

## **Efecto de la Aplicación de Tanques Estabilizadores Anti-Roll para Prevenir la Resonancia Paramétrica**

**Marcelo A. Santos Neves<sup>\*</sup>, Claudio A. Rodríguez Castillo,  
Jorge A. Merino Muñoz, Jerver E. Mañuico Vivanco,  
José C. Villagómez Rosales, Radhesh Agarwal<sup>\*\*</sup>  
(COPPE/UFRJ, Brasil)**

### **Resumen**

El objetivo principal del presente trabajo se centra en el análisis del efecto sobre el control del movimiento de roll utilizando un tanque estabilizador pasivo tipo-U para evitar la resonancia paramétrica en olas longitudinales. Una embarcación con espejo de popa -conocida por su tendencia a presentar resonancia paramétrica- se emplea para el estudio. Un sistema de ecuaciones diferenciales no lineales describe el movimiento del fluido dentro del tanque, así como las fuerzas y momentos que el tanque genera sobre el buque son resueltos numéricamente en función del tiempo. Los resultados se presentan en forma de comparaciones del comportamiento dinámico de la embarcación con y sin tanque de estabilización en forma de límites de estabilidad, cuencas de atracción, curvas y superficies de integridad, así como curva de amplitud crítica de ola en función de la sintonía. Se discute la variación de las distintas características dinámicas resultantes de la aplicación del tanque de estabilización al navío y su efecto en la disminución del rolido paramétrico en mar de proa.

---

\* Profesor, Departamento de Ingeniería Naval y Oceánica, COPPE, Universidad Federal de Rio de Janeiro, Ilha do Fundão, Centro de Tecnologia, Sala C-203, Rio de Janeiro, Brasil  
[masn@peno.coppe.ufrj.br](mailto:masn@peno.coppe.ufrj.br), Tel/Fax: 55 21 2562-8731.

\*\*Alumno visitante, IIT - Indian Institute of Technology, Karagpur, India

## **INTRODUCCIÓN**

En ondas longitudinales un navío puede ser forzado a fuertes movimientos de rolido. En vez que éste sea provocado directamente por la acción de las olas, lo es debido a un mecanismo de excitación interna llamado resonancia paramétrica. La resonancia paramétrica (o rolido paramétrico) es un mecanismo dinámico en el que el movimiento de rolido puede desarrollar muy rápidamente debido a la transferencia de energía de los movimientos verticales (arfada y cabeceo) al movimiento de roll. La amplificación del rolido se hace posible por el proceso de inestabilización asociado a los cambios oscilatorios introducidos en el momento restaurador de rolido por el desplazamiento vertical relativo asociado con el movimiento de arfada y cabeceo y el pasaje de la ola a lo largo del casco. Tales inestabilidades usualmente toman lugar cuando la frecuencia de encuentro se acerca a dos veces la frecuencia natural de rolido.

Debido al número significativo de situaciones serias de rolido paramétrica, resonancia paramétrica pronto fue considerado como uno de los más complicados e intrincados fenómenos de comportamiento de buques en el mar. Actualmente es objeto de numerosas investigaciones. Para una recopilación de muchos artículos científicos recientes relacionados con el tema, ver Neves (2006), Neves y Belenky (2008). De otro lado, es bien conocido que el control del rolido a través de dispositivos como tanques anti-rolido es una solución efectiva en mar de banda resonante. Estos dispositivos generan un momento anti-rolido en contra de la excitación, ver Lloyd (1989) y así pueden limitar la inestabilidad paramétrica en rolido. Umeda et al. (2007) probaron en olas longitudinales un diseño específico de tanque estabilizador instalado en un buque contenedor con éxito relativo. En ese estudio solo muy pocas condiciones de sintonía fueron investigadas.

El presente trabajo explora la dinámica del rolido paramétrico en mar de proa analizando un conjunto amplio de condiciones iniciales. Las simulaciones numéricas son basadas en el modelo desarrollado por Neves, Merino, Rodríguez (2009) el cual acopla no linealmente el movimiento del fluido dentro del tanque con los movimientos de rolido, cabeceo y arfada del navío. En esta última referencia, para condiciones iniciales específicas, se

analiza variaciones de parámetros para varios tanques: dimensiones características, masa de agua y nivel de disipación interna.

El presente estudio toma un tanque de los analizados anteriormente y amplía el conjunto de condiciones iniciales. El modelo no lineal que describe el movimiento del agua dentro del tanque es acoplado con el modelo matemático de tercer orden presentado por Neves y Rodríguez (2005,2006) para investigar la resonancia paramétrica en olas longitudinales. El modelo considera arfada, rolido y cabeceo acoplados extensivamente entre ellos. Este modelo matemático fue exitosamente comparado con pruebas experimentales correspondientes a fuerte rolido paramétrico en mar de frente de una embarcación pesquera Neves y Rodríguez (2005, 2006) y un buque contenedor, Rodríguez et al. (2007). Por lo tanto, puede considerarse una herramienta válida para investigación numérica no lineal para el control de resonancia paramétrica por medio de tanques anti-rolido.

Una embarcación con espejo de popa - conocida por su tendencia a presentar resonancia paramétrica - se emplea para el estudio. Un sistema de ecuaciones diferenciales no lineales describe el movimiento del fluido dentro del tanque, así como las fuerzas y momentos que el tanque genera sobre el buque son resueltos numéricamente en función del tiempo. Los resultados se presentan en forma de comparaciones del comportamiento dinámico de la embarcación con y sin tanque de estabilización en forma de límites de estabilidad, cuencas de atracción, curvas y superficies de integridad, así como curva de amplitud crítica de ola en función de la sintonía. Se discute la variación de las distintas características dinámicas resultantes de la aplicación del tanque de estabilización al navío y su efecto en la disminución del rolido paramétrico en mar de proa.

## MODELO MATEMÁTICO

Eliminado: ¶

Con el objetivo de describir los movimientos de la embarcación y el movimiento interno del fluido se emplean dos ejes de referencia. Un sistema inercia **CXYZ** moviéndose a la velocidad media del navío, tal que, en el instante  $t=0$  el plano XY coincide con la superficie calma del agua con el punto C en la misma vertical del centro de gravedad G del navío. Un segundo sistema de coordenadas es **Oxyz**. Este segundo sistema está fijo al navío de modo que el plano **Oxy** coincide inicialmente con el plano de agua del barco en aguas tranquilas y el eje **Ox** se tiende sobre el plano diametral, siendo positivo en el sentido de la velocidad del navío, el eje **Oy** positivo dirigido hacia babor y el eje **Oz** pasa siempre por la línea vertical que contiene el centro de gravedad del navío, positivo hacia arriba. Los dos sistemas de referencia se muestran en la Figura 1.

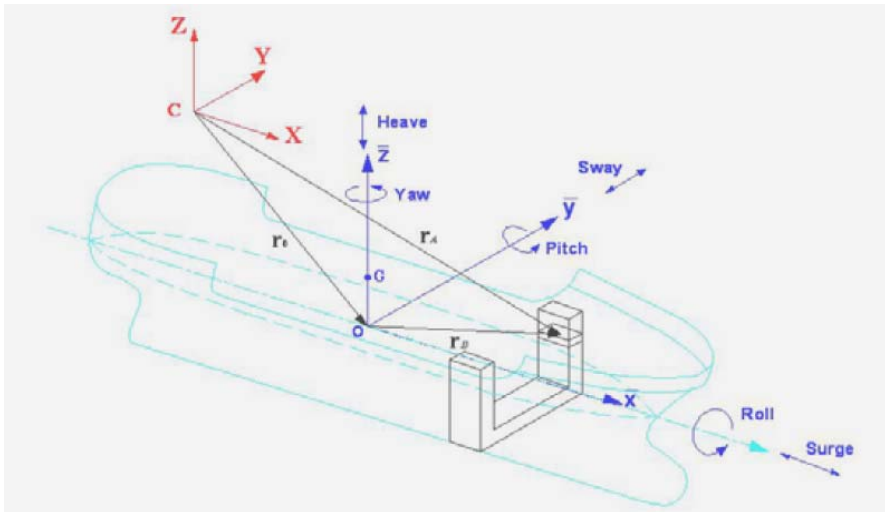


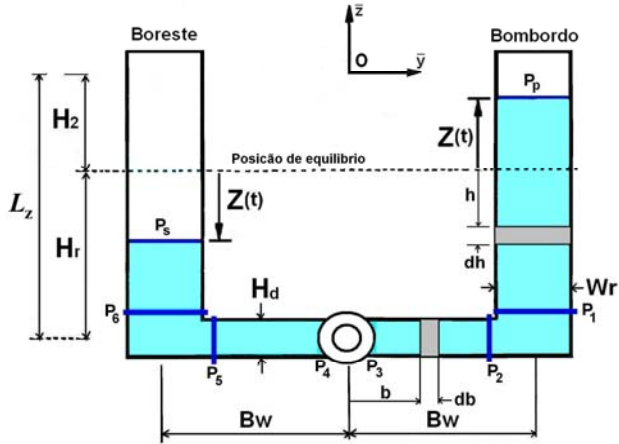
Figura 1. Sistemas de referencia para el navío TS

Las características geométricas del tanque en U son presentadas en la Figura 2, donde  $m\%$  es el porcentaje de masa de fluido con respecto a la masa del navío,  $\eta_t$  es el coeficiente de decaimiento del fluido y  $\omega/\omega_n$  la sintonía del tanque, siendo  $\omega_n$  la frecuencia natural del

Con formato: Color de fuente: Automático, Español (Perú), Disminuido 6 pto

tanque y  $\omega_{n4}$  la frecuencia natural del movimiento de rolo del buque. Dos reservorios verticales son conectados por un ducto transversal, todos ellos de sección rectangular constante. Se asume que el movimiento del fluido es unidireccional y es descrito por el desplazamiento del fluido  $Z(t)$ , definido en la Figura 3. Debe ser notado que el punto O no necesariamente coincide con G, el centro de gravedad del navío, asumido en la posición fija  $(0,0, G_z)$

Código de campo  
Con formato: Disminuido 6  
pto



Parámetros del Tanque

Bw	[m]	3.00
Wr	[m]	1.50
Hr	[m]	1.50
Hd	[m]	0.381
m%	[%]	3.00
$\eta_t$	[ ]	0.30
$\omega_t / \omega_{n4}$	[ ]	1.00

Eliminado:  $\omega / \omega_4$   
Con formato: Fuente: 11,5  
pt, Disminuido 6 pto

Figura 2. Características del tanque

Las ecuaciones generales de movimiento son representadas como:

$$(\tilde{M} + \tilde{A})\ddot{\vec{s}} + \tilde{B}(\dot{\phi})\dot{\vec{s}} + \tilde{C}_r(\vec{s}, \zeta) = \tilde{C}_{ext}(\zeta, \dot{\zeta}, \ddot{\zeta}) + C_t(Z, \dot{Z}, \ddot{Z}, \vec{s}, \dot{\vec{s}}, \ddot{\vec{s}}) \quad ..(1)$$

Donde el vector  $\vec{s}$  representa los movimientos del cuerpo rígido en los seis grados de libertad. En la ecuación (1),  $\tilde{M}$  es una matriz 6x6 la cual describe las características de inercia del casco. Sus elementos son: m, la masa del barco,  $J_{xx}$ ,  $J_{yy}$  y  $J_{zz}$ , los momentos de masa de inercia de rolo, cabaceo y guiñada, respectivamente, y  $J_{xz}$ , el producto de inercia de rolo y guiñada. Todos los momentos tomados con referencia al origen escogido.  $\tilde{A}$  es también una matriz 6x6, cuyos elementos representan las masas adicionales hidrodinámicas generalizadas.  $\tilde{B}$  describe los coeficientes de las reacciones hidrodinámicas dependientes de la velocidad del

navío, e incorporan términos no lineales en la ecuación de roll.  $\vec{C}$  es un vector que describe las fuerzas de restauración y momentos dependientes de los movimientos relativos entre el casco del navío y la elevación de la onda  $\zeta(t)$ . En el lado derecho de la ecuación (1), el vector generalizado  $\vec{C}_{ext}(\zeta, \dot{\zeta}, \ddot{\zeta})$  representa la excitación externa de la ola, usualmente referidos en la literatura como los términos de fuerza Froude-Krylov y de difracción de ola, dependientes del ángulo de incidencia de la ola, frecuencia de encuentro  $\omega_e$ , amplitud de la ola  $A_w$  y el tiempo.

Con formato: Español  
(España - alfab. internacional),  
Disminuido 6 pto

Finalmente, el vector generalizado  $C_t(Z, \dot{Z}, \ddot{Z}, \vec{s}, \dot{\vec{s}}, \ddot{\vec{s}})$  representa las fuerzas y momentos actuando en el navío debido al movimiento del fluido dentro del tanque. Para el navío sin tanque, la ecuación (1) reproduce las ecuaciones del sistema no lineal presentado por Neves and Rodríguez (2005, 2006).

A continuación, se muestran las expresiones relacionadas con la acción externa del tanque sobre el navío. Mayores detalles de las derivaciones son presentados en Neves, Merino y Rodríguez (2009). La fuerza para un volumen elemental del fluido se expresa:

$$dF_{\text{tanque}} = -(\mathbf{a}_A + \mathbf{g}\vec{g}_u)dm_t \quad ..(2)$$

Y el correspondiente momento como:

$$dM_{\text{tanque}} = -\mathbf{r}_B \times (\mathbf{a}_A + \mathbf{g}\vec{g}_u)dm_t \quad ..(3)$$

Y el vector generalizado definido en la ecuación (), puede ser separado en:

$$\begin{bmatrix} C_{t1} \\ C_{t2} \\ C_{t3} \end{bmatrix} = \tilde{T} \begin{bmatrix} X_a \\ Y_a \\ Z_a \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} C_{t4} \\ C_{t5} \\ C_{t6} \end{bmatrix} = \tilde{T} \begin{bmatrix} K_a \\ M_a \\ N_a \end{bmatrix} \quad ..(4)$$

Donde  $\tilde{T}$  es la matriz tridimensional de rotación y las expresiones relacionadas con el efecto del tanque sobre el navío en arfada, rolido y cabeceo son dadas a continuación en función de las características del tanque:

$$Z_{ia} = -\rho_t A_r \{C_1 [g \cos \phi \cos \theta + \dot{w} + pv - qu - L_x(\dot{q} - pr)] + 4B_w p \dot{Z} + C_2(p^2 + q^2) + 2B_w(\dot{p} + qr)Z + 2Z\ddot{Z}\} \quad ..(5)$$

$$K_{ia} = -\rho_t A_r \{2B_w(H_r + L_z)\ddot{Z} - 4H_2 p Z \dot{Z} + 1/3B_w^2(C_1 + 4H_r)(\dot{p} + qr) + 2B_w [g \cos \phi \cos \theta + \dot{w} + pv - qu - L_x(\dot{q} - pr) + H_2(q^2 - r^2)]Z + 2/3(3\tilde{B}_w L_z^2 + 3H_2^2 H_r - 3H_2 Z^2 + 3H_2 H_r^2 + H_r^3)(\dot{p} - qr) + C_2 [g \sin \phi \cos \theta + \dot{v} - pw + ru + L_x(\dot{r} + pq)]\} \quad ..(6)$$

$$M_{ia} = -\rho_t A_r \{-2L_x Z \ddot{Z} + 4(-H_2 q Z + B_w L_z r - B_w L_x p) \dot{Z} - L_x C_1 [g \cos \phi \cos \theta + \dot{w} - qu + pv - L_x(\dot{q} - pr)] + 2/3(3\tilde{B}_w L_z^2 + 3H_2^2 H_r - 3H_2 Z^2 + 3H_2 H_r^2 + H_r^3)(\dot{q} + pr) + 2B_w H_2(\dot{r} - pq)Z - 2B_w L_x(\dot{p} + qr)Z - C_2 [-g \sin \theta + \dot{u} - rv + qw + L_x(p^2 - r^2)]\} \quad ..(7)$$

Donde:

$$\tilde{B}_w = \frac{B_w}{R}, \quad C_1 = 2(H_r + \tilde{B}_w) \quad \text{e} \quad C_2 = L_z^2 - H_2^2 - Z^2 + 2L_z \tilde{B}_w.$$

El problema tanque/navío puede ser analizado tomando como referencia al problema de arfada, rolado y cabeceo del navío, resultando en un problema de cuatro grados de libertad. Además, despreciando el avance, derrape y guiñada; y considerando las ecuaciones no lineales propuestas por Neves, Merino, Rodríguez (2008), expresadas de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} & (m + Z_{\ddot{z}})\ddot{z} + Z_{\dot{z}}\dot{z} + Z_{\ddot{\theta}}\ddot{\theta} + Z_{\dot{\theta}}\dot{\theta} + Z_z z + Z_{\theta}\theta + \frac{1}{2}Z_{zz}z^2 + \frac{1}{2}Z_{\phi\phi}\phi^2 + \frac{1}{2}Z_{\theta\theta}\theta^2 + Z_{z\theta}z\theta + \\ & \frac{1}{6}Z_{zzz}z^3 + \frac{1}{2}Z_{zz\theta}z^2\theta + \frac{1}{2}Z_{\phi\phi z}\phi^2 z + \frac{1}{2}Z_{\phi\phi\theta}\phi^2\theta + \frac{1}{2}Z_{\theta\theta z}\theta^2 z + \frac{1}{6}Z_{\theta\theta\theta}\theta^3 + \\ & Z_{\zeta z}(t)z + Z_{\zeta\theta}(t)\theta + Z_{\zeta\ddot{z}}(t)\ddot{z} + Z_{\zeta z z}(t)z^2 + Z_{\zeta z\theta}(t)\theta + Z_{\zeta z\theta}(t)z\theta + Z_{\phi\phi\zeta}(t)\phi^2 + \\ & Z_{\theta\theta\zeta}(t)\theta^2 = Z_w(t) + Z_{ia} \end{aligned} \quad ..(8)$$

$$\begin{aligned}
 & (J_{xx} + K_{\phi})\ddot{\phi} + K_{\phi}\dot{\phi} + K_{\phi|\dot{\phi}}|\dot{\phi}| + K_{\phi}\phi + K_{z\phi}z\phi + K_{\phi\theta}\phi\theta + \\
 & \frac{1}{2}K_{zz\phi}z^2\phi + \frac{1}{6}K_{\phi\phi\phi}\phi^3 + \frac{1}{2}K_{\theta\theta\phi}\theta^2\phi + K_{z\phi\theta}z\phi\theta + \\
 & K_{z\phi}(t)\phi + K_{z\phi}(t)\phi + K_{z\phi}(t)z\phi + K_{z\phi\theta}(t)\phi\theta = K_w(t) + K_{ia}
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

Tabla con formato

$$(J_{yy} + M_{\delta})\ddot{\theta} + M_{\delta}\dot{\theta} + M_{zz}\ddot{z} + M_{zz}\dot{z} + M_{zz}z + M_{\theta}\theta + \frac{1}{2}M_{zz}z^2 + \frac{1}{2}M_{\phi\phi}\phi^2 + \frac{1}{2}M_{\theta\theta}\theta^2 + M_{z\theta}z\theta +$$

$$\frac{1}{6}M_{zzz}z^3 + \frac{1}{2}M_{zz\theta}z^2\theta + \frac{1}{2}M_{\phi\phi\phi}\phi^2z + \frac{1}{2}M_{\phi\phi\theta}\phi^2\theta + \frac{1}{2}M_{\theta\theta z}\theta^2z + \frac{1}{6}M_{\theta\theta\theta}\theta^3 +$$

$$M_{z\phi}(t)z + M_{z\phi}(t)\theta + M_{z\phi}(t)z + M_{z\phi}(t)z^2 + M_{z\phi}(t)\theta + M_{z\phi}(t)z\theta + M_{\phi\phi}(t)\phi^2 +$$

$$M_{\theta\theta}(t)\theta^2 = M_w(t) + M_{ia}$$

Eliminado: ..(10)

$$\begin{aligned}
 & T_{\ddot{\tau}}\ddot{\tau} + T_{\dot{\tau}}\dot{\tau} + T_{\phi}\ddot{\phi} + T_{z\tau}\ddot{z}\tau + T_{\theta\tau}\ddot{\theta}\tau + T_{\phi\theta}\sin\phi\cos\theta + T_{z\phi}\dot{z}\dot{\phi} + T_{\phi\theta}\dot{\phi}\dot{\theta} + \\
 & T_{\phi\phi\tau}\dot{\phi}^2\tau + T_{\theta\theta\tau}\dot{\theta}^2\tau + T_{\phi\theta\tau}\cos\phi\cos(\theta)\tau = 0
 \end{aligned}$$

Eliminado:  $(J_{yy} + M_{\delta})\ddot{\theta} + M_{\delta}\dot{\theta} +$

$$\frac{1}{6}M_{zzz}z^3 + \frac{1}{2}M_{zz\theta}z^2\theta +$$

$$M_{z\phi}(t)z + M_{z\phi}(t)\theta + M_{z\phi}(t)z +$$

$$M_{\theta\theta}(t)\theta^2 = M_w(t) + M_{ia}$$

Con formato: Fuente: Sin Negrita

Con formato: Centrado

Donde los coeficientes de la ecuación (11) son dados por:

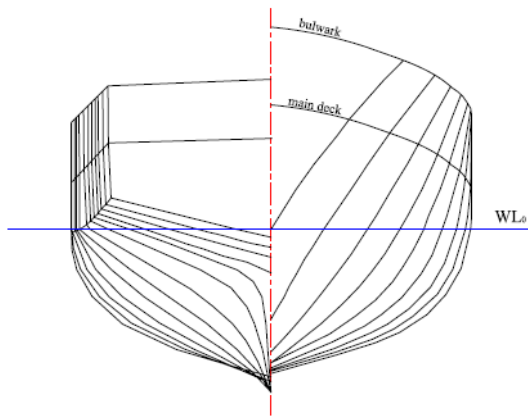
$T_z = fW_r \left( \frac{B_w}{H_d} + \frac{H_r}{W_r} \right)$	$T_{\ddot{\tau}} = fB_{\tau\tau}$
$T_{\dot{\tau}} = f(L_z + H_r)$	$T_{z\tau} = f$
$T_{z\phi} = -f$	$T_{\theta\tau} = -fL_x$
$T_{\phi\dot{\phi}} = fL_x$	$T_{\phi\phi\tau} = fH_2$
$T_{\theta\dot{\theta}\tau} = fH_2$	$T_{\phi\theta} = fg$

Siendo  $f = 2\rho_t A_r B_w^2$

Con formato: Fuente: Sin Negrita

## RESULTADOS

Con el objetivo de investigar la influencia del tanque estabilizador (Anti Rolling-Tank – ART) sobre el comportamiento del navío considerando un conjunto amplio de condiciones iniciales se realizan simulaciones numéricas sistemáticas del barco de pesca denominado TS, ver Figura 3. Esta embarcación pesquera, sin tanque, ha sido estudiada experimental y numéricamente en detalle por Neves et al.(2002), Neves y Rodríguez (2005,2006). Así mismo, Neves, Merino y Rodríguez (2009) realizaron diagramas de límites de estabilidad para la embarcación pesquera con y sin tanque estabilizador para un dado conjunto de condiciones iniciales y fueron estudiadas variaciones de los parámetros de los tanques: Dimensiones, masa de agua, nivel de amortiguamiento. Las dimensiones y características del tanque estabilizador son mostradas en la Figura 2.



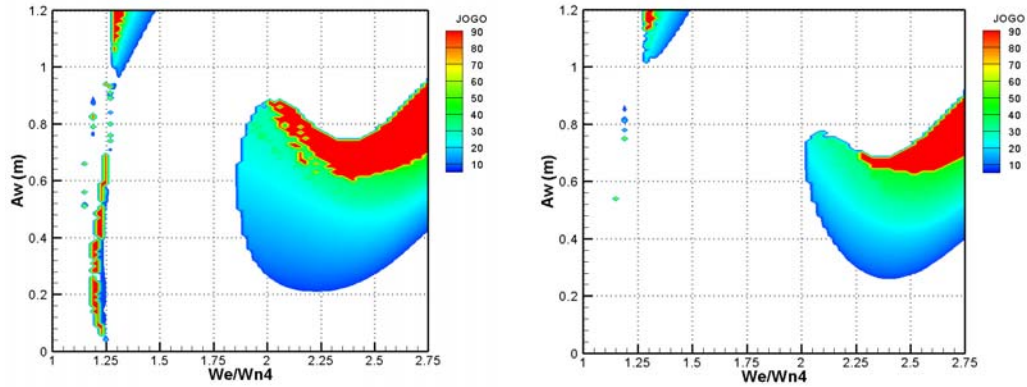
Denominación	Navío TS
Eslora Total	[m] 25.91
Eslora entre perpendiculares	[m] 22.09
Manga	[m] 6.86
Puntal	[m] 3.35
Calado	[m] 2.48
Desplazamiento	[Ton] 170.3
Radio de Giro Longitudinal	[m] 5.52

*Figura3. Características del navío TS*

La influencia en la amplificación de la amplitud del movimiento de roll paramétrico será analizada con respecto a la amplitud y la frecuencia de las ondas. Para un análisis más detallado de la influencia de estos parámetros construimos gráficos  $\omega_e / \omega_{n4}$  vs.  $A_w$  donde las amplitudes de rolo son representadas en función de colores de acuerdo a las leyendas indicadas. Los límites de sintonía y amplitud de ola fueron escogidos intentando no alcanzar valores de pendiente de quiebra de ola.

Código de campo

Con formato: Fuente: 11,5 pt, Disminuido 6 pto



Simulación Numérica

Navío TS: GM=0,37,Fn=0,3,ksi=180°,φo=0,8°

- Sin tanque Estabilizador -

Simulación Numérica

Navío TS: GM=0,37,Fn=0,3,ksi=180°, φo=0,8°

- Con tanque Estabilizador -

**Figura 4. Límites de estabilidad dinámica**

Cabe resaltar que estos límites de estabilidad son establecidos numéricamente para un único conjunto de condiciones iniciales (en este caso  $f_0=0,8$  deg para el rolido). Teniendo en cuenta que el fenómeno de resonancia paramétrica es un fenómeno intrínsecamente no lineal, éste es muy sensible a las condiciones iniciales del sistema por lo que se hace necesario un análisis mas exhaustivo y sistemático sobre la influencia de la variación de las condiciones iniciales en el roll paramétrico final del sistema.

Para hacer este análisis variando sistemáticamente condiciones iniciales se utilizan “cuencas de atracción”. Las cuencas de atracción son regiones de donde parten trayectorias que llevan a un determinado conjunto de valores máximos de amplitud de rolido en un tiempo igual a 600 segundos con una resolución de 120 x 80 condiciones iniciales espaciadas regularmente con un paso de 1° (un grado) tanto en amplitud como en velocidad de rolido. Estas cuencas de atracción son presentadas en las Figuras 5 y 6, en secuencias paralelas para una misma sintonía ( $\omega_e / \omega_{n4} = 2$ ) y una progresión creciente de amplitudes de onda para el navío TS (0,2m – 0,4m – 0,6m) sin tanque (Figura 5) y con tanque (Figura 6). Se llega a observar claramente en el caso del navío sin tanque estabilizador el crecimiento gradual del área de cuenca de atracción y de la amplitud del movimiento de rolido debido al aumento

**Código de campo**

**Con formato:** Fuente: 11,5 pt, Disminuido 6 pto

gradual de la amplitud de la ola (en torno a  $A_w$  entre 0,2m y 0,4m) de acuerdo a la escala de colores hasta que la erosión fractal predomina (alrededor de  $A_w=0,6m$ ) y el área de cuenca de atracción empieza a disminuir, según Neves y Vivanco (2008). Comparando éstas áreas con las recíprocas del navío con tanque estabilizador (Figura 6) se puede apreciar una disminución del área de no-zozobra para amplitudes de ola bajas; sin embargo se percibe que en el caso del navío sin tanque el área empieza a ser erosionada para amplitudes menores que en el caso del navío con tanque estabilizador.

Son presentadas también las llamadas *superficies de integridad* –curvas de integridad para un rango de frecuencias determinado- plotadas para sintonías ( $\omega_e / \omega_{n4}$ ) desde 1,6 hasta 3,2 para apreciar las diferencias entre sus tendencias. Todas las áreas son adimensionalizadas con respecto al área de la cuenca de atracción del decaimiento en roll del navío sin tanque, de acuerdo a:

$$\bar{A}(A_w) = \frac{A_s(A_w)}{A_0} \quad \dots(12)$$

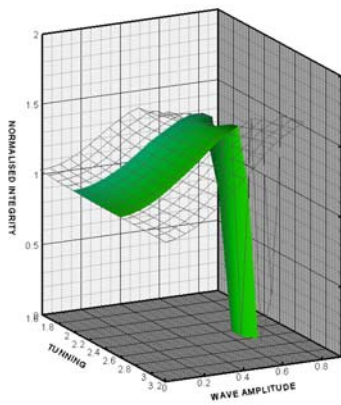
Donde  $A_s(A_w)$  define las áreas de cuencas de atracción y  $A_0$  define el área de cuenca de atracción para  $A_w=0,0m$

Con formato: Fuente: 11,5 pt, Disminuido 6 pto  
Código de campo

Eliminado: ¶

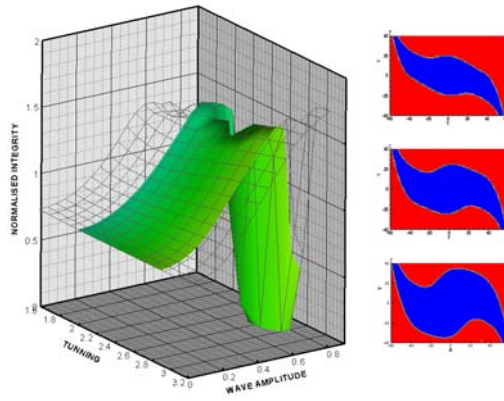
Con formato: Derecha

Eliminado: /



**Figura 5**  
**Superficie de integridad y cuencas de atracción**  
**sin tanque**

para  $\omega_e / \omega_{n4} = 2,03$  y  $A_w = 0,2, 0,4$  y  $0,6m$



**Figura 6**  
**Superficie de integridad y cuencas de atracción**  
**con tanque**

para  $\omega_e / \omega_{n4} = 2,03$  y  $A_w = 0,2, 0,4$  y  $0,6m$

En las superficies de integridad se refleja la reducción de área inicial de cuenca de atracción debido a la aplicación del tanque. Para amplitudes de onda próximas a cero la superficie de integridad sin tanque empieza alrededor del valor de 1.00 de área adimensionalizada para todas las frecuencias (Figura 5) mientras que en la superficie de integridad con tanque este mismo valor esta en torno de 0,7 de área adimensionalizada también para todas las frecuencias.

Eliminado: ¶

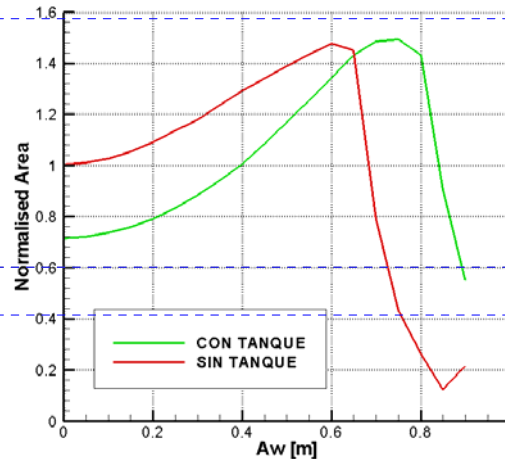
Otra característica interesante a resaltar en la superficie de integridad es que el área adimensionalizada empieza a caer dramáticamente -debido a la erosión fractal -con amplitudes de ola mayores cuando se activa el tanque estabilizador en todas las frecuencias. Puede apreciarse en la superficie de integridad del navío sin tanque que la caída de áreas empieza en torno de amplitudes de ola de 0,6m, mientras que las áreas en la superficie de integridad del navío con tanque la caída empieza alrededor de 0,7m.

Eliminado: ¶

Con formato: Justificado

Eliminado: <sp>

Estas dos características antes mencionadas son claramente percibidas si se comparan gráficos de área adimensionalizada para una sintonía específica. Se muestra en la Figura 7 esta comparación para una sintonía  $\omega_e / \omega_{n4} = 2,154$ . En este gráfico se aprecia el “corrimiento” de la gráfica hacia la derecha cuando el tanque es activado, representando el aumento de la amplitud de la ola luego de la cual el área de cuenca de atracción es predominada por la erosión fractal y cae dramáticamente (amplitud de ola crítica) de 0,6m para 0,8m. Al mismo tiempo, se percibe la disminución de área de cuenca de atracción en estas sintonías debido al efecto del tanque para amplitudes de onda hasta 0,65m, valor luego del cual las áreas de cuenca de atracción son mayores que las del navío sin tanque.



Código de campo

Con formato: Fuente: 11,5 pt, Disminuido 6 pts

Eliminado: 514

Figura 7

Curva de Integridad con y sin tanque para

$$\omega_e / \omega_{n4} = 2,154$$

De los gráficos de amplitud de ola crítica (Figura 8) se observa que se produce una variación positiva de la altura crítica con respecto a la obtenida sin la aplicación del tanque estabilizador para un rango de sintonías  $\omega_e / \omega_{n4}$  de 1,6 hasta 2,7. Para sintonías mayores no se aprecia ningún aumento de amplitud crítica.

Con formato: Fuente: 11,5 pt, Disminuido 6 pto

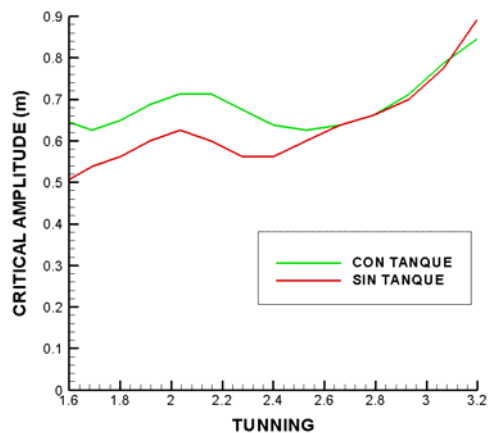


Figura 8. Amplitud crítica de ola con y sin tanque

Este aumento de amplitud crítica se considera beneficioso debido a que refleja el incremento de la rigidez del sistema y su mayor resistencia a la zozobra al mantenerse estable en amplitudes de onda mayores. Es importante recordar que el tanque de estudio es un tanque pasivo, es de esperar que con la introducción de dispositivos de control este aumento de amplitud crítica pueda ser aun mayor, así como ampliar el área de cuenca de atracción.

## CONCLUSIONES

Se presentó una metodología para analizar cuantitativamente las respuestas no lineales de los movimientos inestables del navío acoplados con el del agua dentro del tanque en olas de proa, para un conjunto amplio de condiciones iniciales de rolido. Fueron presentados los gráficos de superficie de estabilidad para el navío sin y con tanque estabilizador observándose principalmente una atenuación importante en la amplitud del rolido paramétrico, y a la vez una disminución en el área de cuenca de atracción debido al efecto del tanque. Fue mostrada también la gráfica de amplitud crítica en la que se constata un aumento de la amplitud de onda crítica al activar el tanque sobre todo en sintonías bajas como un efecto positivo en el control del rolido paramétrico. Este análisis incorpora la sensibilidad a un conjunto más amplio de condiciones iniciales del sistema y permite cuantificar, en términos de aumento de amplitud crítica y reducción de área de cuenca de atracción, el efecto del tanque estabilizador en el

control del rolido paramétrico. Considerando que el presente análisis llega a obtener valores cuantificables para el rango de seguridad de la embarcación, deberá ser de interés práctico para el desarrollo del proyecto de la embarcación. Estos aspectos deben ser examinados con más detalle en el futuro así como su relación con una variación sistemática de condiciones iniciales de otros grados de libertad; así como la introducción de sistemas de control activo del tanque y su influencia en la respuesta final del sistema.

### **Agradecimientos**

Las investigaciones descritas en el presente artículo han sido financiadas por el Consejo Nacional de Investigación de Brasil (CNPq), CAPES y LabOceano. Los Autores reconocen y agradecen sus auspicios.

### **Referencias**

- Lloyd, A.R.J.M., 1989 - Seakeeping: Ship Behavior in Rough Weather (Chapter 18). Ellis Horwood Limited, England.
- Neves, M. A. S. (Editor), 2006 – Proceedings, 9th International Conference on Stability of Ships and Ocean Vehicles – STAB 2009, Rio de Janeiro, Brasil
- Neves, M.A.S. and Belenky, V.L., 2008 - Review of 9<sup>th</sup> International Conference on Stability of Ships and Ocean Vehicles (STAB 2006). Marine Technology.
- Neves, M. A. S., Pérez, N., Lorca, O., 2002 – “Experimental Analysis on Parametric Resonance for Two Fishing Vessels in Head Seas”. Proceedings of 6th International Ship Stability Workshop, Webb Institute, New York.
- Neves, M. A. S., Rodríguez, C. A., 2004 - “Limits of Stability of Ships Subjected to Strong Parametric Excitation in Longitudinal Waves”. Proceedings of 2nd International Maritime Conference on Design for Safety, Sakay, Japan, pp. 139-145.
- Neves, M. A. S., Rodríguez, C. A., 2005, - “A Non-Linear Mathematical Model of Higher Order for Strong Parametric Resonance of the Roll Motion of Ships in Waves”, Marine Systems & Ocean Technology, vol. 1, no. 2.
- Neves, M.A.S. and Rodríguez, C., 2006, “On Unstable Ship Motions Resulting from Strong Non-linear Coupling”, Ocean Engineering, Vol. 33, pp. 1853-1883.

**Eliminado:** ¶  
Neves, M.A.S. and Rodríguez, C., 2007a, “Influence of Non-linearities on the Limits of Stability of Ships Rolling in Head Seas. Ocean Engineering, v 34, p.1618 – 1630.”

Neves, M.A.S. and Rodríguez, C., 2007b, “An Investigation on Parametric Resonance in Regular Waves”, International Shipbuilding Progress, Vol. 54, pp. 207-225.

**Con formato:** Inglés (Estados Unidos), Resaltar

**Con formato:** Resaltar

Neves, M. A. S., Vivanco, J. E. M., 2008 – “Análise da Dinâmica Não-Linear no Balanço Paramétrico de Uma Embarcação Pesqueira”, SOBENA 2008, Rio de Janeiro, Brasil

[Neves](#), M. A. S., Jorge A. Merino, Claudio A. Rodríguez , 2009 – “A Nonlinear Model of Parametric Rolling Stabilization by Anti-roll Tanks”, Ocean Engineering (accepted for publication), doi: 10.1016/j.oceaneng.2009.07.005.

Neves, M. A. S., Claudio A. Rodríguez, Jerver E. M. Vivanco, 2009 - “On the Limits of Stability of Ships Rolling in Head Seas”, Journal of Engineering for the Maritime Environment, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M, U.K. (accepted for publication).

Rodríguez, C.A., Holden, C., Perez, T., Drummen, I., Neves, M.A.S., Fossen, T.I., 2007 - Validation of a Container Ship Model for Parametric Rolling. Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Ship Stability Workshop, Hamburg, Germany.

Umeda, N., Hashimoto, H., Minegaki, S., Matsuda, A., 2007 - Preventing Parametric Roll With Use of Devices and Their Practical Impact. Proceedings, PRADS 2007 International Conference, Houston, USA, pp. 693-698.