecánico 1/10 y el acoplamiento de los ejes principal y secundario mediante *closhets* embragues electromagnéticos.

El carro calibrador cuenta con 6 sistemas de frenaje.

Sistema energético por troleys de 3 vías y dispositivo de transmisión por electrodos (doble carbones) remolcados por el carro. Incluye en el sistema dos transformadores 220 / 110 VCA.

El equipo de adquisición de datos instalado en el panel frontal permite la selección de la distancia de medición, las lecturas del optcoder y el cronómetro, así como el registro del número de vueltas de hasta 2 medidores de flujo (Current Meteres).

La celda de carga firma Boshing (500kgf), con Indicador inteligente TAS-1, con fuente estabilizada de voltaje de 10 ± 0.01 Vcd.

En el modelo se instala la unidad de medición inercial (IMU) tipo MTi-28 A83 G35 de la firma Xsens, para sensar los ángulos de asiento, escora, las velocidades angulares de guiñada, balanceo, cabeceo, las aceleraciones lineales en los tres ejes. Las señales se trasmiten por puerto USB a la PC _Portátil.

Para las pruebas en la acuatoria de la bahía en los modelos se instala la unidad de medición inercial con GPS (MTi-G) que suma a los anteriores parámetros los siguientes; la posición geodésica (latitud, longitud, altura) y el tiempo universal (UCT). Las señales se trasmiten por puerto USB, se registran con el administrador Xsens instalado en la PC _Portátil. Para redundar las mediciones de velocidad se ubica a bordo de la lancha un GPS Garmín-76C conectado a la PC- Portátil para el registro de las rutas, el tiempo y las velocidades.

El transductor de desplazamiento vertical y la celda de carga de 500kgf se conectan al módulo de adquisición de datos con salida USB que es controlado por el programa Labview v8, instalado en la PC_ Portátil.

Como datos de entrada se cuenta con la tabla de pesos de cada componente de los modelos, determinados en la balanza analítica digital KILO Tech SN.CS KWS 10020359 Capacidad 15kg División 2g.

Para el control del peso total de los modelos ensamblados se emplea el Dinamómetro digital KERN CH50K100 Capacidad 50kg División 100g.

Pruebas en el canal de remolque.

El objetivo general de los ensayos en el canal de remolque es establecer la influencia de las siguientes variables sobre las cualidades hidrodinámicas del modelo:

- Resistencia del agua al avance del modelo remolcado.

- Efecto combinado del ángulo de asiento en marcha y la distribución de los pesos sobre la resistencia al avance.
- Interferencia hidrodinámica entre los escalones transversales y los conformadores de flujo longitudinales.
- Efecto de la cavitación en los escalones y en los planos de distribución de las hélices y los timones.
- Efecto de los deflectores de flujo en el control y eficiencia del planeo.

Pruebas en la acuatoria restringida

Con el objetivo de alcanzar los valores máximos de velocidad de remolque que demanda el proyecto de LR a escala de modelo, se procede a la construcción de una instalación experimental para el trabajo en aguas abiertas, la que está compuesta por:

- Lancha de planeo con Motor Fuera de Borda (MFB).
- Soporte ligero en proa para remolque por la banda, con la celda de carga y los cables del sensor IMU.
- Modelo con fijación del remolque por proa.

Las pruebas se desarrollaron en las siguientes acuatorias restringidas:

Bahía de Cabañas, Bahía de La Habana. Ver figura 2.



Fig. 2. Pruebas desarrolladas en las acuatorias restringidas.

3. RESULTADOS

Los resultados de los ensayos realizados en el canal, donde solo se trabajan en condiciones de oleaje atenuado, por la corrida en régimen de baja del carro, hasta el sector de arranque, se evidencia, el macheteo del modelo remolcado al encuentro del tren de olas.

Curvas de remolque según las formas del casco de la lancha

Los resultados generalizados en función del coeficiente de la calidad hidrodinámica inversa $e(R/D)$ y el Número de Froude calculado por el Desplazamiento volumétrico $Fr.D$, para lo cual se asume el valor de la aceleración de la gravedad registrado en el canal, durante los ensayos con el sensor IMU, fue de $9,69 \pm 0,1$ (m/s^2). Se asume para el cálculo del peso específico del agua, el valor de la temperatura del agua medido durante el mismo ensayo.

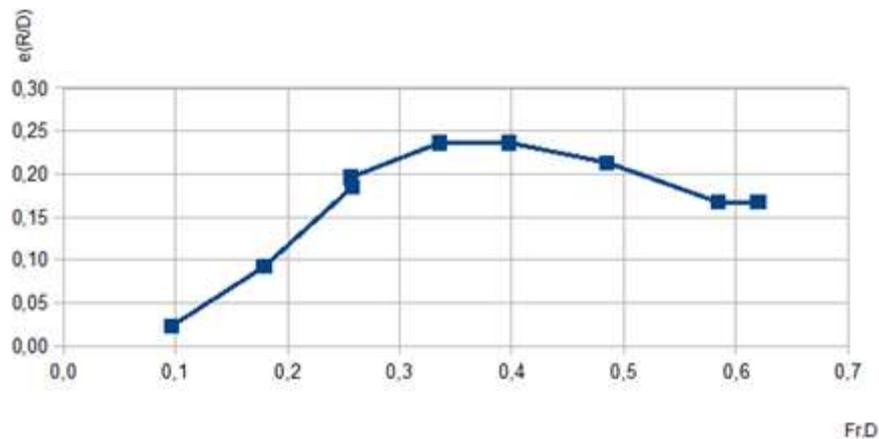


Fig. 3. Curva de remolque modelo Multi Escalón: Estado de carga No1.

En la figura 3 se observa que el punto de inflexión de la rama ascendente está en el intervalo $Fr.D=0,2...0,3$. Los valores máximos de la curva $e=0,24$ en el intervalo $Fr.D=0,35...0,4$. El régimen deslizante con planeo pleno comienza a valores de $Fr.D=0,6 \pm 0,02$, donde alcanza $e=0,16 \pm 0,01$.

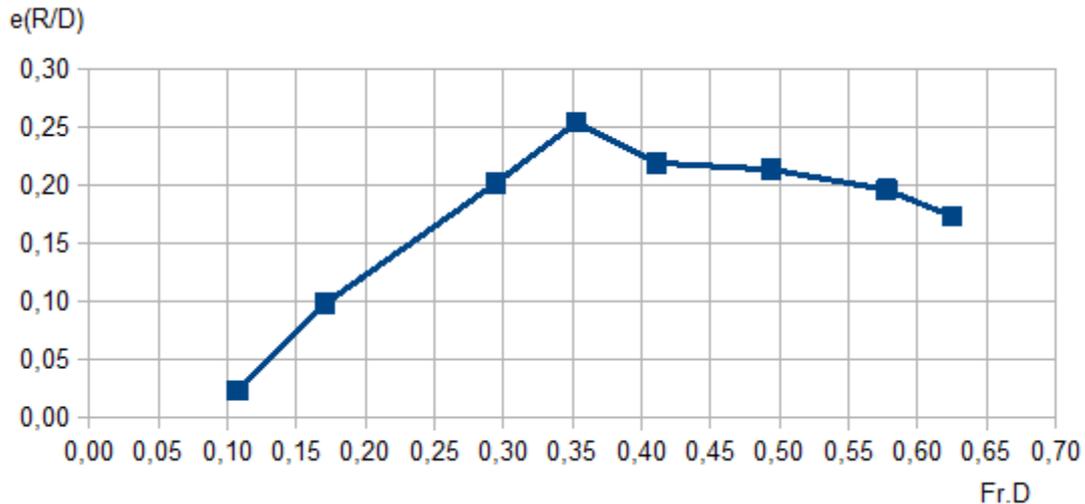


Fig. 4. Curva de remolque modelo Multi Escalón: Estado de carga No 2.

En la figura 4 se observa que el punto de inflexión de la rama ascendente está indefinido en el intervalo $Fr.D=0,2...0,3$. Los valores máximos de la curva $e=0,25$ en el intervalo $Fr.D=0,35...0,4$. El régimen deslizante con planeo pleno comienza a valores de $Fr.D=0,6 \pm 0,02$, donde alcanza $e=0,18 \pm 0,01$.

Influencia de los conformadores de flujo longitudinales en la lancha

Se constató que a velocidades características del régimen de semi-planeo, con ángulos de asiento en el rango de $-3,5^\circ$ y hasta $-7,5^\circ$, particularmente con velocidad de $3,0 \pm 0,1$ (m/s), es significativo el rebote del chorro en las entradas escalonadas de los conformadores en forma de escalones longitudinales del fondo. Se observa la formación de cortinas de filetes de agua escalonadas según la altura del extremo de entrada del escalón longitudinal, que salen del fondo y se extienden a las bandas sobre la superficie del espejo de agua. Las tres cortinas de filetes se unen en un seno profundo, en el área de cuadernas aguas abajo del escalón, que va desde el casco hasta un ancho de dos bandas. En ningún caso estas cortinas individuales, ni su combinación choca con las bandas del canal, al menos en la eslora del modelo.

En el régimen de planeo en el rango entre $5,1 \pm 0,1$ (m/s) y hasta $5,5 \pm 0,1$ (m/s), el chorro de rebote, identificado por Savitsky, en la década de los años 50 del siglo XX [4]. Se observa concentrado en la proa de ambas aletas longitudinales de las bandas, aguas arriba del escalón.

Para este rango se confirmó experimentalmente la predicción realizada por las simulaciones con el CFX del Ansys 16,0. Se observó la frontera paralela al casco, generada por el área sumergida de la aleta longitudinal de cada banda. La misma se va separando del casco en dirección a la terminal de popa y emerge como un tren de olas longitudinales. En tanto que los filetes de agua que resbalan por el fondo aguas abajo del escalón terminan emergiendo por las bandas de los modelos y llegan a la altura de las cubiertas e incluso chocan con las bases en voladizo de las plataformas en la superestructura de popa.

Durante los ensayos se constató, que para la ubicación del conformador de flujo longitudinal, en el rango de velocidades ensayadas de $(0,9...5,5) \pm 0,1$ (m/s), el mismo contribuye significativamente a la estabilidad del régimen de planeo.

Evaluación del efecto escala en la lancha

En el caso de las lanchas rápidas en régimen de planeo el efecto de escala influye sobre la resistencia de fricción.

Los resultados obtenidos en las velocidades señaladas, permitieron constatar que el modelo no sale al régimen de planeo y que por la poca esbeltez de la proa, el modelo sin el suficiente ángulo de asiento, tiende a formar una ola frontal, que restringe su avance y aumenta la resistencia.

Validación de los ensayos numéricos

Se utiliza como criterio de validación de los ensayos numéricos la convergencia de los patrones de olas generadas por el movimiento del modelo físico contra los observados con la simulación para los mismos valores de velocidad. Ver figura 8.

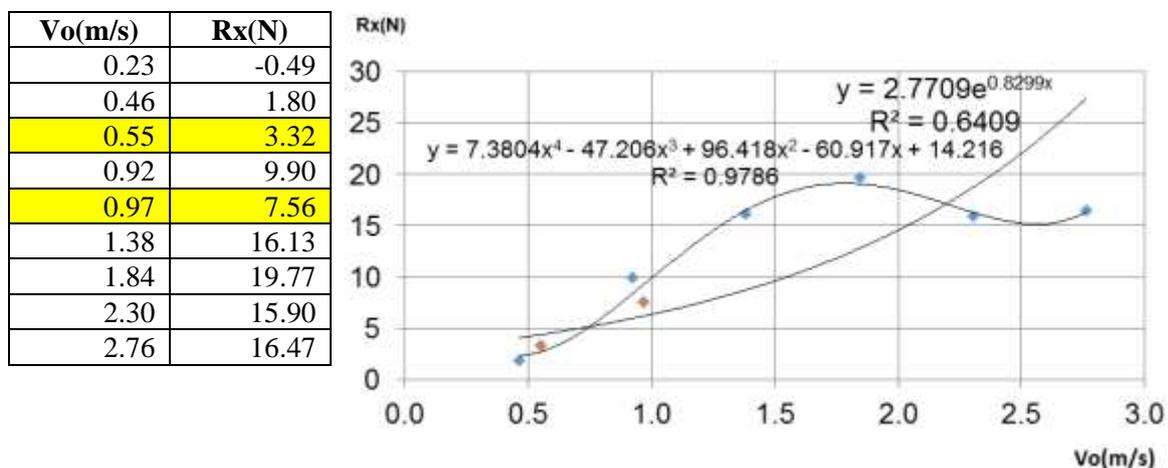


Fig. 5. Gráficos de la resistencia al avance conjunta de modelación numérica y física.

En la figura 5 la nueva línea de tendencia conjunta de los resultados de los ensayos numéricos y los ensayos físicos son las expresiones (1 y 2).

$$\text{Potencial} \quad R(N) = 7.2585 \times (Vo)^{1.2214} \quad (1)$$

$$\text{Polinómica} \quad y = 7.3804 \times (Vo)^4 - 47.206 \times (Vo)^3 + 96.418 \times (Vo)^2 - 60.917 \times (Vo) + 14.216 \quad (2)$$

4. DISCUSIÓN

Con la ejecución de las pruebas se garantizó el cumplimiento de los principales requisitos e indicadores para los ensayos en el canal tanto por el modelo como por los equipos e instrumentos de medición, componentes de la instalación experimental.

El inconveniente más significativo en la realización de los experimentos estriba en la imposibilidad de medir automáticamente y al unísono las componentes de velocidad, la fuerza de resistencia al avance, el desplazamiento vertical y el ángulo de asiento en marcha. Se realizó la sincronización de los relojes para el Tiempo Universal (UTC), con desviación en las décimas de segundo.

Según la geometría del casco de la lancha: multi-escalón, desarrollado por el CIDNAV, se analizaron los resultados de las pruebas del modelo a escala reducida, y la curva de resistencia al avance extrapolada a escala natural. El procesamiento adimensional de la curva de remolque, expresado en función de la calidad hidrodinámica, determinada como la razón de la Potencia

efectiva sobre el Desplazamiento (Ne/D) y del Número de Froude, calculado en función del Desplazamiento ($Fr.D$), se representa en la figura 10.

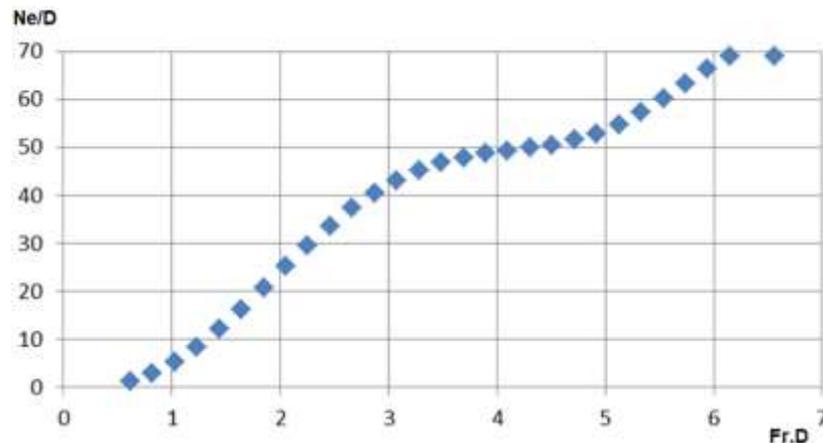


Fig. 6. Curva de la calidad hidrodinámica del casco Multi Escalón en función del criterio de Froude calculado por el Desplazamiento.

5. CONCLUSIONES

- Los ensayos con modelos a escala reducida en el canal de pruebas de remolque, constituyen una potente herramienta para el proceso de toma de decisiones en la etapa de diseño de los prototipos.
- El diseño del modelo se fundamenta en la teoría de la semejanza geométrica, cinemática y dinámica. Con especial rigor se controló la distribución de los pesos, por su impacto en los procesos transitorios de inercias.
- Se validó el procedimiento de diseño preliminar mediante la simulación numérica. El programa CFX Ansys v.16.0 es eficiente en la simulación de los fenómenos de deformación de la superficie bifásica aire / agua provocada por el movimiento del cuerpo a velocidad constante, causa del fenómeno de la crisis de resistencia de ola.
- Entre los impactos se destaca la introducción de la tecnología de impresión 3D, los bajos costos de construcción e investigación, la validación del método de diseño, la extensión de la modelación numérica con el paquete CFX del Ansys v16.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] ITTC Procedure 7.5-02-03-01.4 Performance Prediction Method. Procedimiento de la Conferencia Internacional de Estanques de Pruebas para ensayos de remolque con modelos a escala reducida. / Método de Predicción de la ejecución ITTC-1978
2021. 30 pp.

[3] <http://es.wikipedia.org/wiki/Modelo-científico?>

[4] Linsay. Hidrodinámica de lanchas planeadoras. (en inglés). Washington DC, 1963.