

**ESCUELA DE GRADUADOS EN INGENIERÍA PORTUARIA**

**CÁTEDRA**

**DISEÑO DE VÍAS NAVEGABLES**

**PROFESOR TITULAR**

**INGENIERO RAÚL S. ESCALANTE**

**TEMA 12**

**INCIDENCIA DE LOS MOVIMIENTOS VERTICALES DEL BUQUE EN  
LA DETERMINACIÓN DE LA PROFUNDIDAD DEL CANAL**

**OCTUBRE 2010**

## ÍNDICE

12.	MOVIMIENTOS VERTICALES DEL BUQUE .....	4
12.1	CONSIDERACIONES GENERALES.....	4
12.2	EFFECTOS DEL OLEAJE.....	5
12.3	PERIODOS PROPIOS DE OSCILACIÓN DE LOS BUQUES.....	8
12.4	FRECUENCIA DE ENCUENTRO .....	8
12.5	RECOMENDACIÓN DE PIANC .....	8
12.6	RAO – RESPONSE AMPLITUDE OPERATOR – OPERADOR DE AMPLITUD DE RESPUESTA.....	9
12.7	NORMA ROM .....	13
12.7.1	<u>Comparación de resultados RAO – Norma ROM</u> .....	15
12.8	<u>EM 1610-2-1613 HYDRAULIC DESIGN OF DEEP DRAFT NAVIGATION CHANNELS</u> <u>17</u>	
12.8.1	<u>Comparación método de Kimon vs RAO</u> .....	26
12.9	MÉTODO JAPONÉS.....	26
	<u>Indicar Referencia y mencionar el WG49</u> .....	26
12.9.1	<u>Cálculo del hundimiento de la proa <math>d_2</math> debido a la combinación de heaving + pitching</u> <u>28</u>	
12.9.1.1	<u>Caso 1: Eslora del buque mucho mayor que la longitud de onda</u> .....	28
12.9.1.2	<u>Caso 2</u> .....	29
12.9.1.3	<u>Caso 3</u> .....	29
12.9.2	<u>Bilge keel sink debido a la combinación de heaving mas rolling</u> .....	30
12.9.2.1	<u>Caso 1</u> .....	30
12.9.2.2	<u>Caso 2</u> .....	31
12.9.2.3	<u>Caso 3</u> .....	31
12.9.3	<u>Ejemplos</u> .....	33
12.9.3.1	<u>Ejemplo 1: Incidencia del oleaje a 30°</u> .....	33
12.9.3.2	<u>Ejemplo 2: Incidencia del oleaje a 60°</u> .....	34
12.9.3.3	<u>Ejemplo 3: Incidencia del oleaje a 90°</u> .....	35
12.9.3.4	<u>Ejemplo 4: Incidencia del oleaje a 120°</u> .....	36
12.9.3.5	<u>Ejemplo 5: Incidencia del oleaje a 150°</u> .....	36
12.10	MODELO CADET .....	37
12.11	<u>MEDICIÓN DE LOS MOVIMIENTOS VERTICALES DEL BUQUE</u> .....	37
12.12	<u>EFFECTOS DE CADA MOVIMIENTO DEL BUQUE SOBRE DIFERENTES ACTIVIDADES PORTUARIAS</u> .....	40
12.13	<u>OBSERVACIONES</u> .....	41
12.14	<u>BIBLIOGRAFÍA</u> .....	41

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 12.1 – Componentes de la revancha bajo quilla (de Ref. 9) .....	4
Figura 12.2 – Movimientos del buque .....	5
Figura 12.3 – Movimientos del buque .....	6
Figura 12.4 – Procesos físicos que afectan el comportamiento del buque .....	7
Figura 12.5 Función de Transferencia (RAO).....	10
Figura 12.6 - Espectros de ola y de movimientos del buque .....	12
Figura 12.7 – Ejemplo de RAO .....	13
Figura 12.8 – Método de Kimon – Ángulo de incidencia 0° .....	20
Figura 12.9 – Método de Kimon – Ángulo de incidencia 45° .....	20
Figura 12.10 – Método de Kimon – Ángulo de incidencia 90° .....	21
Figura 12.11 – Método de Kimon – Ángulo de incidencia 135° .....	21
Figura 12.12 – Método de Kimon – Ángulo de incidencia 180° .....	22
Figura 12.13 – Método de Kimon – Ajuste por desplazamiento .....	23
Figura 12.14 – Método de Kimon – Ajuste por desplazamiento .....	24
Figura 12.15 – Método de Kimon – Ajuste por longitud del canal.....	25
Figura 12.16 – Método de Kimon – Determinación del período de encuentro .....	26
Figura 12.17 – Método Japonés – Angulo de incidencia del oleaje.....	27
Figura 12.18 – Método Japonés – Definiciones .....	28
Figura 12.19 - Caso 1: $L_{pp} \gg \lambda$ .....	28
Figura 12.20 – Método Japonés - Caso 2: $L_{pp} \ll \lambda$ .....	29
Figura 12.21 – Método Japonés - Caso 3: $L_{pp} = \lambda$ .....	29
Figura 12.22 - : RAO's of bow sinkage Z2 (D2) for a cargo ship due to heave and pitch (VLCC Study Group).....	30
Figura 12.23 – Método Japonés - Caso 1: $B \gg \lambda$ .....	31
Figura 12.24 – Método Japonés - Caso 2: $B \ll \lambda$ .....	31
Figura 12.25: Bilge keel amidships sinkage due to heave and roll (MILT 2007). .....	32
Figura 12.26.1 – Ejemplo 1 - Croquis.....	33
Figura 12.26.2 – Ejemplo 1 - Resultados .....	34
Figura 12.27.1 – Ejemplo 2 - Croquis.....	34
Figura 12.27.2 – Ejemplo 2 - Resultados .....	35
Figura 12.28.1 – Ejemplo 3 - Croquis.....	35
Figura 12.28.2 – Ejemplo 3 - Resultados .....	35
Figura 12.29.1 – Ejemplo 4 - Croquis.....	36
Figura 12.29.2 – Ejemplo 4 - Resultados .....	36
Figura 12.30.1 – Ejemplo 5 - Croquis.....	37
Figura 12.30.2 – Ejemplo 5 - Resultados .....	37
Figura 12.31- Squat y oscilaciones verticales .....	39
Figura 12.32 – Movimiento vertical total.....	39

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 12.1 – Valores h/T sugeridos por PIANC.....	9
Tabla 12.2 (Reproducción de la Tabla 7.1 de la norma ROM) .....	14
Tabla 12.3 – Comparación ROM - RAO.....	16
Tabla 12.4 Valores usuales de $C_B$ (MILT 2007) .....	27
Tabla 12.5 - Metacentric height estimates GM for range of ship types. ....	32
Tabla Nro. 12.6.- Determinación de la revancha bajo quilla .....	40
Tabla Nro. 12.7 - Relación h/d .....	40

## TEMA 12

# INCIDENCIA DE LOS MOVIMIENTOS VERTICALES DEL BUQUE EN LA DETERMINACIÓN DE LA PROFUNDIDAD DEL CANAL

## 12. MOVIMIENTOS VERTICALES DEL BUQUE

### 12.1 CONSIDERACIONES GENERALES

A los efectos de determinar la profundidad de un canal de navegación deben tenerse en cuenta una serie de factores tal como se ha desarrollado anteriormente. Entre estos factores puede mencionarse el espacio que hay que prever para acomodar los movimientos verticales del buque producidos por el oleaje incidente como se indica esquemáticamente en la Figura 12.1

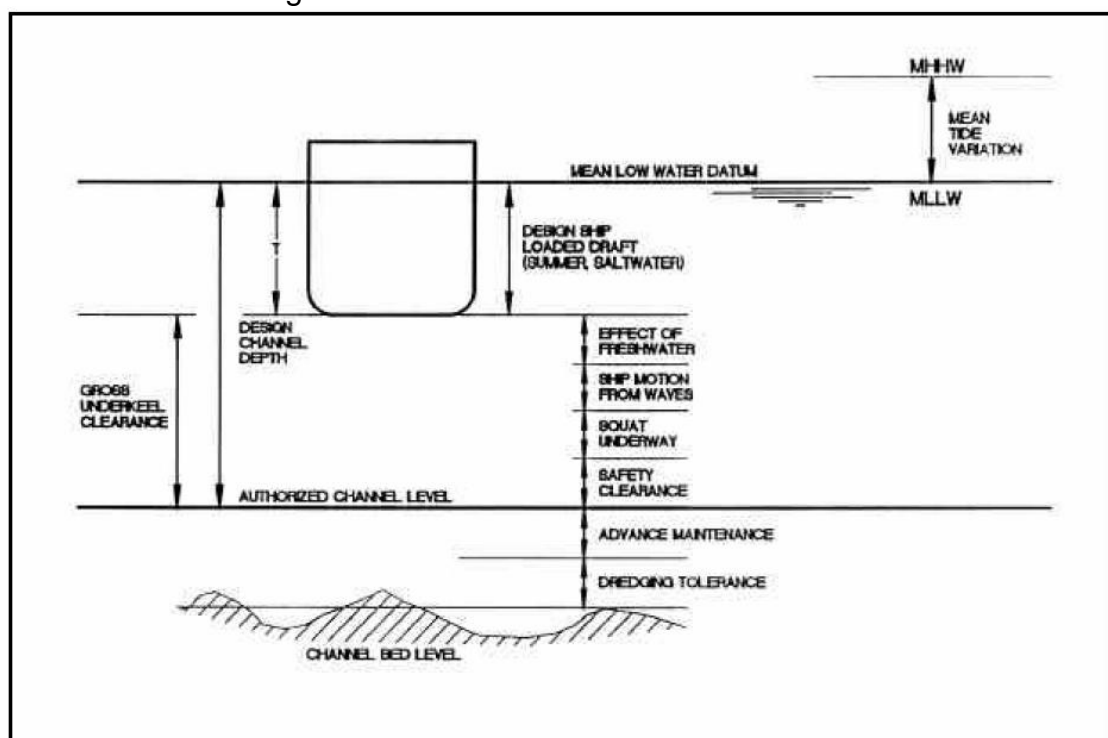


Figure 1. Underkeel clearance allowances

Figura 12.1 – Componentes de la revancha bajo quilla (de Ref. 9)

## 12.2 EFECTOS DEL OLAJE

En general, los efectos del oleaje tendrán mayor importancia en el diseño de la parte exterior del canal de acceso que esté sujeto a la incidencia del oleaje de mar abierto de mayor intensidad

El buque flotando en agua en reposo toma una posición de equilibrio con respecto a la línea de flotación. Es muy difícil que se encuentre totalmente nivelado, sino que es probable que se encuentre aporado o a veces aporado. Este hundimiento estático se denomina asiento (trim). Cuando el buque navega en aguas calmas se produce un hundimiento dinámico denominado asentamiento (squat), tema que se analizará en detenimiento más adelante.

Cuando el buque está en aguas con influencia del oleaje responde a esa excitación como si fuera un péndulo con 6 grados de libertad.

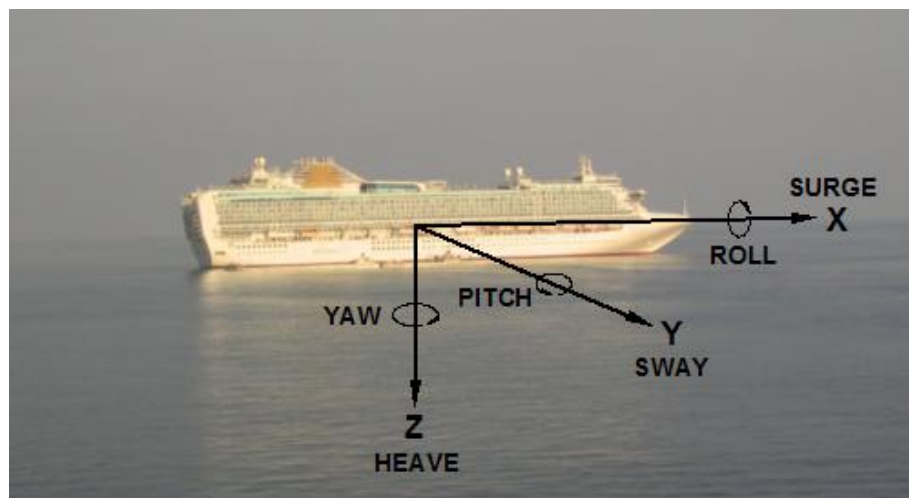


Figura 12.2 – Movimientos del buque

Los movimientos que puede tener un buque se presentan en la Figura 12.2. Estos movimientos son seis: tres desplazamientos y tres rotaciones.

Tres movimientos son en el plano vertical:

- Ascenso y descenso (heave)
- Rolido (roll)
- Cabeceo (pitch)

y tres movimientos en el plano horizontal:

- Vaivén (surge)
- Deriva (sway)
- Guiñada (yaw)

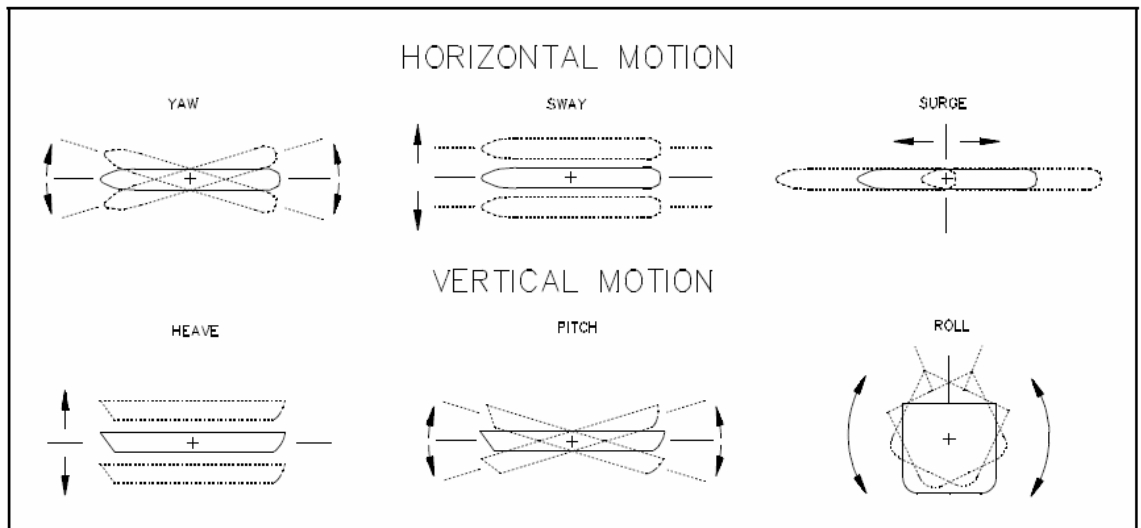


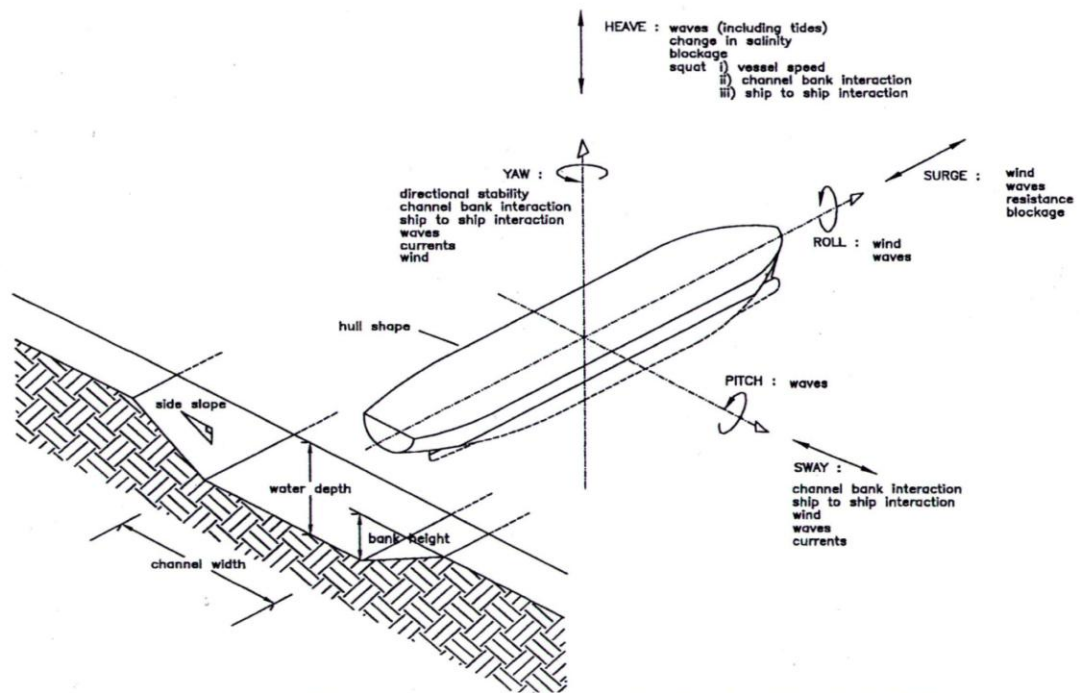
Figure 11. Six degrees of freedom for vessel subject to wave motion

*Figura 12.3 – Movimientos del buque*

La magnitud de los movimientos verticales de un buque navegando en un canal de acceso es función de numerosos factores entre los cuales se puede mencionar:

- las características del buque: eslora, manga, calado, DWT
- los periodos propios de oscilación del buque: rolido, cabeceo y ascenso y descenso
- la velocidad del buque relativa a la celeridad de la ola (frecuencia de encuentro)
- Velocidad del buque y sentido de navegación
- la relación profundidad de agua/calado (relación  $h/T$ )
- las características del oleaje (altura, periodo, longitud de onda y dirección relativa)
- la duración del encuentro entre buque y oleaje
- las condiciones de corrientes creciente o bajante
- estrategia de los prácticos al navegar

Los procesos físicos que afectan el comportamiento del buque se indican en la Figura 12.3 dentro de los cuales el oleaje cumple una función fundamental.



**Physical processes which affect ship behaviour**

*Figura 12.4 – Procesos físicos que afectan el comportamiento del buque*

La respuesta de un buque en movimiento al oleaje incidente es función de la frecuencia de encuentro, de la relación entre la longitud de onda del oleaje y la eslora del buque, la dirección relativa de incidencia del oleaje, y de la masa del buque.

La respuesta de buques grandes a olas es despreciable en los siguientes casos:

- Longitudes de onda pequeñas
- Alta frecuencia de encuentro con alturas pequeñas

.Los efectos del oleaje sobre buques típicos tienden a aumentar a medida que aumenta la altura de ola y a disminuir a medida que aumenta la eslora del buque. La respuesta máxima se produce cuando se presentan longitudes de onda iguales o casi iguales a la eslora del buque. Buques típicos tienen respuestas muy pequeñas a olas con periodos menores a 6 segundos dado que los periodos propios de oscilación de los buques son mucho mayores.

En general, a medida que la longitud de onda aumenta y la frecuencia de encuentro disminuye, el movimiento vertical del buque aumenta. Con ondas muy largas, o cuando el buque navega a una velocidad similar a la de las olas, los movimientos del buque tienden al valor de la altura de ola. Además, si el buque encuentra olas con una frecuencia cercana a alguno de los periodos propios de oscilación del buque, la respuesta del buque se incrementa. Esta respuesta es muy sensible al ángulo de aproximación del oleaje y a la frecuencia de encuentro.

En situaciones donde la revancha bajo quilla es muy pequeña, la respuesta vertical tiende a ser pequeña. Esto sucede a medida que el espacio entre quilla y fondo se hace pequeña y los efectos viscosos devienen cada vez mas importantes. Con revanchas bajo quilla muy pequeñas hay una disipación de energía muy significativa a medida que el agua escapa del espacio intermedio, lo que resulta en una atenuación de la respuesta.

De los tres modos de oscilación vertical, rolo (rolling), cabeceo (pitching) y ascenso y descenso (heaving) los dos últimos son movimientos amortiguados, pero no lo es el rolo que es muy sensible a la resonancia.

El cabeceo y el ascenso descenso son importantes cuando un buque está navegando un canal con el oleaje propagándose en el sentido del eje del canal.

Un buque navegando con olas fuertes de través, con periodos de ola cercanos al periodo propio de rolo puede desarrollar ángulos de rolo muy importantes que lo hagan perder el control del timón y eventualmente naufragar (capsize)

En aguas profundas el periodo natural de rolo de un buque mercante está entre 10 seg y 17 seg. En olas de viento con periodos entre 6 seg. Y 10 seg. el rolo no presenta problemas. Sin embargo, el periodo aparente  $T_a$  aumenta si las olas vienen por la popa y el rolo puede tornarse crítico (Si las olas vienen por la proa el periodo aparente disminuye) Un artículo muy interesante donde se analiza el efecto del rolo del buque es el de Vlemmix (Ref. 13)

La estrategia que siguen los prácticos al enfrentarse con condiciones de oleaje también es importante, por ejemplo, reduciendo la velocidad de navegación puede llegar a reducir la respuesta del buque. También un cambio de curso puede modificar la dirección relativa del oleaje y con ello la respuesta del buque. Es claro que en canales de navegación dragados no es usualmente posible cambiar el rumbo de la navegación.

La predicción de la respuesta de los buques al oleaje es un problema importante pero sin una solución fácil. Se pueden utilizar modelos físicos para realizar esta predicción de los movimientos del buque frente a olas monocromáticas pero en ese caso la escala de los modelos de los buques tiene que estar adecuadamente elegida, así como la construcción de los mismos, su instrumentación y calibración. También se han utilizado en algunos casos generadores de ola que representan el espectro del oleaje. Asimismo se han realizado pocas mediciones en prototipo en condiciones de aguas poco profundas. Esta falta de datos hace que sea difícil verificar los modelos teóricos que se proponen para resolver esta problemática

### 12.3 PERIODOS PROPIOS DE OSCILACIÓN DE LOS BUQUES

### 12.4 FRECUENCIA DE ENCUENTRO

### 12.5 RECOMENDACIÓN DE PIANC

Como primera aproximación para determinar el espacio a dejar en la profundidad para permitir el movimiento del buque debido al oleaje se puede utilizar la recomendación de PIANC en su Manual de Diseño de Canales WG 37 (1997). En ese documento PIANC establece que "In the absence of other information minimum values of depth/draught ratio should be taken as 1.10 in sheltered waters, 1.3 in waves up to one metre in height and 1.5 in higher waves with unfavourable periods and directions".

Por otra parte PIANC WG 49 (2010) recomienda los valores indicados en la Tabla 12.xxx sugeridos en función de la intensidad del oleaje.

Tabla 12.1 – Valores  $h/T$  sugeridos por PIANC

Description	Vessel Speed	Wave Conditions	Outer Channel	Inner Channel
<b>Ship Factors <math>F_s</math></b>				
Depth $h$	$\leq 10$ kts	None		1.10 $T$
	10-15 kts			1.12 $T$
	$>15$ kts			1.15 $T$
	All	Low	1.15 $T$ to 1.2 $T$	
	All	Moderate swell	1.3 $T$	
	All	Heavy swell	1.4 $T$	
Notes:				
1. For Ship Factors: Assumes $T > 10$ m. If $T < 10$ m, use UKC value for $T=10$ m.				
2. Swell means waves with peak periods greater than 10 s.				

De acuerdo a esta recomendación vemos que a la influencia del oleaje se le asigna hasta 0,30 T siendo T el calado del buque

## 12.6 RAO – RESPONSE AMPLITUDE OPERATOR – OPERADOR DE AMPLITUD DE RESPUESTA

A los efectos de determinar los movimientos verticales de un punto arbitrario del casco se deben considerar los efectos acumulativos de los movimientos de ascenso y descenso (heave), cabeceo (pitch) y rolido (roll). A causa de las diferencias de fase entre los diferentes movimientos verticales no necesariamente deben sumarse en forma lineal. El sistema puede ser descrito matemáticamente como un sistema masa-resorte con 6 grados de libertad. En el buque flotando libremente las fuerzas hidrostáticas actúan de resorte (si un buque se hunde por la proa el exceso de flotabilidad actúa como un resorte). En el caso de buques amarrados, las amarras y defensas actúan como resortes adicionales.

En arquitectura naval la amplitud del movimiento (o respuesta) del buque para cada movimiento (rolido, cabeceo, etc) usualmente se normaliza (se divide) por la altura de la ola incidente y se denomina RAO – Response Amplitude Operator – Operador de Amplitud de Respuesta o Función de Transferencia. Esa transferencia tiene una amplitud y un desfase. El correspondiente ángulo de fase del RAO se toma con respecto a la cresta de una ola incidente en el centro de gravedad del buque. Los RAOs en el plano vertical contribuyen a la revancha bajo quilla determinando los requerimientos de profundidad a causa del oleaje. Los RAOs horizontales se relacionan con la maniobrabilidad del buque, determinando requerimientos para el ancho del canal.

El USACE establece que: “ El ascenso y descenso (heave) máximo de un buque por causa de olas con longitudes de onda el doble de la eslora del buque es aproximadamente un quinto de la altura de ola; los valores máximos de cabeceo (pitch) y rolido (roll) son la mitad de la altura de ola. El margen de profundidad neto por olas es 1.2 H (siendo H la altura de ola)”

Sin duda son valores muy conservadores. Si hacemos el cálculo esto da:

$$0,2 H (\text{heave}) + 0,5 H (\text{pitch}) + 0,5 H (\text{roll}) + 1,2 H (\text{Net UKC}) = 2,4 H$$

El texto que justifica adoptar estos valores dice: “The wave allowance is more difficult to estimate. A simplistic estimate of the wave-induced vertical excursion is 1.2 times the wave height for a ship that is half a wavelength long and half a wavelength wide. This total allowance is composed of 50% of the wave height in pitch, 50% in roll, and 20% (i.e., the centroid of half a sine wave) in heave. Thus, for a 3-m wave, an allowance of 3.6 m would be required. Of course, this is somewhat unrealistic since even in multidirectional seas it is unlikely that wave components that are twice the ship length and beam would occur simultaneously”. U.S. Army Corps of Engineers, 1996. Hydraulic Design of Deep Draft Navigation Projects, Engineer Manual EM 1110-2-1613, Washington, DC.

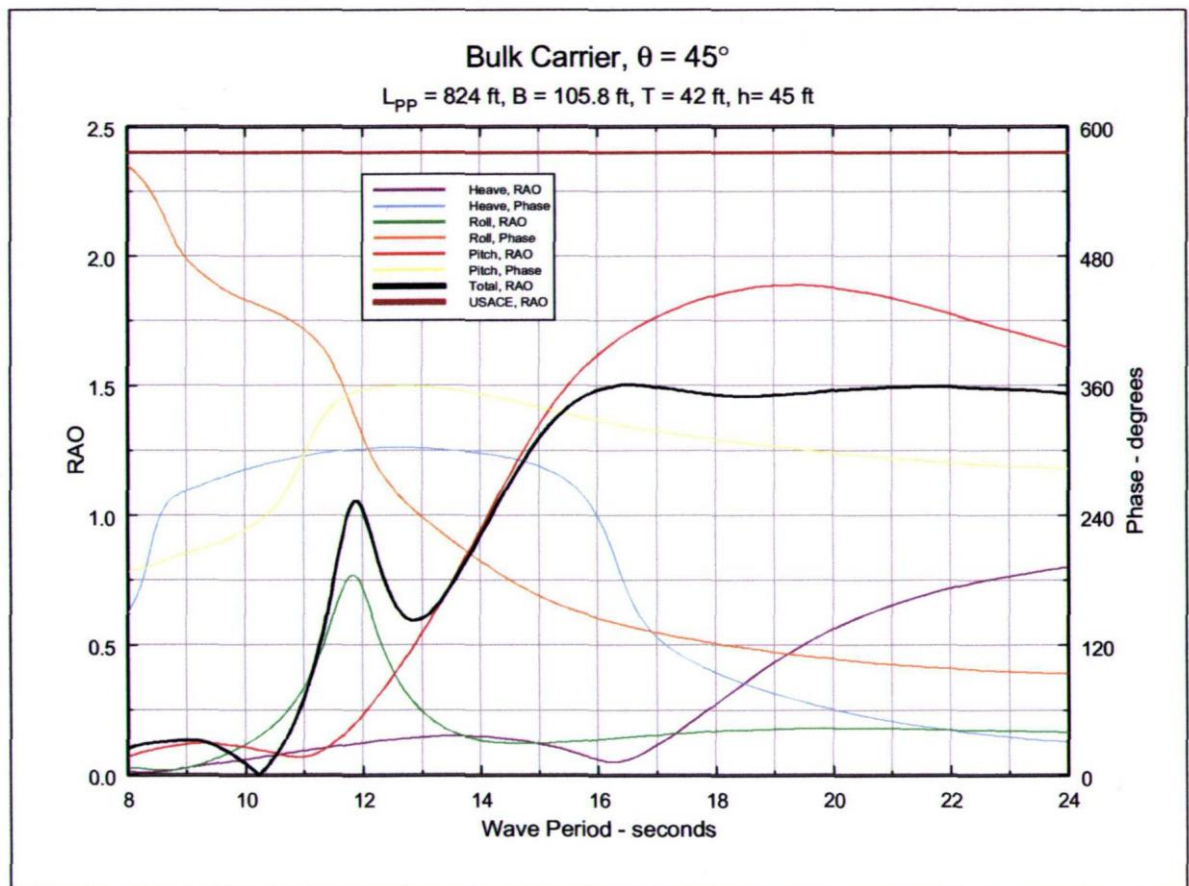


Figure 3. Excursion RAO curves and USACE guidance for bulk carrier

*Figura 12.5 Función de Transferencia (RAO)*

Los RAOs son muy dependientes de la altura, periodo y dirección del oleaje y también de la frecuencia relativa de encuentro entre las olas y el buque. Por eso es diferente si el oleaje viene por la proa o por la popa.

El ejemplo presentado en la Figura 12.4 muestra una RAO para una ola incidente a  $45^\circ$  y con 3 pies de revancha bajo quilla. Se muestran las RAOs para ascenso y descenso (heave), rolido (roll) y cabeceo (pitch) y las correspondientes fases. La RAO para cada grado de libertad representa la excursión máxima del fondo del casco para una ola de amplitud unitaria, indicando el grado en que cada grado de libertad contribuye a la excursión total. La RAO total (combinando las RAO individuales y las relaciones de fase) muestra que se produce una amplificación máxima de 1,5 veces la altura de ola incidente

para periodos de 16 a 24 segundos. La USACE da un factor de amplificación de 2,4 veces para todos los periodos. Si lo miramos como altura de ola limitante en un caso corresponderían 4ft contra 2,5 ft. en el otro.

La Figura 12.5 (tomada de Ref. 10) es un ejemplo de una función RAO para los efectos de rolido (roll), ascenso y descenso (heave), y cabeceo (pitch) combinadas. Multiplicando los valores del espectro de olas con  $(RAO)^2$  se obtiene el espectro de movimiento. A pesar de que el espectro de olas presenta un pico en  $T=7$  seg (0,14 Hz) virtualmente no se detecta ninguna respuesta del buque dado que esa frecuencia es mucho más alta que las frecuencias naturales del buque. El pico del espectro de olas en  $T=16-17$  seg. (0,06 Hz) si produce resonancia, a pesar de que la RAO no está a su máximo valor. Es claro que la amplitud de los movimientos del buque pueden aumentar rápidamente para periodos de ola por encima de los 17 seg.

Si observamos la abscisa de la Figura 12.5 vemos que representa la frecuencia de encuentro,  $f_a$ , que corresponde a la frecuencia aparente del oleaje visto desde el buque navegando a velocidad  $V_s$

La frecuencia aparente puede determinarse como

$$f_a = \frac{c_a}{c} f = \frac{c + v_s}{c} f$$

donde  $c_a$  y  $c$  son las celeridades aparente y real del oleaje y  $v_s$  es la velocidad del buque.

Para las olas viniendo por la proa la  $f_a$  aumenta y para olas viniendo por la popa  $f_a$  disminuye. Vemos en la figura que para  $f_a$  pequeños es donde se producen los mayores movimientos.

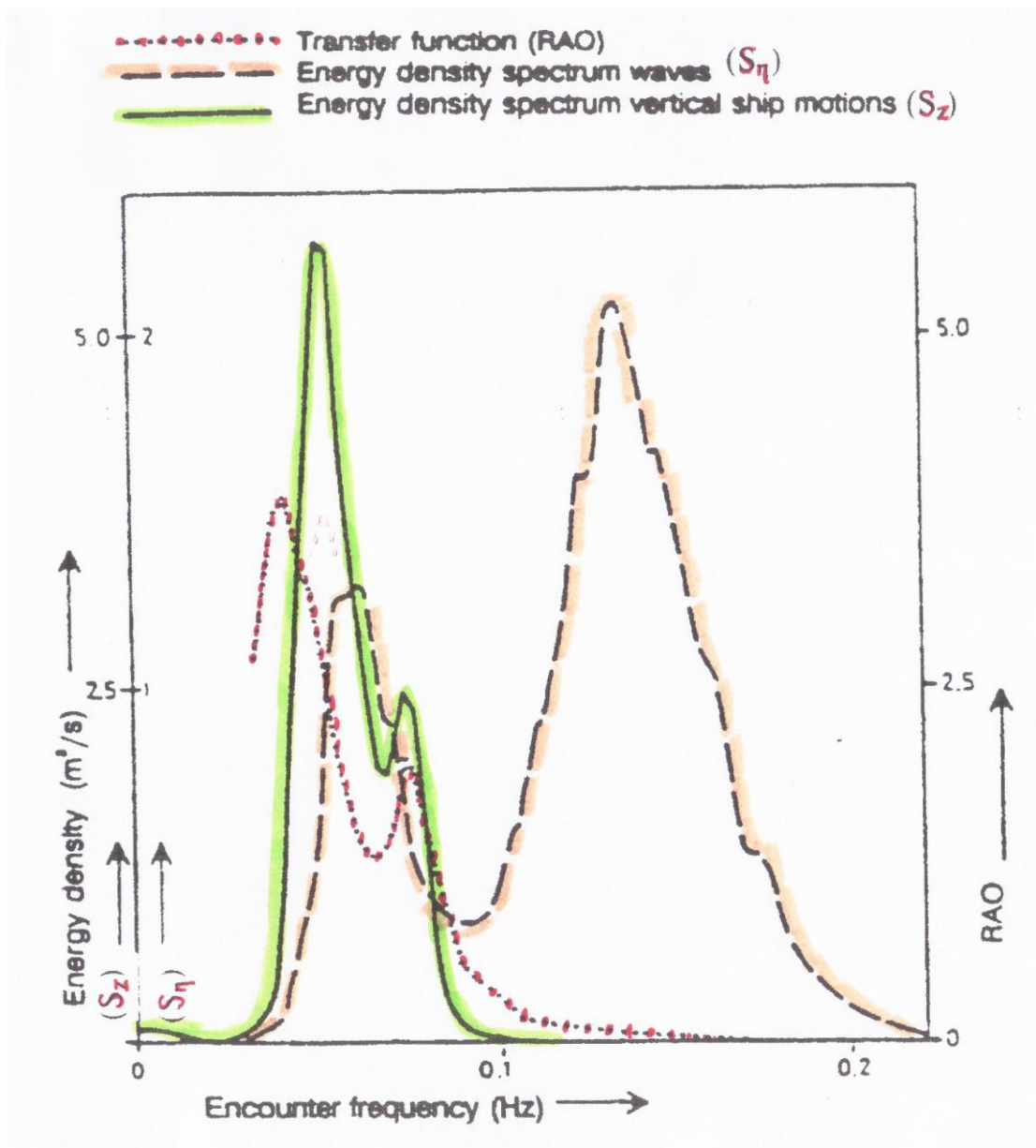


Figura 12.6 - Espectros de ola y de movimientos del buque

La Ref. 12.6 presenta un ejemplo interesante de curvas RAO. La respuesta natural de un buque se puede mostrar gráficamente. Un modelo numérico genera las curvas RAO para un buque con un determinado calado y profundidad de agua. Se reproduce la Figura 12 de Ref. 12 donde las curvas RAO indican el movimiento de respuesta tanto de traslación como de rotación de un buque estacionario frente a olas de diferentes períodos. La dirección del oleaje incidente varía para cada movimiento pero las direcciones han sido elegidas a los efectos de producir traslaciones o rotaciones máximas

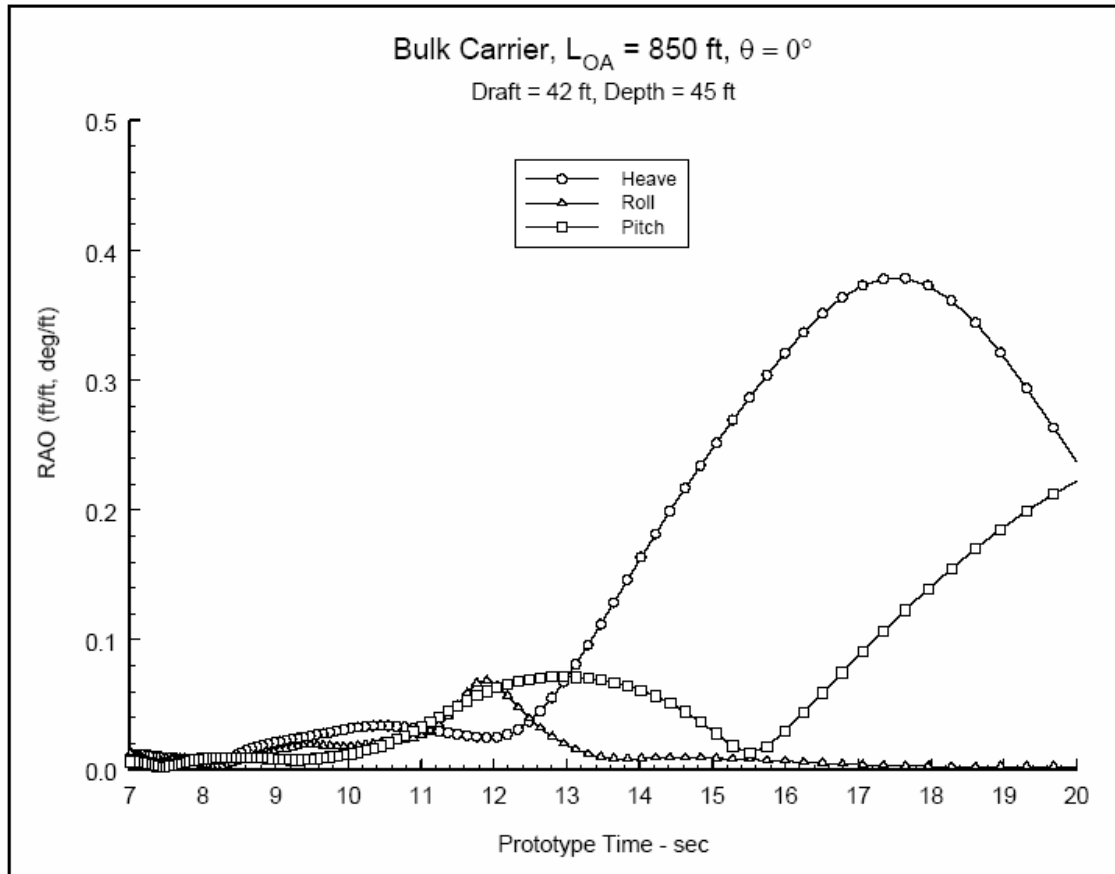


Figure 12. Response amplitude operators for 12.8-m (42-ft) vessel draft in 13.7-m (45-ft) water depth

*Figura 12.7 – Ejemplo de RAO*

El eje x muestra el periodo de respuesta del buque mientras que el eje y tiene dos unidades. Para los movimientos de rotación (rolido y cabeceo) las unidades son grados/pie (degrees/feet) y para el movimiento de traslación (heave) las unidades son pie/pie (feet/feet). O sea que los valores en el eje “y” muestran los grados de rotación del buque por cada pie de altura de ola incidente para los movimientos de rotación o la distancia de excursión vertical medida en pies por cada pie de altura de ola incidente para el movimiento de traslación

## 12.7 NORMA ROM

La norma ROM 3.1.99 (Ref.11) propone un método simplificado para la determinación de la reserva de espacio para movimientos producido por el oleaje.

En la Tabla 7.1 de la norma propone valores para el desplazamiento vertical en función de la eslora del buque y de la altura de ola incidente. Dado que los valores de altura de ola incidente corresponden a la altura significativa sugiere un factor de mayoración para

determinar los valores máximos y factores de corrección a aplicar de acuerdo a cada caso particular que se analice.

El procedimiento recomendado supone en primera aproximación que el espectro de los movimientos verticales del buque es proporcional al espectro del oleaje. El tipo de relación que existe entre espectros de ola y de movimientos puede observarse en la Figura 12.5, lo que da una idea de la simplificación efectuada por la norma.

Tabla 12.2 (Reproducción de la Tabla 7.1 de la norma ROM)

Eslora del buque Lpp (m)	Altura de ola (m)							
	0,50	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00
	Desplazamiento vertical (m)							
75	0,10	0,17	0,34	0,58	0,76	1,02	1,30	1,58
100	0,05	0,14	0,28	0,46	0,65	0,87	1,12	1,36
150	0,00	0,09	0,20	0,34	0,51	0,69	0,87	1,08
200	0,00	0,05	0,15	0,26	0,40	0,57	0,72	0,92
250	0,00	0,03	0,10	0,21	0,33	0,48	0,63	0,80
300	0,00	0,00	0,07	0,16	0,25	0,39	0,56	0,68
400	0,00	0,00	0,04	0,11	0,18	0,31	0,51	0,58

#### Notas a la Tabla 12.1

1. La altura de ola a la que se refiere este cuadro es la altura significativa  $H_s$  del estado del mar. El movimiento vertical del buque que se obtiene es también el «significativo». El movimiento vertical máximo podrá determinarse suponiendo que el factor de correlación con la altura de ola es constante y que, por tanto, el espectro de movimientos del buque es proporcional al espectro del oleaje. En este supuesto y para estudios determinísticos, se considerará que el movimiento vertical máximo del buque es el resultante de mayorar ( $k_1$ ) los valores de la Tabla por los factores siguientes:

Buque desplazándose: 2,00 -  $E_{max}$

Buque fondeado o amarrado: 2,35 -  $E_{max}$

siendo  $E_{max}$  el Riesgo máximo admisible definido en la Tabla 2.2. de la norma según las características del área y maniobra que se analiza. De la Tabla 2.2 de la norma ROM surge que el valor de  $E_{max}$  puede variar entre 0,50 para condiciones de bajo riesgo y 0,05 en el otro extremo.

2. Los valores de la Tabla están determinados para buques cargados (desplazamientos  $\geq 90\%$  del máximo), parados o con velocidades reducidas (número de Froude  $F_{nh} \leq 0,05$ ), situados en zonas con profundidad de agua  $\geq 1,50$  x calado del buque y con oleajes actuando longitudinalmente con el eje del buque ( $\pm 15\%$ ).

3. Para buques en carga parcial los coeficientes de la Tabla se multiplicarán por los factores siguientes ( $k_2$ ):

. Desplazamiento  $\geq 90\%$  del máximo: 1,00

. Desplazamiento = 70% del máximo: 1,10

. Desplazamiento  $\leq 50\%$  del máximo: 1,20

. Desplazamiento entre el 90% y el 70%: interpolación lineal entre 1,00 y 1,10

. Desplazamiento entre el 70% y el 50%: interpolación lineal entre 1,10 y 1,20

4. La corrección en función de la velocidad se determinará multiplicando los valores de la Tabla por los factores siguientes ( $k_3$ ):

• Número de Froude  $\leq 0,05$ : 1,00

- Número de Froude = 0,15: 1,25
- Número de Froude > 0,25: 1,35
- Número de Froude entre 0,05 y 0,15: Interpolación lineal entre 1,00 y 1,25
- Número de Froude entre 0,15 y 0,25: Interpolación lineal entre 1,25 y 1,35

5. La influencia de la profundidad se calculará multiplicando los valores de la Tabla por los factores siguientes (k4):

Relación profundidad de agua/calado del buque  $\geq 1,50$ : 1,00

.Relación profundidad de agua/calado del buque  $\leq 1,05$ : 1,10

.Relación de profundidad/calado entre 1,50 y 1,05: Interpolación lineal entre 1,00 y 1,10

6. La influencia de la dirección de incidencia del oleaje se determinará multiplicando los valores de la Tabla por los factores siguientes (k5):

. Angulo entre el eje longitudinal del buque y la dirección del oleaje  $\leq 15^\circ$ : 1,00

. Angulo entre el eje longitudinal del buque y la dirección del oleaje =  $35^\circ$ : 1,40

. Angulo entre el eje longitudinal del buque y la dirección del oleaje =  $90^\circ$ : 1,70

. Angulos comprendidos entre  $15^\circ$  y  $35^\circ$ : Interpolación lineal entre 1,00 y 1,40

. Angulos comprendidos entre  $35^\circ$  y  $90^\circ$ : Interpolación lineal entre 1,40 y 1,70

7. Para valores intermedios de la eslora del buque se interpolará linealmente entre intervalos.

8. En el supuesto de que intervengan varios factores de corrección se utilizará como multiplicador de los valores de la Tabla el producto de los diferentes factores individuales determinados según los criterios precedentes.

#### 12.7.1 Comparación de resultados RAO – Norma ROM

Se efectúa una comparación de los resultados que se obtienen de aplicar el método simplificado propuesto por la norma ROM con los obtenidos por la aplicación de la curva RAO que se presenta en la Figura 12.4

Los datos de la Figura 12.4 son:

Eslora del buque = 252 m

T = 42 pies

h = 45 pies = 13,7 m

h/T = 1,07

$\theta$  = 45 grados

De la Tabla 12.2, para

Lpp = 250 m

Hs = 3 m

se obtienen los valores de desplazamiento vertical que se indican en la Tabla 12.3

Tabla 12.3 – Comparación ROM - RAO

	Altura de ola (m)		
	1	2	3
Desplazamiento vertical (m)	0,03	0,21	0,48
Factor de corrección total	3,44	3,44	3,44
Desplazamiento vertical ajustado (m)	0,10	0,72	1,65
Desplazamiento vertical ajustado/Altura de ola	0,10	0,36	0,55
RAO - 11 seg	0,30	0,30	0,30
RAO - 12 seg	1,00	1,00	1,00
RAO - 13 seg	0,60	0,60	0,60
RAO - 14 seg	1,00	1,00	1,00
Recomendación USACE (todos los periodos) sin net UKC	1,20	1,20	1,20

Para considerar un caso equivalente se calculan los siguientes coeficientes

$$k_1 = 1,60$$

considerando “buque desplazándose” y un  $E_{max} = 0,40$

$$k_2 = 1,00$$

considerando Desplazamiento > 90 %

$$k_3 = 1,35$$

para  $F_{nh} = 0,43 > 0,25$

Para el cálculo del número de Froude se adoptó una velocidad de 10 nudos

$$k_4 = 1,10$$

para una relación  $h/T = 1,07$

$$k_5 = 1,45$$

para un ángulo de incidencia de 45 grados

La multiplicación de todos los coeficientes da

$$k_{total} = 3,44$$

por lo que el movimiento máximo total sería la multiplicación del coeficiente calculado por el desplazamiento vertical indicado.

Normalizando con la altura de ola elegida nos da un factor equivalente a la RAO que varía entre 0,10 y 0,65 para este ejemplo.

De la curva RAO de la Figura 12.4 se tomaron los valores indicados en la Tabla 12.2. Se tomaron periodos crecientes a partir de 11 segundos.

El método propuesto por la norma ROM no toma en cuenta el periodo de la ola (o la frecuencia de encuentro) por lo que resulta difícil comparar con la curva RAO.

Se observa que para el caso considerado la Norma ROM da un Factor de Transferencia diferente y creciente para cada altura de ola considerada, mientras que la curva RAO da un Factor de Transferencia para cada periodo de ola.

Si se considera la recomendación del USACE restándole la revancha bajo quilla neta se llega a un valor de 1,20 constante para todos los periodos que para este caso en particular es muy superior a los valores obtenidos por la norma ROM.

## 12.8 EM 1610-2-1613 HYDRAULIC DESIGN OF DEEP DRAFT NAVIGATION CHANNELS

En Mayo 2006 el USACE publicó la actualización del Engineer Manual (Ref. 16) que se refiere específicamente al diseño de canales de navegación. A pesar de los numerosos antecedentes sobre estudios realizados por institutos dependientes del USACE sobre movimientos verticales del buque, incluidas mediciones sobre modelos físicos, el Manual recomienda utilizar el método de Kimon publicado en 1982. Se presenta a continuación una descripción del método, los gráficos propuestos para su utilización y un ejemplo. Las referencias que se indican corresponden al EM citado.

El EM presenta un análisis de diferentes maneras de calcular el movimiento de buques por efecto del oleaje. En el apartado g. del análisis propone un Método Empírico para estimar movimientos verticales del buque por efecto del oleaje.

La empresa Exxon International publicó un informe denominado “Revancha bajo quilla en Puertos” (“Underkeel Clearance in Ports”) en 1982. En ese informe estaba incluido un procedimiento para estimar la revancha requerida por un buque tanque debido a los movimientos inducidos por el oleaje. Se estimó la respuesta de un buque tanque de 200.000 DWT cargado adrizado (even keel) ante olas en aguas poco profundas. Los resultados están basados en estudios sobre modelos físicos realizados en el Netherlands Ship Model Basin (NSMB) (Koele and Hooft 1969) e informados en PIANC (1975). La mayoría de los ensayos fueron realizados con velocidades del buque de 7 nudos. En base a ensayos sobre modelos realizados en SOGREAH (1973 a-c) y predicciones teóricas para un buque tanque de 21.000 DWT realizadas por NSMB (1980), Kimon (1982) (Ref. 17) extrapola las respuestas del buque tanque de 200.000 DWT. En las Figuras 6-7 a 6-11 se presenta las respuestas de los buques como RMS (root mean squared), raíz cuadrada del valor medio, a olas incidentes de 1 pie (0.305 m) de amplitud para un buque tanque de 200.000 DWT y para direcciones relativas de incidencia del oleaje de 0, 45, 90, 135, y 180 grados.

Se adjuntan los gráficos propuestos por Kimon (Ref. 17) y reproducidas del EM citado. Se ha mantenido el número de las figuras del EM.

Las Figuras 6-12 y 6-13 dan información para ajustar respuestas del buque para desplazamientos diferentes mientras que las figuras 6-14 y 6-15 permiten realizar ajustes para diferente número de encuentros del buque con el oleaje y periodo de las olas.

En general, el movimiento vertical es máximo para olas que vienen por la proa y de través. Para una determinada dirección, la respuesta aumenta con el periodo de las olas yendo de olas de viento a swell. Solamente olas relativamente largas con periodos mayores a los 10 segundos tienen un efecto significativo sobre la revancha bajo quilla. La respuesta disminuye a medida que es menor la relación  $h/T$ , o sea, situaciones con menor profundidad relativa, ya que la proximidad del fondo tiene un efecto de amortiguación importante tal como lo ha informado Van Oortmerssen (1976).

El efecto de la velocidad del barco es fundamentalmente el resultado de su efecto sobre el periodo de encuentro de olas. En olas viniendo por la proa, el periodo de encuentro disminuye a medida que la velocidad aumenta; mientras que con olas viniendo de popa el periodo de encuentro aumenta. A causa del periodo de ola aparente menor en olas viniendo por la proa, el movimiento vertical del buque disminuye. A la inversa, con olas

viniedo por la popa, el periodo de ola aparente es mayor y por lo tanto, aumenta la respuesta del buque. Con olas de través, no hay demasiada influencia de la velocidad del buque. El tamaño del buque tanque es de máxima importancia para olas viniendo a  $\pm 45$  grados o  $\pm 135$  grados (quartering seas), por la proa y por la popa, debido a que la respuesta en este tipo de oleaje es sensible a la longitud del buque. En quartering seas, el cabeceo tiene un efecto mucho mayor sobre los movimientos verticales de los buques de menor tamaño.

Se presenta a continuación un ejemplo del cálculo del espacio necesario para el movimiento del buque producido por el oleaje. Los datos necesarios para realizar el cálculo son los siguientes:

- a) Tamaño del buque, DWT, en toneladas
- b) Calado medio del buque en pies
- c) Manga del buque en pies
- d) Periodo de rolido del buque observado o calculado en segundos. Si no se conoce una buena estimación es 10 segundos
- e) Periodo de cabeceo del buque observado o calculado en segundos. Si no se conoce una buena estimación es 10 segundos
- f) Velocidad del buque en nudos
- g) Periodo del oleaje en segundos
- h) Altura media del oleaje en pies
- i) Dirección relativa del oleaje:
  - i. De frente: 0 grados
  - ii. Por la proa:  $\pm 45$  grados
  - iii. De través:  $\pm 90$  grados
  - iv. Quartering seas:  $\pm 135$  grados
  - v. Por la popa: 180 grados
- j) Profundidad de agua al cero en pies
- k) Altura de marea en pies
- l) Longitud del tramo de canal a recorrer en millas náuticas

Ejemplo 1: Olas viniendo por la popa

- a) Tamaño del buque: 270.000 DWT
- b) Calado medio del buque en pies: 68 pies (21 m)
- c) Manga del buque: 170 pies (52 m)
- d) Periodo de rolido del buque = 10 segundos
- e) Periodo de cabeceo del buque = 10 segundos
- f) Velocidad del buque ( $V_k$ ) = 5 nudos
- g) Periodo del oleaje = 15 segundos
- h) Altura media del oleaje = 10 pies (3 m)
- i) Dirección relativa del oleaje: 180 grados
- j) Profundidad de agua al cero = 55 pies (17 m)
- k) Altura de marea = 22.9 pies (7 m)
- l) Longitud del tramo de canal a recorrer = 2 millas náuticas

Se calcula

- m) Relación: Periodo medio de la ola / Periodo de cabeceo = 1,5
- n) Relación: profundidad/calado = 1,14
- o) De la figura 6-11, que es la que corresponde a una dirección relativa del oleaje de 180 grados, se obtiene para un buque tanque de 200.000 DWT y una ola incidente de un pie (0,3048 m) una respuesta RMS de 0,296

- p) Dado que la altura media del oleaje en este ejemplo es 10 pies, la respuesta del buque es:  $0,296 \times 10 \text{ pies} = 2,96 \text{ pies}$
- q) De la figura 6-12 y para un ángulo de incidencia del oleaje de 180 grados se obtiene para un buque de 270.000 DWT y un periodo del oleaje de 15 segundos un coeficiente por ajuste del desplazamiento del buque = 0,86
- r) Multiplicamos la respuesta obtenida en p) por el valor obtenido en q) y obtenemos:  $2,96 \text{ pies} \times 0,86 = 2,55 \text{ pies} (0,77 \text{ m})$
- s) De la figura 6-15 se obtiene el periodo de encuentro del buque con el oleaje. Para ello determinamos F en función del ángulo de incidencia del oleaje. Para 180 grados,  $F = -1$ . Dado que la velocidad del buque ( $V_k$ ) = 5 nudos, se obtiene  $F \times V_k = -5$ ; con este valor se elige la curva correspondiente que donde corta el valor de la abscisa correspondiente al valor del periodo del oleaje = 15 segundos permite determinar en la ordenada el valor del periodo de encuentro = 17 segundos
- t) El número de encuentros entre el buque y oleaje se determina en función de la frecuencia de encuentro, la longitud del tramo a recorrer y la velocidad del buque. Por lo tanto: Número de encuentros =  $(2 \text{ millas náuticas} / 5 \text{ nudos}) \times (3600 \text{ seg} / 17 \text{ seg}) = 85$
- u) De la figura 6-14 se obtiene el factor de multiplicación por número de encuentros de ola. Para 85 corresponde 4,25
- v) El espacio bajo quilla necesario para acomodar el movimiento del buque producido por el oleaje es:  $4,25 \text{ (obtenido en t)} \times 2,55 \text{ pies (obtenido en r)}$  o sea, 10,85 pies (3,3 m)

Si se divide el resultado encontrado por la altura de ola incidente, o sea 3,00 m, nos da un coeficiente de transferencia de 1,1

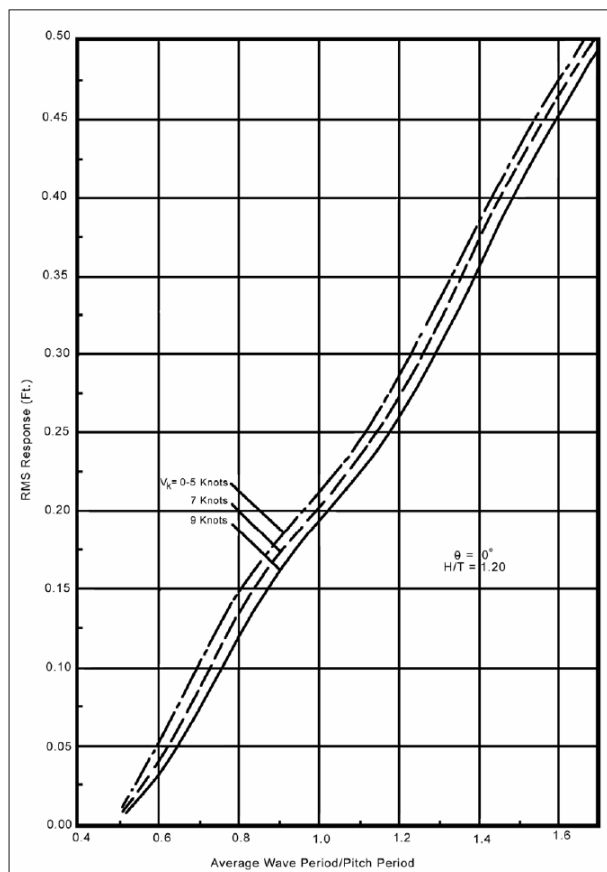


Figure 6-7. Head sea response,  $V_k = 0-9$  knots

Figura 12.8 – Método de Kimon – Ángulo de incidencia 0°

El EM **no** da una recomendación para el uso de este método, pero visto como fueron obtenidos los gráficos correspondientes parecería prudente aplicarlo a buques tanque de características similares a los estudiados, o sea, alrededor de los 200.000 DWT.

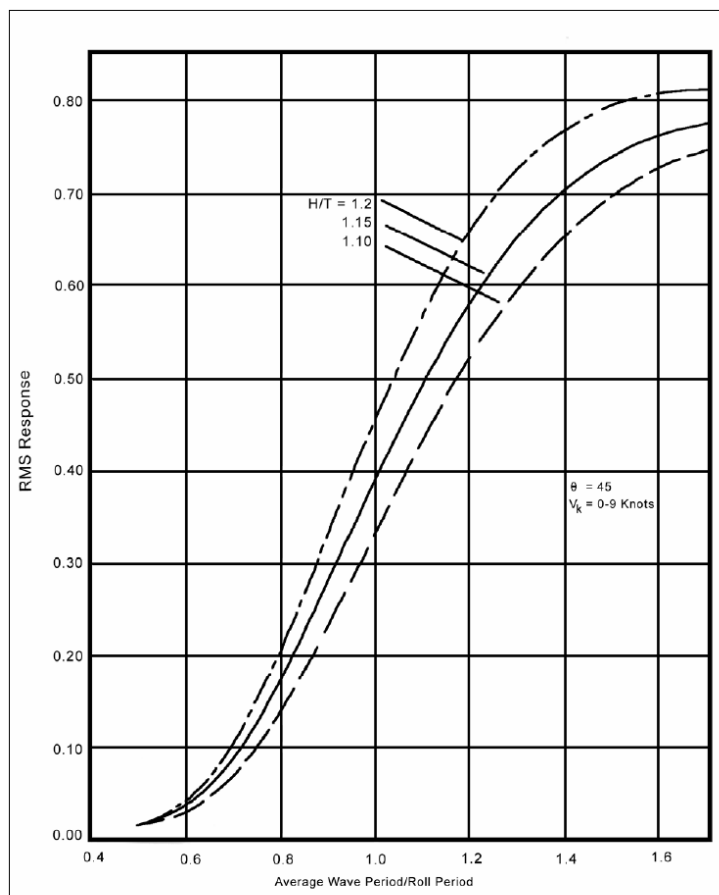


Figure 6-8. Bow sea response,  $V_k = 0-9$  knots

Figura 12.9 – Método de Kimon – Ángulo de incidencia 45°

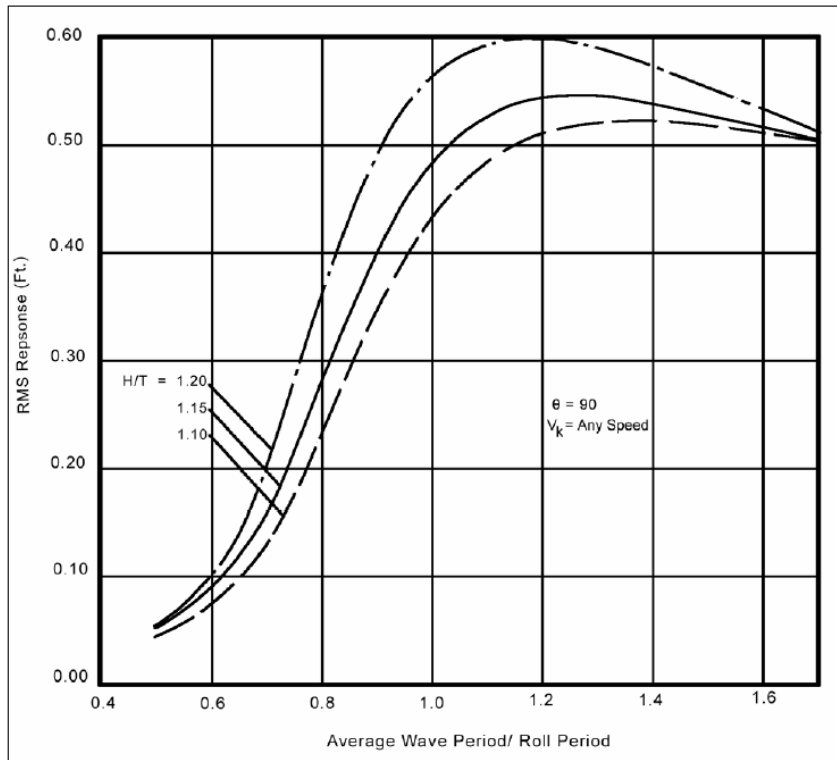


Figure 6-9. Beam sea response,  $V_k = \text{any speed}$

Figura 12.10 – Método de Kimon – Ángulo de incidencia  $90^\circ$

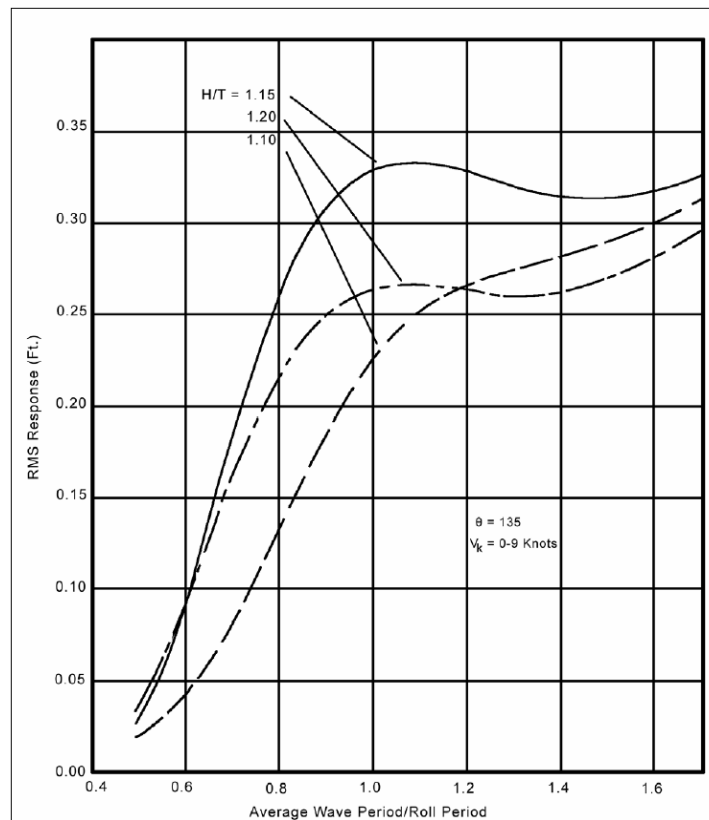


Figure 6-10. Quartering sea response,  $V_k = 0-9 \text{ knots}$

Figura 12.11 – Método de Kimon – Ángulo de incidencia  $135^\circ$

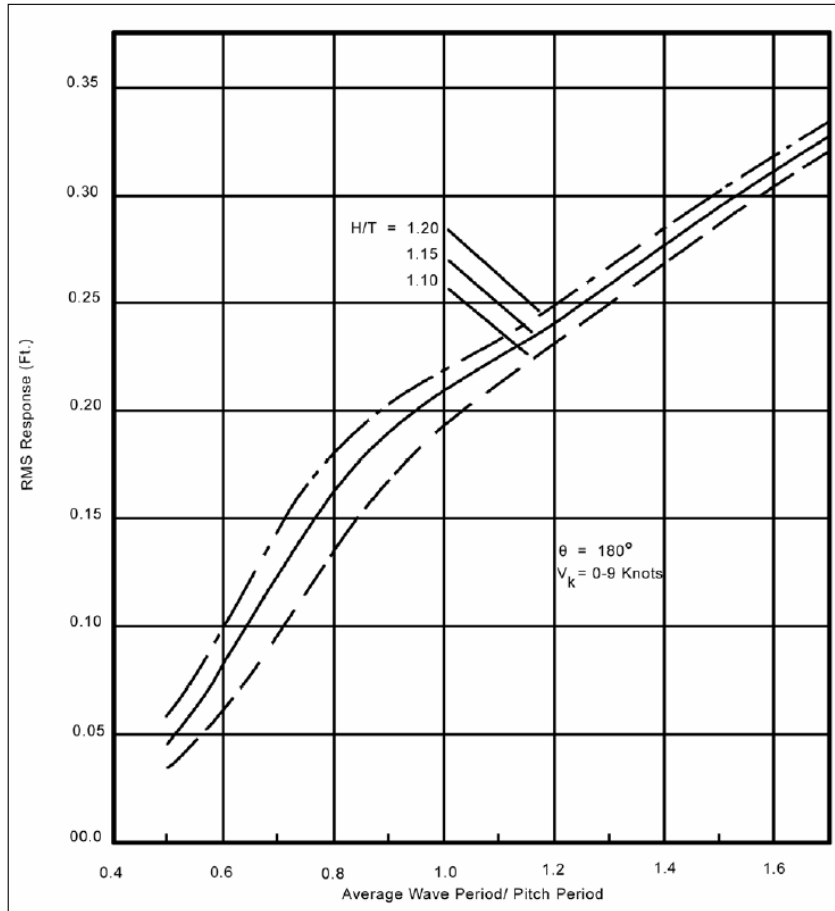


Figure 6-11. Following sea response,  $V_k = 0-9$  knots

Figura 12.12 – Método de Kimon – Ángulo de incidencia  $180^\circ$

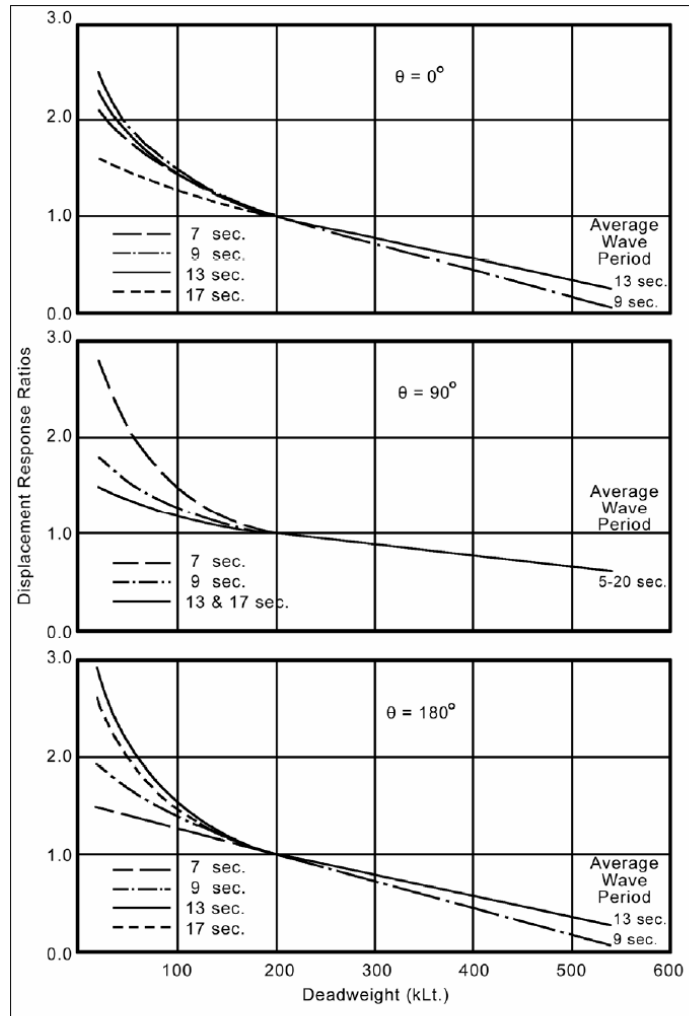


Figure 6-12. Displacement response ratios,  $\theta = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$

Figura 12.13 – Método de Kimon – Ajuste por desplazamiento

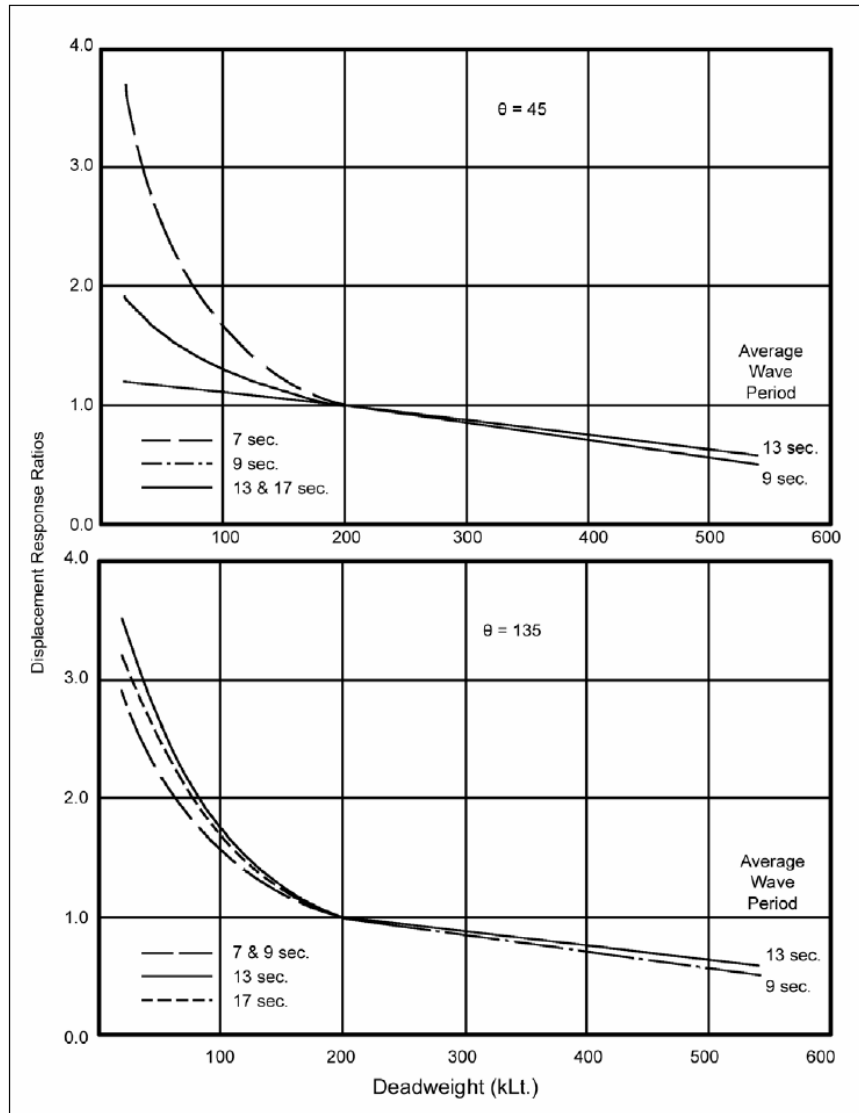


Figure 6-13. Displacement response ratios,  $\theta = 45^\circ, 135^\circ$

Figura 12.14 – Método de Kimon – Ajuste por desplazamiento

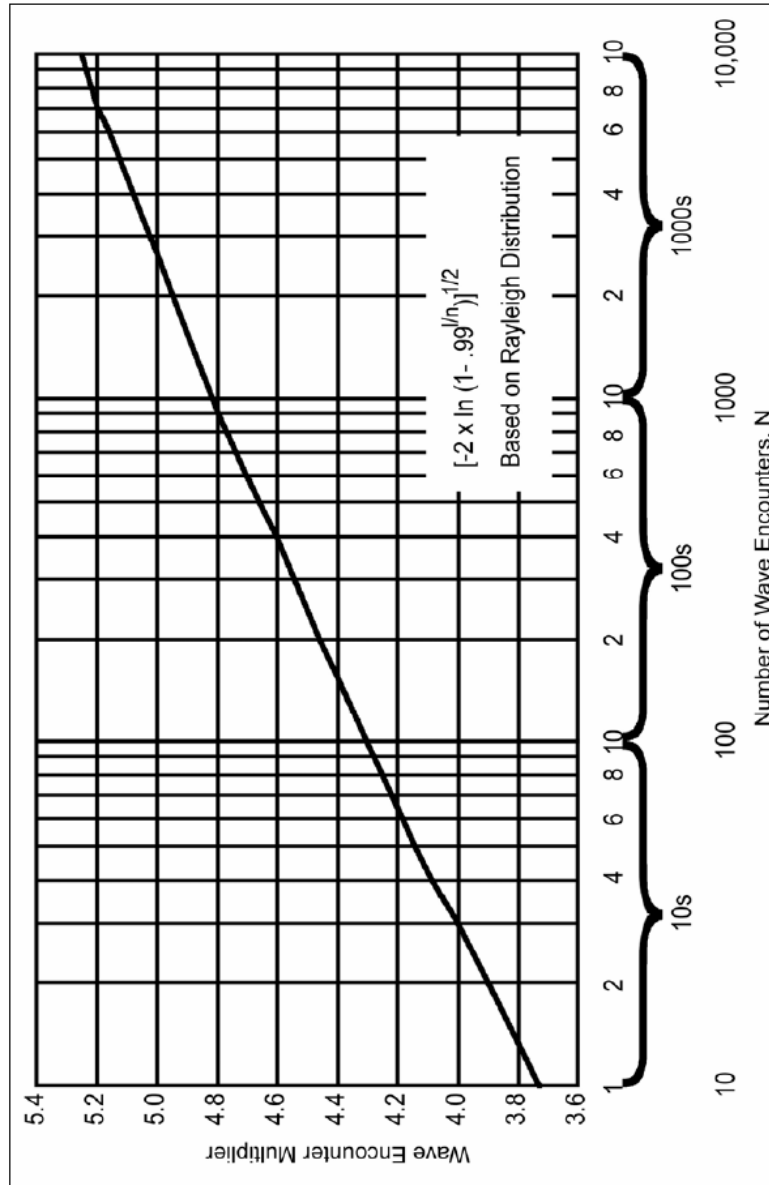


Figure 6-14. Wave encounter multiplier

Figura 12.15 – Método de Kimon – Ajuste por longitud del canal

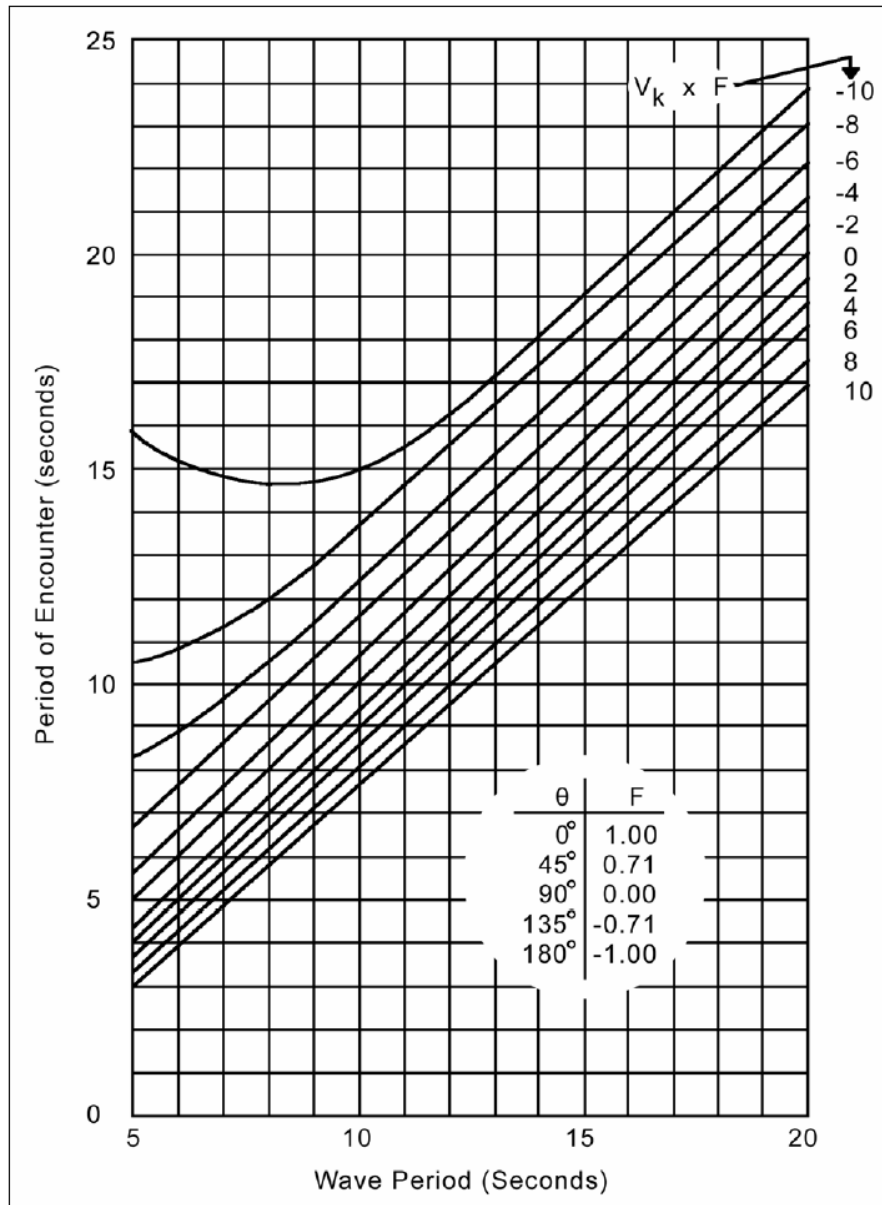


Figure 6-15. Wave encounter period

Figura 12.16 – Método de Kimon – Determinación del período de encuentro

### 12.8.1 Comparación método de Kimon vs RAO

## 12.9 MÉTODO JAPONÉS

Indicar Referencia y mencionar el WG49

El denominado método Japonés propone calcular los valores de

$D_2$  = hundimiento de la proa por efecto de heave + pitch

$D_3$  = hundimiento por efecto del rolido (*verificar que no es heave + rolido*)

y luego verificar cual es el mayor de los dos a los efectos de determinar la profundidad

A los efectos de aplicar el método se debe determinar:

Tipo de buque que va a utilizar la vía navegable

Características del buque:

$L_{oa}$  = eslora total

$L_{pp}$  = eslora entre perpendiculares

$B$  = manga

$D$  = calado

$C_B$  = coeficiente de block que puede ser estimado en función de los valores de la Tabla 2.2.4.2

Tabla 12.4 Valores usuales de  $C_B$  (MILT 2007)

Type of vessel	Average $C_B$	Standard Deviation of $C_B$
Cargo ship	0.80	0.071
Container ship	0.67	0.047
Oil tanker	0.82	0.038
Roll on/Roll off ship	0.67	0.094
Car carrier	0.59	0.067
LPG ship	0.74	0.062
LNG ship	0.72	0.040
Passenger ship	0.59	0.050

Condiciones ambientales y de navegación

$U$  = velocidad del buque

$H_{1/3}$  = altura significativa de la ola

$T_{1/3}$  = periodo significativo de la ola

$d_i$  = profundidad de agua dentro del canal

$d_o$  = profundidad de agua fuera del canal (sobre el banco)

$\Psi$  = ángulo de encuentro entre el rumbo del barco y la dirección de propagación del oleaje

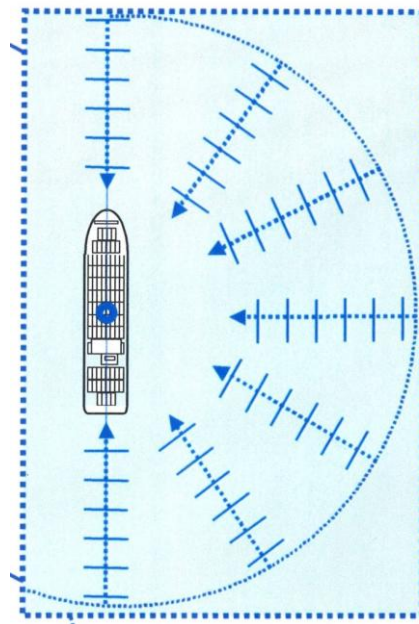


Figura 12.17 – Método Japonés – Ángulo de incidencia del oleaje

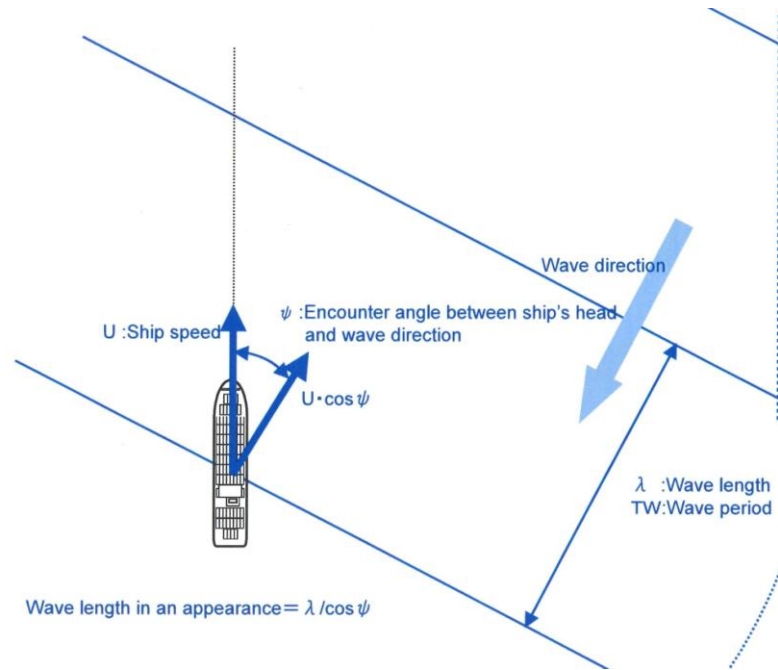


Figura 12.18 – Método Japonés – Definiciones

### 12.9.1 Cálculo del hundimiento de la proa $d_2$ debido a la combinación de heaving + pitching

Ver PIANC WG 49 – Japan pp7 y 8

Vamos a considerar tres casos según sea la  $L_{pp}$  del barco en relación con la longitud de onda  $\lambda$

#### 12.9.1.1 Caso 1: Eslora del buque mucho mayor que la longitud de onda

Caso 1:  $L_{pp} \gg \lambda$

Cuando la eslora del buque es mucho mayor que la longitud de onda no hay efecto del oleaje sobre el buque, por lo tanto,  $D_2 = 0$

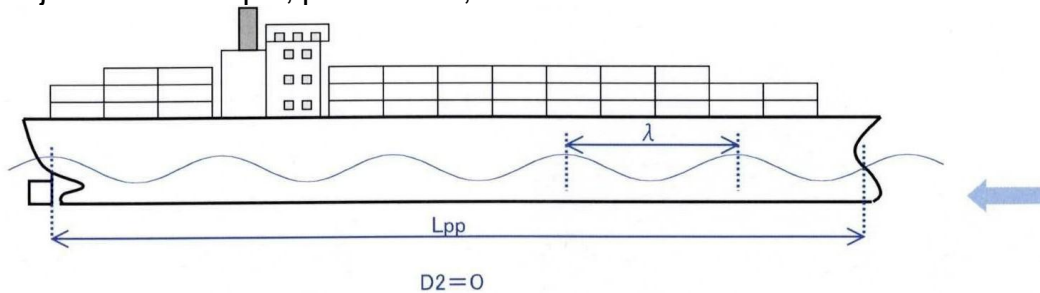


Figura 12.19 - Caso 1:  $L_{pp} \gg \lambda$

12.9.1.2 Caso 2

Caso 2:  $L_{pp} \ll \lambda$

Tenemos como dato la altura de ola significativa  $H_S = H/3$

Vamos a definir como altura de ola para el cálculo  $H = 0,7 * H/3$

Vamos a considerar la amplitud de la ola  $h_0 = H/2$

Del análisis de la figura surge que el buque puede tener una excursión equivalente a la excursión de la ola, por lo que el descenso del casco con respecto al nivel medio equivale a  $h_0$

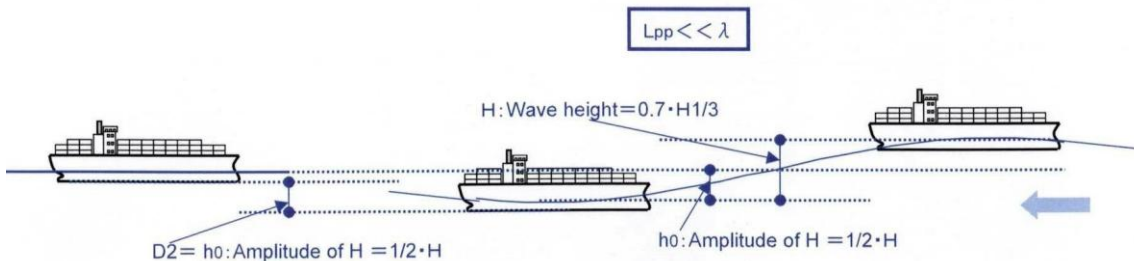


Figura 12.20 – Método Japonés - Caso 2:  $L_{pp} \ll \lambda$

12.9.1.3 Caso 3

Caso 3:  $L_{pp} = \lambda$

El caso crítico se presenta cuando la longitud de onda es aproximadamente igual a la eslora del buque.

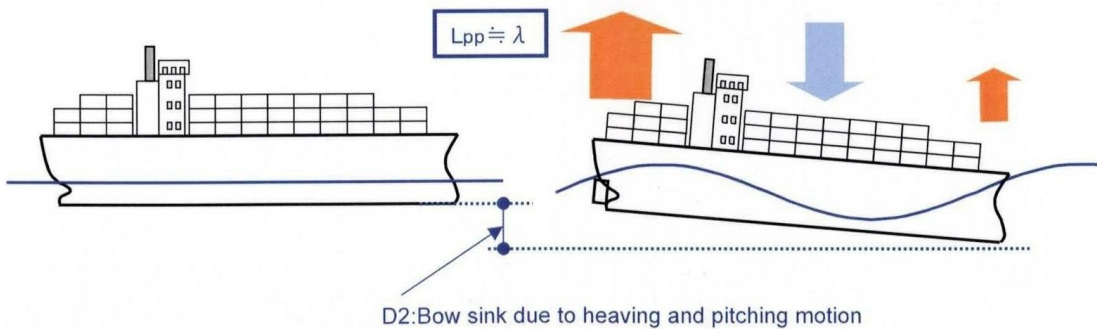


Figura 12.21 – Método Japonés - Caso 3:  $L_{pp} = \lambda$

En la Figura 12.22 se da un ejemplo de cómo se puede realizar el cálculo del hundimiento de proa  $D_2$  de un buque debido a heave + pitch. Se expresa el hundimiento de proa en forma adimensional como  $D_2/A_w$ . En el gráfico se indica  $Z_2 = D_2$  respetando la nomenclatura del texto original en japonés.  $A_w$  corresponde a  $H/2$  o sea la amplitud de la ola. El hundimiento de proa se expresa en función de  $\sqrt{L_{pp}/\lambda}$  para diferentes direcciones de incidencia del oleaje  $\Psi$

Si tomamos el caso de  $L_{pp}/\lambda = 1$  y  $\Psi = 30$  grados nos da como resultado que  $D_2$  puede ser igual a tres veces la amplitud de la ola.

Los datos para la obtención del ábaco de la Figura 12.22 corresponden a un buque con un  $C_B = 0,7$  y un número de Froude  $F_n = 0,1$ . De todas maneras los resultados que muestra el ábaco son típicos también para otro tipo de buques por lo que pueden ser utilizados como una primera aproximación para el cálculo de  $D_2$ .

Este método se puede aplicar en los casos en que  $\lambda > 0,45 L_{pp}$  o sea para valores de  $\sqrt{L_{pp}/\lambda} < 1,5$

El hundimiento de la proa obtenido por las condiciones del ábaco fueron obtenidos para condiciones de aguas profundas, por lo que son valores conservadores, ya que se acepta que el hundimiento de proa en aguas poco profundas es menor que el hundimiento de proa en aguas profundas.

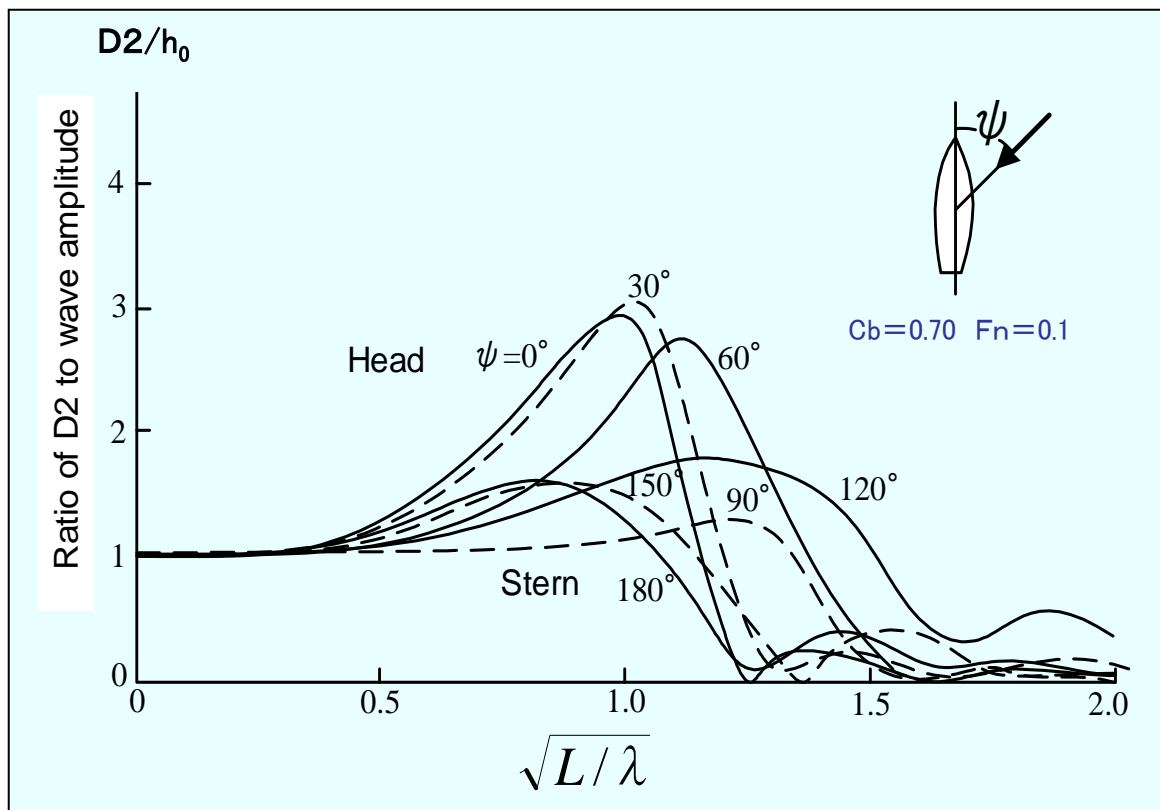


Figura 12.22 - : RAO's of bow sinkage  $Z_2$  ( $D_2$ ) for a cargo ship due to heave and pitch (VLCC Study Group).

### 12.9.2 Bilge keel sink debido a la combinación de heaving mas rolling

$D_3$  = bilge keel sink debido a la combinación de heaving mas rolling

Vamos a considerar tres casos en función del ancho de manga en relación con la magnitud de la longitud de onda

#### 12.9.2.1 Caso 1

Caso 1:  $B \gg \lambda$

Cuando la longitud de onda es mucho menor que la manga del buque no hay efecto del oleaje sobre el buque, por lo tanto,  $D_3 = 0$

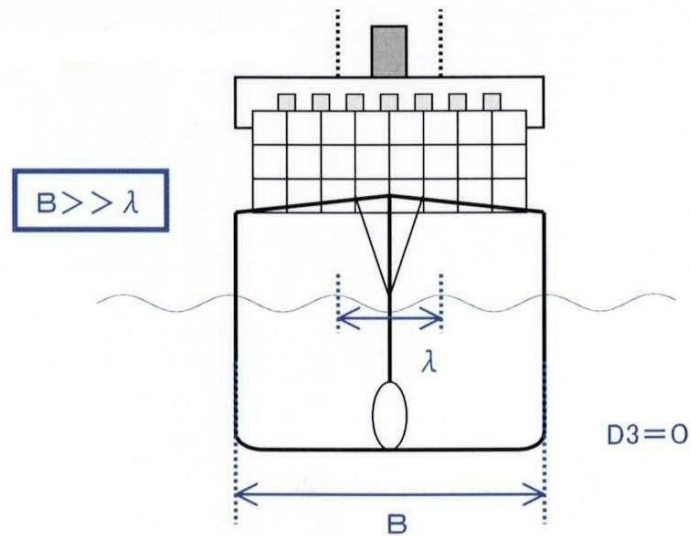


Figura 12.23 – Método Japonés - Caso 1:  $B \gg \lambda$

### 12.9.2.2 Caso 2

Caso 2:  $B \ll \lambda$

Tenemos como dato la altura de ola significativa  $H_S = H/3$

Vamos a definir como altura de ola para el cálculo  $H = 0,7 \cdot H/3$

Vamos a considerar la amplitud de la ola  $h_0 = H/2$

Del análisis de la figura surge que el buque puede tener una excursión equivalente a la excursión de la ola, por lo que el descenso del casco con respecto al nivel medio equivale a  $h_0$

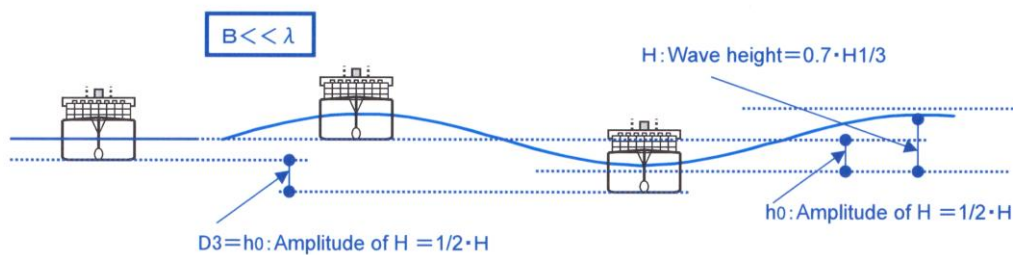


Figura 12.24 – Método Japonés - Caso 2:  $B \ll \lambda$

### 12.9.2.3 Caso 3

Caso 3:  $T_R \sim T_E$

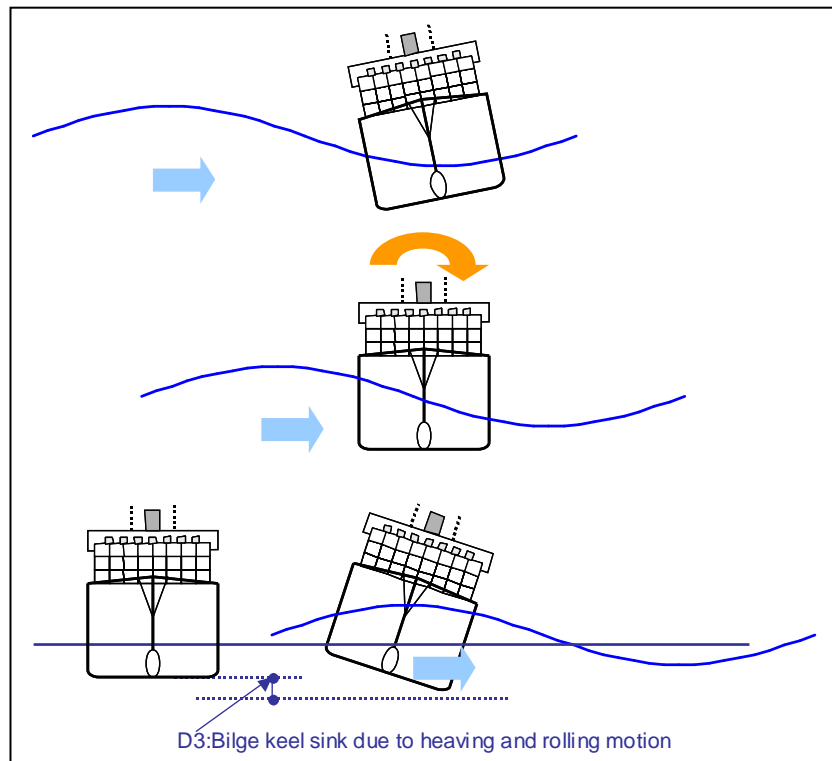


Figura 12.25: Bilge keel amidships sinkage due to heave and roll (MILT 2007).

$T_R$  = Periodo natural de rolado del buque  
 $T_E$  = Periodo de encuentro entre el buque y el oleaje  
 $T_R = 0,8 B / (GM)^{0,5}$

$B$  = manga del buque  
 $GM$  = Distancia entre el centro de gravedad y el metacentro

Tabla 12.5 - Metacentric height estimates  $GM$  for range of ship types.

Ship Type		$\overline{GM}$ Estimate (m)
Bulkier	Capesize	(0.30 to 0.40) $T_{Design}$
	Panamax	(0.25 to 0.30) $T_{Design}$
	Over Panamax	(0.50 to 0.60) $T_{Design}$
Containership	Panamax	(0.05 to 0.10) $T_{Design}$
	Over Panamax	(0.10 to 0.15) $T_{Design}$
PCC		(0.10 to 0.15) $T_{Design}$
Tanker	Moss Type LNG	(0.25 to 0.35) $T_{Design}$
VLCC		(0.30 to 0.40) $T_{Design}$

Notes:  
 1.  $T_{Design}$  = Maximum design draught (m).

$T_E = \lambda / (\lambda / T_W + V \cos \Psi)$   
 $T_W$  = periodo del oleaje

En el caso que los periodos sean aproximadamente iguales se calcula  $D_3$  con la siguiente fórmula

$$D_3 = 0,7 * (H_{1/3} / 2) + (B/2) \sin \theta$$

$\Theta$  = Máximo ángulo de rolo (en grados)

$$\Theta = \mu \cdot \gamma \cdot \Phi$$

$\mu$  = Tasa de rolo inducida por el oleaje regular (adimensional)

$\gamma$  = Coeficiente de pendiente del oleaje efectiva

$\mu \cdot \gamma = 7$  como valor máximo

$\phi$  = Pendiente del oleaje (en grados) para el periodo que produce resonancia

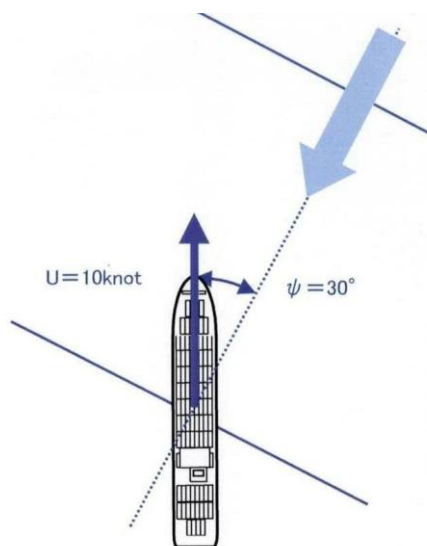
$$\phi = 360 \cdot (0,35 H_{1/3} / \lambda) \cdot \sin \Psi$$

$\Psi$  = ángulo de encuentro entre el oleaje y el buque

### 12.9.3 Ejemplos

Se presentan una serie de ejemplos tomando un buque tipo Panamax portacontenedor de 59,500 DWT

#### 12.9.3.1 Ejemplo 1: Incidencia del oleaje a 30°



Container ship (Panamax) 59,500DWT  
Loa=288.3m Lpp=279.0m B=32.2m d0=d=13.3m

Figura 12.26.1 – Ejemplo 1 - Croquis

Designed depth of fairway  $H_{1/3}(m)$

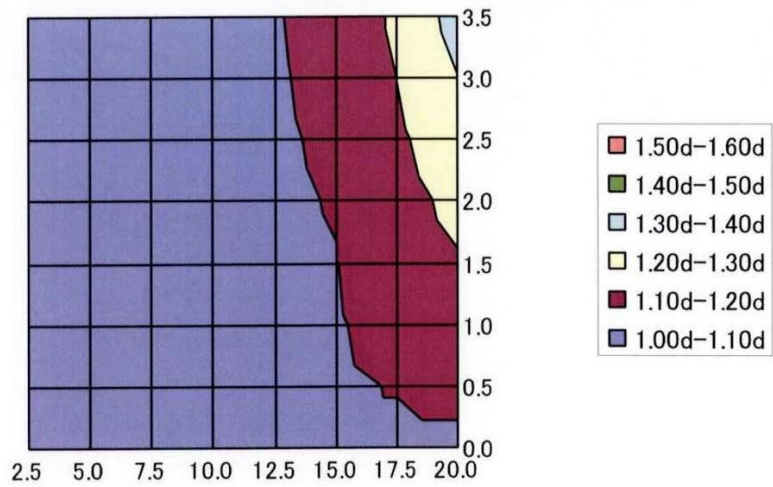
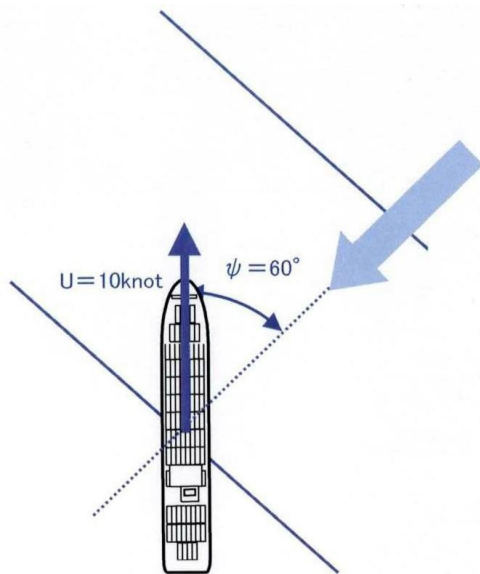


Figura 12.26.2 – Ejemplo 1 - Resultados

12.9.3.2 Ejemplo 2: Incidencia del oleaje a 60°



Container ship (Panamax) 59,500DWT  
 Loa=288.3m Lpp=279.0m B=32.2m d0=d=13.3m

Figura 12.27.1 – Ejemplo 2 - Croquis

Designed depth of fairway  $H_{1/3}(m)$

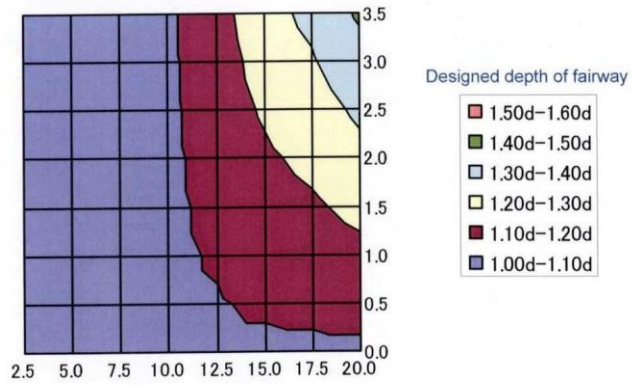
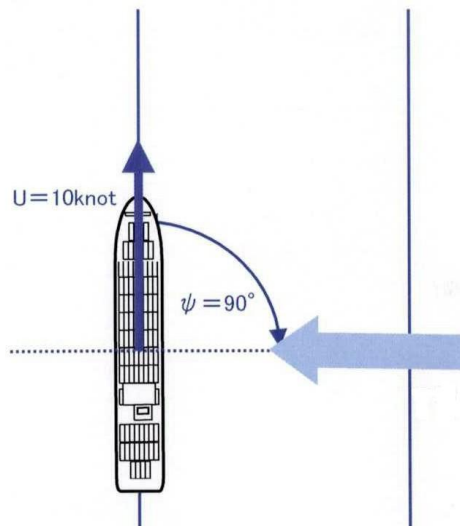


Figura 12.27.2 – Ejemplo 2 - Resultados

### 12.9.3.3 Ejemplo 3: Incidencia del oleaje a $90^\circ$



Container ship (Panamax) 59,500DWT  
 Loa=288.3m Lpp=279.0m B=32.2m  $d_0=d=13.3m$

Figura 12.28.1 – Ejemplo 3 - Croquis

Designed depth of fairway  $H_{1/3}(m)$

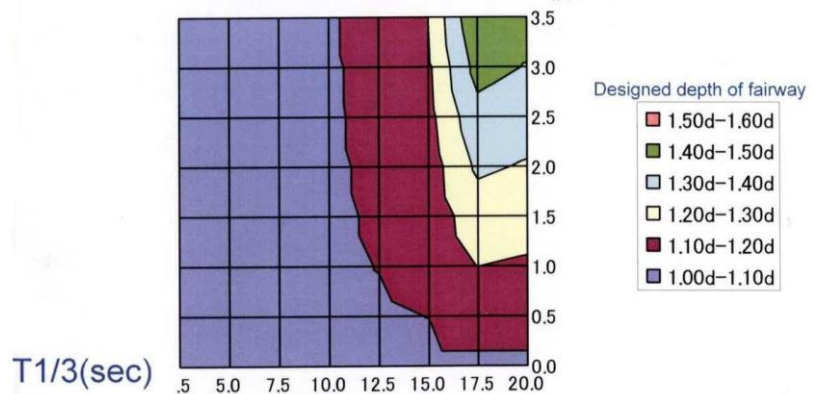


Figura 12.28.2 – Ejemplo 3 - Resultados

### 12.9.3.4 Ejemplo 4: Incidencia del oleaje a 120°

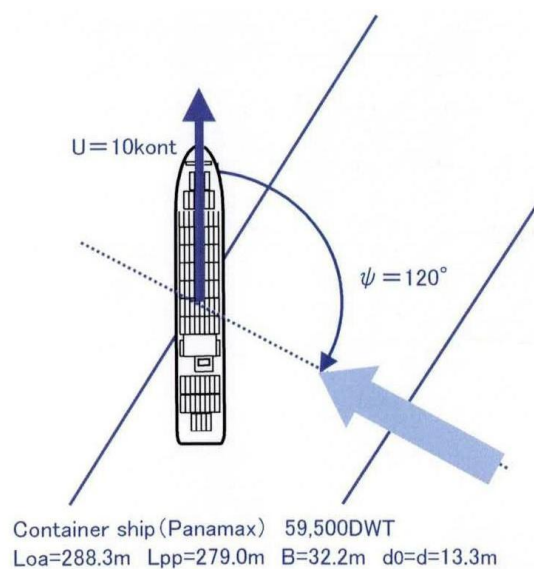


Figura 12.29.1 – Ejemplo 4 - Croquis

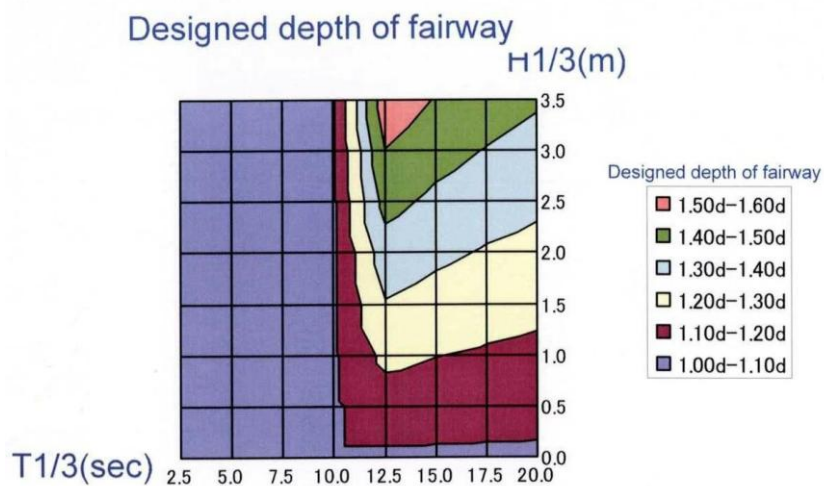


Figura 12.29.2 – Ejemplo 4 - Resultados

### 12.9.3.5 Ejemplo 5: Incidencia del oleaje a 150°

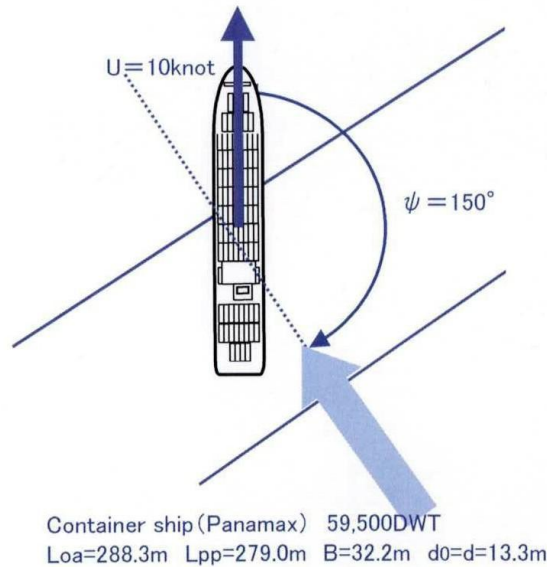


Figura 12.30.1 – Ejemplo 5 - Croquis

Designed depth of fairway  $H_{1/3}(m)$

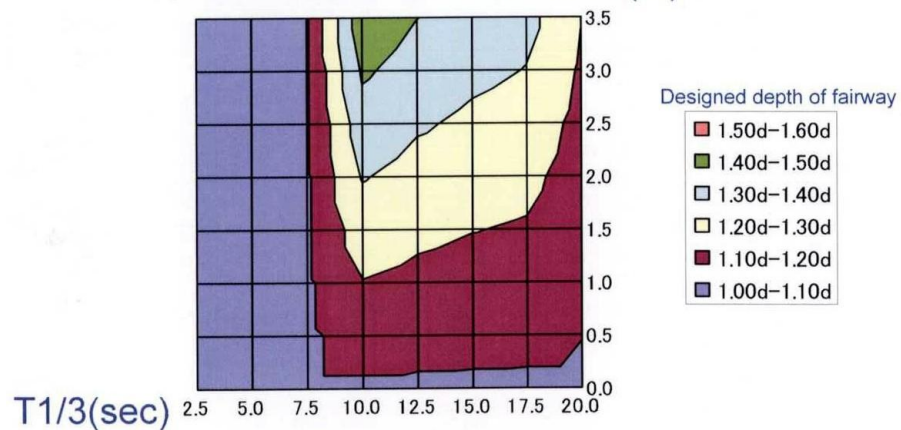


Figura 12.30.2 – Ejemplo 5 - Resultados

## 12.10 MODELO CADET

## 12.11 MEDICIÓN DE LOS MOVIMIENTOS VERTICALES DEL BUQUE

La medición de los movimientos verticales del buque es un proceso complejo que debe tener en cuenta:

- el nivel de agua: el nivel de agua varía con el tiempo debido a la influencia de la marea. Las mediciones se efectúan usualmente en puntos sobre la costa o en la vía navegable que están alejados varios kilómetros de la zona de experimentación y se deben extrapolar con el error asociado correspondiente.

- el oleaje incidente: la determinación del oleaje incidente a lo largo de la traza del canal se efectúa mediante la medición en un punto y la extrapolación del mismo mediante modelos matemáticos de refracción. Se puede verificar el resultado mediante observaciones visuales desde el buque. Es muy difícil que las condiciones del oleaje sean uniformes para todos los experimentos

- las características del buque: debe conocerse bien las características del buque, especialmente en lo que hace a los periodos propios de oscilación. Cada buque tiene características propias particulares

- las condiciones de carga del buque: el buque puede estar total o parcialmente cargado y puede estar adrizado (even keel) o con algún asiento (trim) estático. Incluso el mismo buque en diferentes ocasiones puede presentar condiciones de carga (calado) diferentes

- las condiciones de navegación del buque: la velocidad de navegación del buque define el squat y la frecuencia de encuentro con el oleaje. Es necesario conocerla e intentar que durante los ensayos sea lo mas homogénea posible.

- la batimetría del fondo: para determinar la relación entre la profundidad del lugar y el calado del buque es necesario realizar batimetrías de detalle previo a la realización de los experimentos. La profundidad del canal en el sentido longitudinal suele presentar importantes variaciones.

Por otra parte no es fácil conseguir buques que estén dispuestos a participar de las mediciones. Asimismo los buques que se consiguen tienen todas características distintas y adicionalmente las condiciones ambientales que se presentan el día del experimento no suelen ser las óptimas (día de calma). Por estos motivos, entre otros, las mediciones en la Naturaleza son escasas y se recurre en muchas ocasiones a mediciones en modelos físicos.

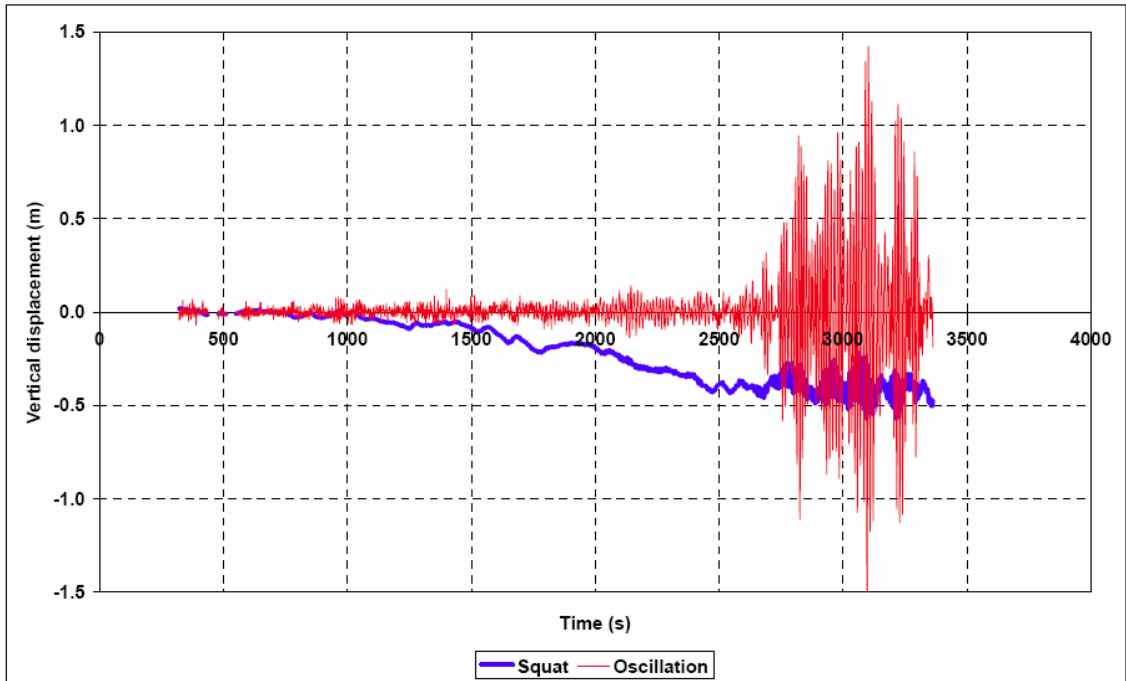
La Ref. 14 presenta los resultados de un estudio efectuado en el Puerto de Charleston (EEUU) donde se realizaron mediciones de movimientos verticales de buques con el objeto de

- a) obtener datos para validar mediciones efectuadas en modelos físicos
- b) obtener información para mejorar el simulador de maniobra marítima
- c) mejorar las recomendaciones del USACE para el diseño de canales de navegación

El informe es muy interesante pues provee información acerca de las dificultades que se presentan durante la realización de mediciones de estas características y la forma de superarlas. Las mediciones fueron efectuadas mediante la utilización de sistemas DGPS y los resultados se analizaron para determinar el squat de los buques y comparar los resultados con fórmulas de uso habitual. El tema squat se trata mas adelante.

La Ref.15 presenta los resultados de mediciones de campo en Barbers Point Harbour (EEUU) y su comparación con mediciones en modelo físico. Las mediciones se efectuaron sobre 5 buques mediante DGPS

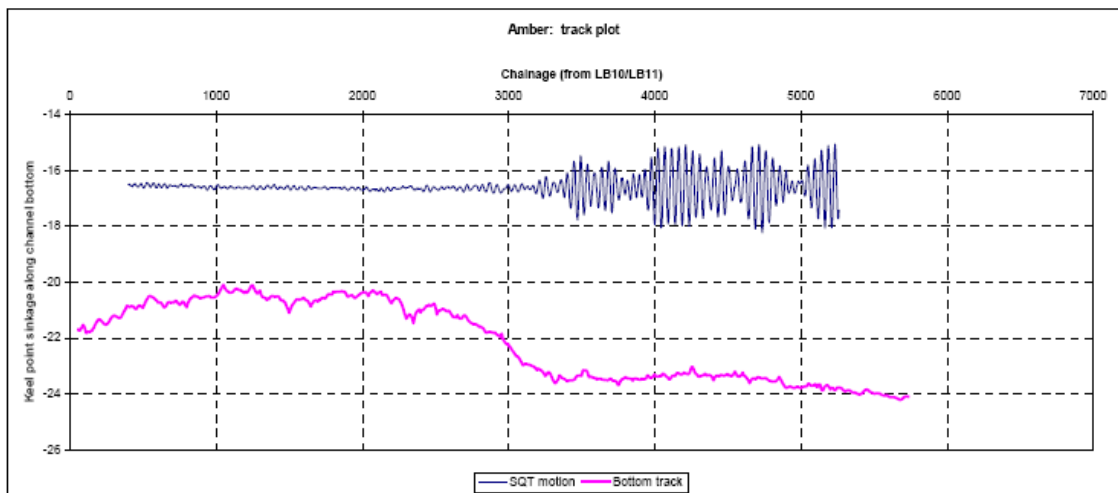
La Ref. 18 presenta las mediciones realizadas sobre buques y el análisis de las mismas para el canal de acceso al Puerto de Richards Bay en Sudáfrica



**Figure 4: Squat and vertical oscillations as determined from the GPS sensor as function of time**

*Figura 12.31- Squat y oscilaciones verticales*

En la Figura 12.31 (Figure 4 en el original) se muestra el desplazamiento vertical de un punto del buque en función del tiempo. En la figura se ha separado el valor del squat de los movimientos verticales producidos por el oleaje. El incremento de los movimientos verticales producidos por el oleaje que se producen cuando el buque sale fuera de la protección de los rompeolas se aprecia claramente en la figura



**Figure 5: Total vertical motion of starboard-quarter keel point of a ship along channel bed profile**

*Figura 12.32 – Movimiento vertical total*

En la Figura 12.32 (Figure 5 en el original) se presenta la revancha bajo quilla resultante al combinar los movimientos verticales totales de un punto de la quilla con la batimetría

del fondo. En función de esta información puede determinarse la mínima revancha bajo quilla instantánea lo que es indicativo de la seguridad del tránsito en el canal

Es posible desarrollar relaciones donde el máximo calado de los buques que salen del puerto pueden ser determinados en función de la altura de marea, condiciones del oleaje, calado del buque y velocidad del buque. En la Tabla 12.6 se presentan resultados típicos para dos de los buques monitoreados denominados Amber y Ferosa.

*Tabla Nro. 12.6.- Determinación de la revancha bajo quilla*

Ship name	L <sub>oa</sub> (m)	Beam (m)	Draught (m)	H <sub>mo</sub> (m)	Direct (deg)	Z <sub>max</sub> (m)	V <sub>ship</sub> (m/s)	T <sub>p</sub> (s)	T <sub>e</sub> (s)	Squat (m)	Tide (m)	UKC (m)
Amber	290,0	46,0	17,5	2,64	154	1,66	4,0	12,8	10,1	0,59	1,33	5,58
Ferosa	298,2	44,7	17,7	2,51	156	1,61	4,6	12,2	9,5	0,62	2,13	6,20

**Geometric ship data and vertical response of monitored ships**

De la Tabla 12.6 surge que la revancha bajo quilla total disponible es del orden de los 6 m. Es interesante comparar los resultados obtenidos con la recomendación de PIANC para valores de h/d en canales con condiciones de oleaje

*Tabla Nro. 12.7 - Relación h/d*

Buque	Calado (m)	Revancha bajo quilla (m)	Profundidad (m)	h/d
Amber	17,50	5,58	23,08	1,32
Ferosa	17,70	6,20	23,90	1,35

**12.12 EFFECTOS DE CADA MOVIMIENTO DEL BUQUE SOBRE DIFERENTES ACTIVIDADES PORTUARIAS**

Los movimientos verticales influyen sobre los requerimientos de profundidad. Un aspecto importante a tener en consideración es el rolido. Un grado de rolido en una manga de 100 pies (30 m) es 1 pie de incremento de calado. Este tema ha pasado a ser importante con el aumento de mangas. Por razones comerciales los arquitectos navales al serle requerido aumentar el porte del buque, aumentan la manga (sin aumentar la eslora) para no incrementar el calado. Esto a su vez aumenta las dificultades de maniobra por el incremento de la relación manga/calado. Lo que sucede es que los proyectos de aumentos de profundidad de los canales toman mucho tiempo para materializarse. Por ello, para mejorar la ecuación económica del barco hay que ponerle mas carga de cualquier forma.

El periodo propio de rolido del buque puede coincidir con el periodo de la ola de través incidente. Por ello se trata de evitar esta situación

El rolido es importante para la carga/descarga de buques portacontenedores

La deriva (sway) produce fuerzas sobre el muelle y sobre las amarras. Asimismo puede afectar el control del buque durante la navegación y por lo tanto influye sobre la determinación del ancho del canal

El vaivén (surge) produce fuerzas sobre las amarras

La guiñada (yaw) puede afectar el control del buque y por lo tanto influye sobre la determinación del ancho del canal.

## 12.13 OBSERVACIONES

## 12.14 BIBLIOGRAFÍA

- 12.14.1 Demirbilek, Z., and Sargent, F. (1999). "Deep-draft Coastal Demirbilek, Z and Sargent, F. (1999) "Deep-draft coastal navigation entrance practice", Engineering Technical Note I-63, U. S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS, <http://bigfoot.wes.army.mil/cetn.index.html>
- 12.14.2 Ligteringen, H., (2000), "Ports and Terminals", Publicación Ctwa4330/5306, Delft University of Technology – pp 5-7, 5-10
- 12.14.3 ROM 3.1-99-pp119-123 Acción y efectos del oleaje; pp207 – 211 Movimientos del buque producidos por el oleaje
- 12.14.4 ERDC/CHL TR-00-2 / March 2000/**Barbers Point Harbor Physical Model Navigation Study** by Gordon S. Harkins, Cecil C. Dorrell
- 12.14.5 PIANC WG37 (1997)
- 12.14.6 PIANC WG49 (2010)
- 12.14.7 Vlemmix, W. y otros; Reception and discharge of large coal carriers, 26th International Navigation Congress, Brussels 1985 Section II, Subject 1 par 3.2 Motions of large coal carrying vessels – p199
- 12.14.8 ERDC/CHL CHETN-IX-14 March 2004 Charleston Harbor Ship Motion Data Collection and Squat Analysis - Michael J. Briggs, Stephen T. Maynard, Charles R. Nickles, and Terry N. Waller
- 12.14.9 Briggs, M., Melito, I., Demirbilek, Z., and Sargent, F. (2001). "Deep-draft entrance channels: Preliminary comparisons between field and laboratory measurements," Coastal and Hydraulics Engineering Technical Note CHETN-IX-7, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS. <http://chl.wes.army.mil/library/publications/chetn/>
- 12.14.10 EM-1110-2-1613 May 2006 "Hydraulic Design of Deep Draft Navigation Channels" USACE
- 12.14.11 Kimon, P. M. 1982. "Underkeel Clearance in Ports," Report No. EII.17TM.82, Exxon International, Tanker Dpt-R&D, Forum Park, NJ. (Citado en Ref. 16)
- 12.14.12 Moes, Hans "Squat and Wave Response Measurements of Bulk Carriers in the Entrance Channel to the Port of Richards Bay" CSIR, PO Box 320, Stellenbosch, 7600, South Africa, e-mail: [hmoes@csir.co.za](mailto:hmoes@csir.co.za), presented at 2. Squat-Workshop 2004, Elsfleth/Oldenburger (Germany)