

ESCUELA DE GRADUADOS EN INGENIERIA PORTUARIA

CATEDRA

DISEÑO DE VIAS NAVEGABLES

PROFESOR TITULAR

ING. RAUL S. ESCALANTE

PROFESOR ADJUNTO

INGENIERA GISELLE SIVORI

TEMA 13

INCIDENCIA DEL ASENTAMIENTO (SQUAT) EN LA
DETERMINACIÓN DE LA PROFUNDIDAD DEL CANAL

Septiembre 2014

INDICE

- 13. INCIDENCIA DEL ASENTAMIENTO (SQUAT) EN LA DETERMINACIÓN DE LA PROFUNDIDAD DEL CANAL
- 13.1. CONSIDERACIONES GENERALES
- 13.2. MOVIMIENTOS VERTICALES DEL BUQUE
- 13.3. FACTORES QUE INFLUENCIAN EL SQUAT
- 13.3.1. Dimensiones del buque
- 13.3.2. Configuración de la vía navegable
- 13.3.2.1. Canales artificiales
- 13.3.3. Resumen de factores
- 13.4. FÓRMULAS PARA EL CÁLCULO DEL SQUAT
- 13.4.1. Fórmula de Huuska-Guliev
- 13.4.2. Fórmula de Barras
- 13.4.3. Fórmula de Barras3
- 13.4.4. Fórmula de Rómisch
- 13.4.5. Fórmula de Yoshimura
- 13.5. USO DE LAS DIFERENTES FÓRMULAS
- 13.6. COMPARACIÓN DE RESULTADOS
- 13.6.1. Análisis de PIANC WG 30
- 13.6.2. Análisis de Demirbilek
- 13.7. EFECTOS ESPECIALES SOBRE EL SQUAT
- 13.7.1. Encuentro y sobrepaso de buques
- 13.7.2. Proximidad de los bancos
- 13.7.3. Configuración del fondo
- 13.7.4. Efecto de la navegación con deriva
- 13.7.5. Efecto de fondos barrosos
- 13.8. CALCULO DEL SQUAT MEDIANTE MODELIZACIÓN NUMÉRICA
- 13.9. RECOMENDACIONES
- 13.10. PROPUESTAS PARA LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS
- 13.10.1. Propuesta de mediciones en prototipo
- 13.11. DETERMINACIÓN DEL SQUAT EN MODELOS FÍSICOS
- 13.11.1. Laboratorios
- 13.12. MEDICIÓN DE LOS MOVIMIENTOS VERTICALES DEL BUQUE
- 13.13. EJEMPLO DESARROLLADO
- 13.14. BIBLIOGRAFÍA

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 13.1 Factores necesarios para determinar la profundidad del canal
- Figura 13.2 Squat por proa (PIANC 2013)
- Figura 13.3 Definición de squat
- Figura 13.4 Dimensiones del buque – Definiciones
- Figura 13.4 Bis Diferentes diseños de popas de buques
- Figura 13.5 Aguas poco profundas no restringidas lateralmente
- Figura 13.6 Secciones transversales para aguas poco profundas restringidas y canales artificiales
- Figura 13.7 Canal artificial - Definiciones
- Figura 13.8 Fórmula de Huuska/Guliev K_1 vs S
- Figura 13.9 Cálculo del squat con diferentes fórmulas – Buque tanque

Figura 13.10	Cálculo del squat con diferentes fórmulas – Buque portacontenedores
Figura 13.11	Cálculo del squat con diferentes fórmulas – Buque granelero
Figura 13.12	Cálculo del squat con diferentes fórmulas – Buque granelero
Figura 13.13	Squat producido por encuentro de buques
Figura 13.14	Efecto de los bancos sobre el squat
Figura 13.14 Bis	Influencia de la deriva en el squat
Figura 13.15	Squat por la proa para el modelo de buque de MARAD
Figura 13.16	Método SHIPS

INDICE DE TABLAS

Tabla 13.1	Cálculo de W_{eff} aplicando la fórmula de Barrass
Tabla 13.1 Bis	Fórmulas aplicables de acuerdo a las condiciones existentes
Tabla 13.2	Rangos de aplicación de las diferentes fórmulas
Tabla 13.3	Características de los buques estudiados
Tabla 13.4	Incremento del squat en función de la profundidad y de la distancia al banco
Tabla 13.5	Modelo de buques portacontenedores PP BAW Canal Tipo U

13.6. CONSIDERACIONES GENERALES

Dentro de los aspectos que requieren ser considerados a los efectos de determinar el espacio necesario entre la quilla del buque y el fondo para realizar una navegación segura se encuentra el fenómeno que denominamos “squat” como se puede apreciar en la Figura 13.1

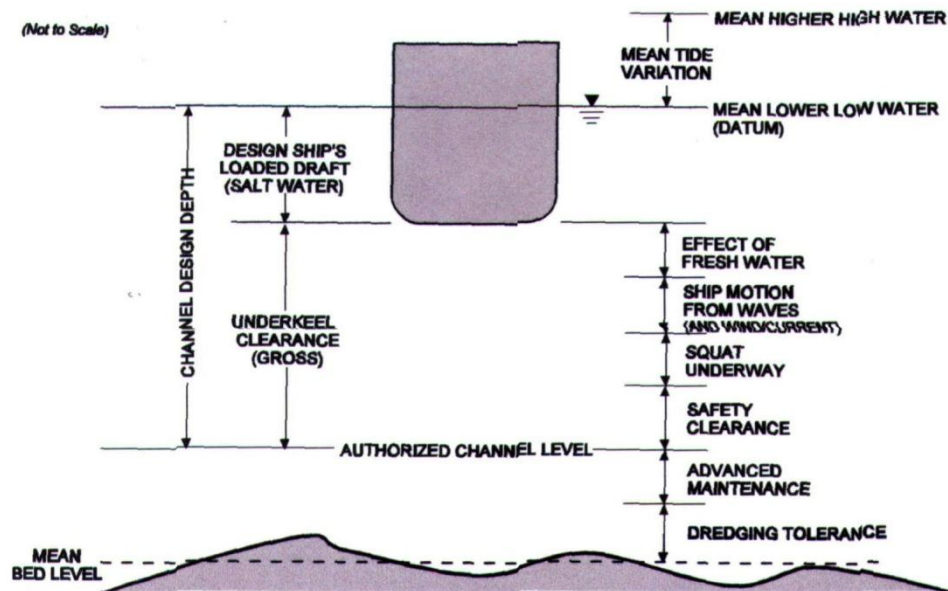


Figure 2.2. Typical Allowances for Channel Depth (from [3]).

Figura 13.1 – Factores necesarios para determinar la profundidad del canal

El squat es un desplazamiento vertical que consiste en una traslación y una rotación producidas por el incremento del flujo de agua pasante alrededor del casco del buque en movimiento.

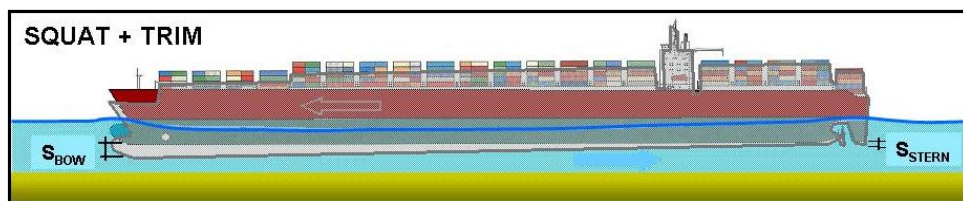


Figura 13.2 – Squat por proa (PIANC 2013).

Este efecto se ve incrementado en zonas de aguas poco profundas y en proximidades de los bancos del canal. Por lo tanto, lo que denominamos squat está compuesto por esta disminución de la revancha bajo quilla debido a la combinación de hundimiento y asiento adicional.

Es importante hacer un comentario respecto al por qué se justifica efectuar un estudio detallado del fenómeno squat.

Antes no era tan importante conocer el squat porque los buques eran más chicos y los canales relativamente más profundos. Hoy en día los nuevos supertankers y portacontenedores desarrollan velocidades más altas, con un mayor squat y una revancha bajo quilla menor.

El objetivo de los puertos y los canales de navegación es operar en forma eficiente y en condiciones de seguridad, minimizando los requerimientos de profundidad y costos de dragado asociados, por lo que la determinación del squat es un tema fundamental.

De todas maneras, muchos accidentes siguen ocurriendo, en gran parte por grounding.

Un claro ejemplo es lo sucedido al buque Queen Elizabeth 2, el 7 de agosto de 1992, cerca de Cuttyhunk Island, en Massachusetts, USA

El buque de 32 pies de calado navegaba a 24 nudos, 80% de su máxima velocidad. La roca con la que golpeó no había sido identificada y se encontraba a 34.5 pies de profundidad, lo que la revancha bajo quilla habría sido suficiente, a no ser por el efecto del squat. Fue subestimado el incremento de squat que el buque podría tener al aumentar su velocidad. Inicialmente se había supuesto un squat de 2 pies en los cálculos, pero en este caso éste pudo haberse encontrado entre los 4.5 y 8 pies.

El tema ha sido tratado teórica y experimentalmente desde hace mucho tiempo pero sin embargo todavía hay discusiones acerca de la mejor manera de predecirlo para tener su efecto en cuenta en la determinación de la profundidad de un canal de navegación

Se han seguido diferentes caminos para predecir el valor del squat:

- Desarrollos teóricos
- Mediciones en modelos físicos
- Mediciones en prototipo
- Modelos numéricos

Los métodos no son independientes y se usan en forma conjunta para verificar o ajustar desarrollos existentes.

Para este tema se sigue principalmente PIANC WG30 Appendix C (1997) y Briggs et al. (2010) que redactaron estos últimos también la parte sobre squat del Capítulo correspondiente de PIANC WG121 (2014).

13.2. MOVIMIENTOS VERTICALES DEL BUQUE

Cuando un buque está navegando a una cierta velocidad desplaza la masa de agua que se encuentra enfrente de él. El agua, por lo tanto, se pone en movimiento alrededor de la proa y vuelve al reposo nuevamente por detrás de la popa. El movimiento de avance del buque en agua en reposo genera una velocidad relativa entre el buque y el agua. El agua en movimiento gana energía cinética de la energía potencial que tenía antes de ser puesta en movimiento. El agua retorna pasando alrededor del casco y entre el casco y el fondo creando un campo de velocidades relativo entre el buque y el agua que lo rodea. A causa del movimiento de retorno del agua, esta velocidad relativa es diferente a la velocidad del buque y no es uniforme a lo largo de toda la eslora. Este campo de velocidades produce una presión hidrodinámica a lo largo del buque y asimilando el fenómeno con el conocido efecto Bernouilli se produce una depresión del nivel del agua. O sea, el resultado es una depresión local de la superficie del agua alrededor del buque. Esto es así por el equilibrio que deben mantener la energía cinética y la energía potencial. El buque acompaña la depresión del nivel del agua (el buque siempre tiene el mismo plano de flotación). En este nivel deprimido el buque flota y navega como si el "squat" no existiera.

El fenómeno produce una fuerza vertical en sentido descendente (lo que causa el hundimiento) y un momento a lo largo del eje longitudinal (causando un asiento [trim] adicional en la popa o en la proa) lo que da lugar a valores de hundimiento diferentes para la proa que para la popa Este fenómeno se denomina “squat” (asentamiento) y se define como el efecto combinado del hundimiento y asiento causado por el movimiento de avance del buque. “Squat”, por lo tanto, no debe considerarse como un aumento de calado del buque sino como un desplazamiento vertical hacia abajo del buque con respecto al nivel superficial general del agua, y como consecuencia, disminuyendo la revancha bajo quilla.

Resumiendo, este campo de velocidades causa presiones hidrodinámicas sobre el casco que resultan en:

- una depresión del nivel de agua, que varía a lo largo del buque
- una fuerza vertical, dirigida hacia abajo y
- un momento alrededor del eje horizontal transversal que causa un desplazamiento del buque en el plano longitudinal de simetría

Por lo tanto el “squat” comprende, como se aprecia en la Figura 13.3

- un movimiento vertical llamado hundimiento (s)
- una rotación llamada asiento (trim) (θ)

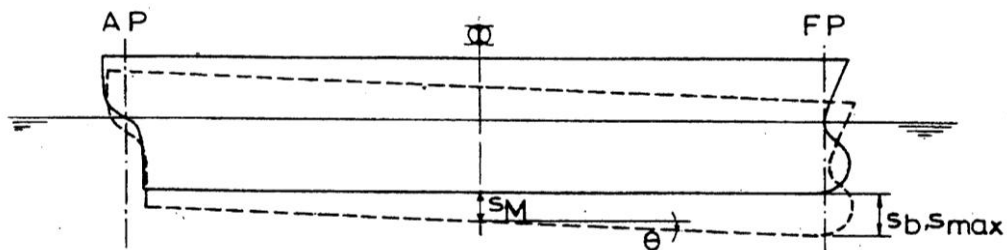


Figure C1 - Vertical ship motions: definitions

Figura 13.3 – Definición de squat

$$S_b = S_M + \frac{1}{2} L_{pp} \theta$$

El “squat” es una combinación de “ s ” y “ θ ”. Si medimos a partir del nivel de agua en reposo (no perturbado), el movimiento vertical de un punto del casco depende de su posición longitudinal. Habitualmente uno está interesado solamente en el punto de “squat” máximo (S_{max}) que en muchos casos se presenta en la proa (S_b). Muchos autores han desarrollado fórmulas para el cálculo de S_b

Históricamente, el valor máximo de squat se producía en la proa S_b especialmente para buques con coeficientes de block altos como los buques tanque. En canales muy estrechos y para buques de alta velocidad y formas finas como los buques de pasajeros y los buques portacontenedores el valor máximo del squat puede en algunas oportunidades producirse en la popa S_s . Barras propuso que la ubicación del valor máximo del squat sea en la proa o en la popa se debe principalmente al valor del coeficiente de block C_B . Si el buque tiene un $C_B < 0,7$ que es un valor típico para buques portacontenedores el buque tiene el máximo squat por popa. Si el buque tiene un coeficiente de block $C_B > 0,7$ que es típico para buques graneleros y buques

tanque el máximo squat se da por proa. Aunque el valor límite indicado puede no ser válido para todos los buques es, de todas maneras, una buena regla del arte.

El asiento estático inicial del buque puede influenciar la ubicación del squat máximo. Barras indica que los buques que tienen un asiento inicial importante van a experimentar un squat en la misma dirección que el asiento estático. Mediciones realizadas en Alemania indicarían que es posible que buques que tienen un asiento inicial en un sentido puedan desarrollar un squat en el otro. Esto permitiría diseñar una estrategia de carga para optimizar el uso de la revancha bajo quilla disponible.

13.3. FACTORES QUE INFLUENCIAN EL SQUAT

La determinación del squat depende de las características del buque y la configuración del canal. Los parámetros principales del buque son:

- el calado del buque T
- la forma del casco representada por el coeficiente de block C_B
- la velocidad del buque V_S

El parámetro más importante es la velocidad del buque V_S . Se toma la velocidad relativa del buque con respecto al agua por lo que hay que tener en consideración las corrientes fluviales y las corrientes de marea. En general, el squat varía con el cuadrado o aun más de la velocidad. Por lo tanto incrementando la velocidad al doble implica multiplicar el squat por cuatro y a la inversa en el caso de disminuir la velocidad.

13.3.1. Dimensiones del buque

Además de las dimensiones usuales del buque

- L_{pp} eslora entre perpendiculares
- B manga
- T calado
- A volumen de desplazamiento
- C_B coeficiente de block

las siguientes características se utilizan en algunas fórmulas:

- la sección transversal (A_s) en el medio del buque
- el coeficiente de planta (waterplane) (C_{wp})

$$C_{wp} = \frac{A_{wp}}{L_{wp} B} = \text{aprox} \frac{A_{wp}}{L_{pp} B}$$

donde A_{wp} = sección longitudinal del buque

Valores típicos del C_{wp} son 0.75/0.85. Los grandes tanques o bulk carriers pueden tener un C_{wp} de 0.90. Barrass propuso una fórmula $C_{wp} = 1/3 (2C_B + 1)$

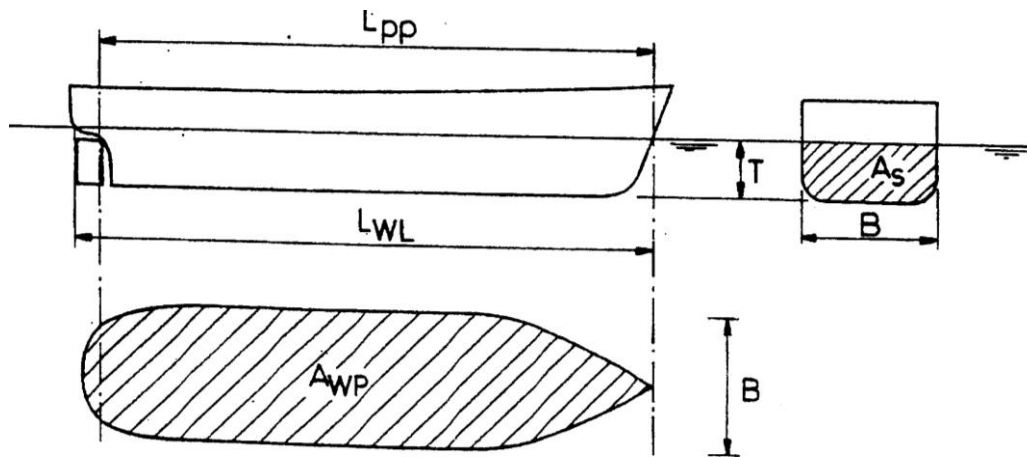


Figure C2 - Ship dimensions: definitions

Figura 13.4 – Dimensiones del buque - Definiciones

Otras dos características del buque que afectan el squat son la presencia de una proa bulbo y el espejo de popa. Dado que estos elementos se encuentran en los extremos del buque naturalmente afectan el asiento y el squat. Muchos de los ensayos realizados años atrás se efectuaban sobre modelos de buques que no tenían proas bulbo. Los diseños recientes del espejo de proa son más anchos y menos hidrodinámicos y también tienen efecto sobre los valores de squat.

En la Figura 13.4 Bis se muestran diferentes diseños de popas de buques.

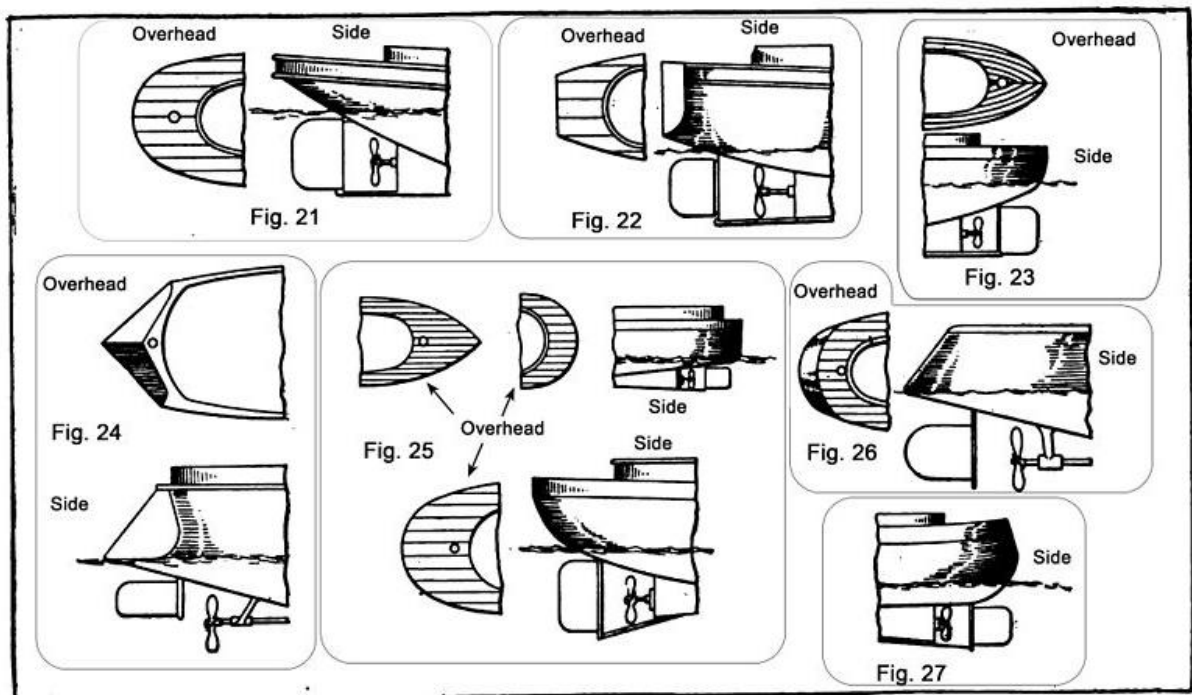


Fig. 21 to 27.—Boat Sterns are Made in Many Different Designs.

Figura 13.4 Bis – Diferentes diseños de popas de buques

13.3.2. Configuración de la vía navegable

Los principales aspectos del canal que tienen influencia en el squat son la proximidad del fondo representado por la profundidad h y la proximidad de los veriles del canal representado por la configuración de la sección transversal. El efecto del squat es despreciable salvo que el buque se encuentre en agua relativamente poco profunda con una revancha bajo quilla pequeña. Con relaciones $h/T > 1,5$ se considera que la navegación es segura desde el punto de vista del squat. En aguas profundas el buque va a tener squat pero es de menor magnitud y en esos casos no hay peligro de que el buque toque el fondo.

Los tres tipos principales de configuración de la sección transversal que se presentan en la Figura 13.5 son:

- aguas poco profundas no restringidas – Tipo U

Este tipo de canales se designan con la letra “U” (Unrestricted channels). Se encuentran en cuerpos de agua relativamente grandes y están habitualmente en el extremo hacia el océano de los canales. Desde el punto de vista analítico son el tipo de canal más fácil de describir y son uno de los primeros tipos estudiados históricamente. Los canales que se ubican en ríos también se pueden clasificar como canales tipo U en los casos en que son ríos lo suficientemente anchos, o sea, más de 8 veces la manga del buque

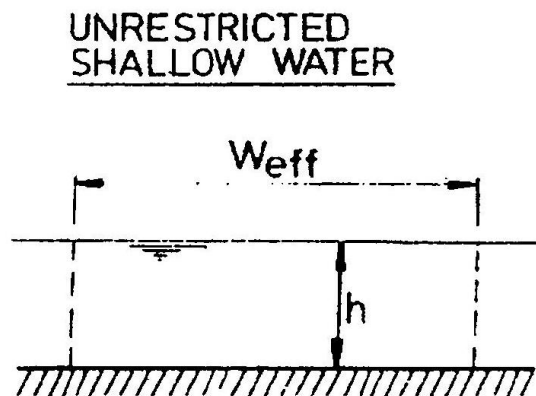


Figura 13.5 – Aguas poco profundas no restringidas lateralmente

Barrass propone una fórmula para el cálculo del $W_{\text{eff}} = (7.04 / C_b^{0.85}) B$, lo que resulta en los valores de la Tabla 13.1

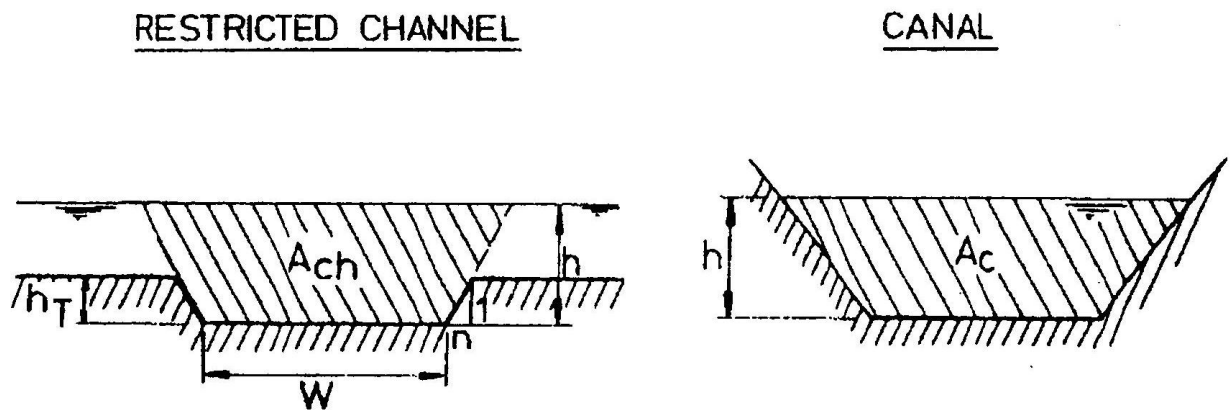
Tipo de buque	C_b	W_{eff}
Tanque	0.85 - 0.81	8.1 a 8.5 B
Carga general	0.87 - 0.71	7.9 a 9.4 B
Portacontenedores	0.72 - 0.63	9.3 a 10.4 B

Tabla 13.1 – Valores de W_{eff} aplicando fórmula de Barrass

También debe considerarse que existiendo taludes muy tendidos, del orden de 1:10 o más, el canal se comporta como tipo U, aún con $W < W_{\text{eff}}$

- aguas poco profundas restringidas – Tipo R

Este tipo de canales se designa con la letra “R” y corresponde a un canal restringido en profundidad con una trinchera excavada típica de los canales dragados. La altura de la trinchera se denomina h_T . Hasta la altura de la trinchera este canal se comporta como un canal totalmente excavado (Tipo C) ya que contiene e influencia el flujo alrededor del buque. La parte por encima de la trinchera permite que el flujo actúe como si el buque estuviera en un canal tipo U



Este tipo de canal se designa con la letra “C” y podría considerarse un tipo especial de canal tipo R donde la altura de la trinchera se extiende por encima de la superficie libre. Los canales tipo R son totalmente artificiales y se utilizan para conectar cuerpos de agua. Ejemplos típicos son el canal de Suez, de Panamá y de Kiel.

La mayoría de los canales puede caracterizarse mediante el uso de alguna de las configuraciones indicadas o una combinación de ellas ya que los diferentes tramos de los canales suelen tener secciones transversales diferentes. Por ejemplo, un lado del canal puede ser tipo U y el otro lado tipo R u otras combinaciones.

La velocidad relativa entre el buque y el agua está influenciada por las dimensiones de la vía navegable. Las fórmulas para “squat” han sido desarrolladas habitualmente para aguas poco profundas no restringidas (lateralmente) Tipo U o para canales Tipo C. Por lo tanto es necesario extender la validez de esas fórmulas cuando se considera el caso de aguas restringidas – Tipo R. Algunas de las fórmulas existentes para calcular “squat” en aguas profundas permiten su utilización en canales dragados en trinchera y canales totalmente excavados introduciendo un coeficiente, K_s , denominado “coeficiente de restricción de ancho”

$$s(w) = K_s s(w=\infty)$$

La dimensión vertical principal es la profundidad (h)

La profundidad de agua debe definirse en condiciones no perturbadas (en reposo) dada la depresión en el nivel de agua que produce la velocidad de avance del buque

13.3.2.1. CANALES ARTIFICIALES

En un canal artificial, la velocidad de retorno está determinada por la sección transversal del buque (A_s) y por la sección transversal del canal (A_c) como se muestra en la Figura 13.7

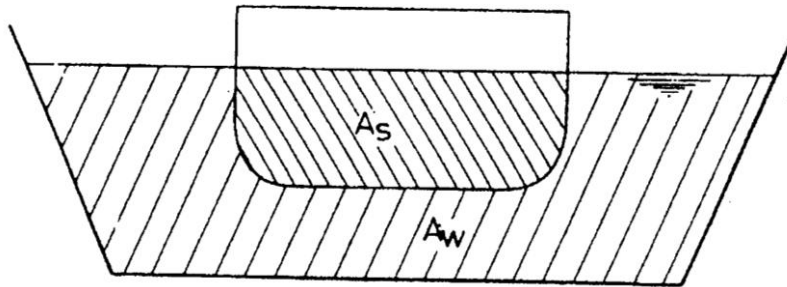


Figura 13.7 – Canal artificial – Definiciones

En aguas poco profundas restringidas se define una sección transversal equivalente (A_{ch}) extendiendo los taludes del canal hasta la superficie del agua. Si el talud de los bancos es 1:n y el ancho de la solera es W , luego

$$A_{ch} = W h + n h^2$$

En el caso de un canal tipo R la altura de la parte dragada se denomina h_T

Relaciones de la vía navegable

La sección transversal neta de la vía navegable (A_w) es

$$A_w = A_c - A_s \text{ (canales artificiales)}$$

$$A_w = A_{ch} - A_s \text{ (aguas poco profundas restringidas)}$$

Siendo A_s la sección transversal sumergida del buque en la mitad del buque y que se puede definir como

$$A_s = 0,98 B T$$

El factor de bloqueo (S) se define como la fracción de la sección transversal de la vía navegable ocupada por la sección transversal del buque

$$S = \frac{A_s}{A_c} \quad \text{ò} \quad S = \frac{A_s}{A_{ch}}$$

Los valores típicos de S se encuentran entre 0,03 y 0,25 para canales tipo R y Tipo C y entre 0,03 y 0,10 para canales tipo U

La relación entre A_s y A_w se denomina S_2

$$S_2 = \frac{A_s}{A_w} = \frac{A_s}{A_c - A_s} = \frac{S}{1 - S}$$

Si se desprecia el “squat” y la depresión del nivel de agua (lo que es una simplificación muy grosera, llevando a una subestimación del “squat”) un buque que se mueve en un canal con velocidad V presenta una velocidad relativa del agua igual a $(1 + S_2) V$. Por esta razón S_2 se denomina “factor de velocidad de retorno”

La justificación de esta expresión es la siguiente:

$$V \cdot A_s = V_R \cdot A_w$$

$$A_s \qquad A_s$$

$$V_R = \frac{A_s}{A_w} \cdot V = \frac{A_s}{A_c - A_s} \cdot V$$

$$S$$

$$V_R = \frac{S}{1 - S} V = S_2 \cdot V$$

Si S es pequeño, V_2 es grande

Velocidad relativa del buque

$$V + V_R = V + S_2 \cdot V = (1 + S_2) \cdot V$$

13.3.3. FACTORES

El “squat” depende principalmente de los siguientes factores:

- velocidad del buque (relativa al agua)
- la geometría del canal (profundidad, ancho, área, etc.) y las relaciones h/T y relación “ancho de la vía navegable”/B
- la geometría del buque (eslora, manga, calado, forma, etc) expresada principalmente por el coeficiente de block, C_B
- la ubicación del buque en el canal (proximidad al banco)
- la deriva del buque
- la relación con otros buques

Al ser un fenómeno muy complejo y por tener una incidencia muy importante en la magnitud de las obras, muchos autores han realizado investigaciones teóricas o empíricas sobre el problema del “squat”. A pesar de ello todavía **no** hay un método de cálculo aceptado por todos.

El objeto de las investigaciones es determinar:

- el hundimiento medio (S_M)
- el ángulo de asentamiento (trim angle) (θ)

factores que combinados me dan el “squat” total por la proa (S_b) para valores de

$$F_{nh} < 1$$

mediante la fórmula:

$$S_b = S_M + \frac{1}{2} L_{pp} \theta$$

Las fórmulas para el cálculo del “squat” se expresan en función de:

∇ : desplazamiento del buque (m³) = $C_B \cdot L_{pp} \cdot B \cdot T$

L_{pp} : eslora entre perpendiculares (m)

F_{nh} : número de Froude (adimensional)

El número de Froude es el parámetro adimensional más importante en el desarrollo de las fórmulas y es el que mide la resistencia del buque al movimiento en aguas de poca profundidad. La mayoría de los buques no tiene potencia suficiente para superar valores $F_{nh} > 0,7$ para tanques y $F_{nh} > 0,6$ para buques portacontenedores. La mayoría de las ecuaciones son empíricas y requieren valores de F_{nh} por debajo de 0,7. Para todos los casos se debe satisfacer $F_{nh} < 1$ como una barrera de velocidad y el correspondiente nivel de velocidad suscrita.

13.4. FORMULAS PARA EL CALCULO DEL SQUAT

Existen numerosas fórmulas empíricas que se utilizan para realizar el cálculo del squat. Estas fórmulas han sido obtenidas mediante desarrollos teóricos, ensayos sobre modelos físicos y mediciones en prototipo o una combinación de estos métodos. Las fórmulas han sido desarrolladas para diferentes tipos de buques, diferentes tipos de canales y diferentes condiciones de carga. En PIANC (1985) se encuentra una muy buena descripción del desarrollo histórico hasta ese momento que se completa con PIANC (1997) y PIANC (2013)

Entre las fórmulas más conocidas se pueden mencionar:

- Tuck (1966)
- Tuck y Taylor (1970)
- Beck (1975)
- Hoofst (1974)
- Eryuzlu y Hauser (1978)
- Eryuzlu 2 (1994)
- Römisch (1989)
- Milward (1990)
- ICORELS (1980)
- Huuska (1976)
- Barrass (1979, 1981)
- Barras 3 (2004)
- Ankudinov (2002)
- MARSIM 2000
- Stocks
- Yoshimura (1986)
- ICORELS (1980)

Se van a desarrollar algunas de las fórmulas indicadas. Para el detalle de las otras fórmulas se sugiere consultar las referencias suministradas o mejor aún los documentos originales.

13.4.1. Fórmula de Huuska - Guliev

Una ecuación muy utilizada es la Huuska (1976)

$$S_b = 2.4 \frac{\nabla}{L_{pp}^2} \frac{F_r^2}{\sqrt{1 - F_r^2}} K_s$$

$$K_s = 7.45 s_1 + 0.76 \quad \text{for } s_1 > 0.03$$

$$K_s = 1 \quad \text{for } s_1 \leq 0.03$$

En la mayoría de los casos el valor de s_1 es aproximadamente igual a 0.03 con lo que la fórmula de Huuska es idéntica a la fórmula de ICORELS.

K_s = factor de bloqueo

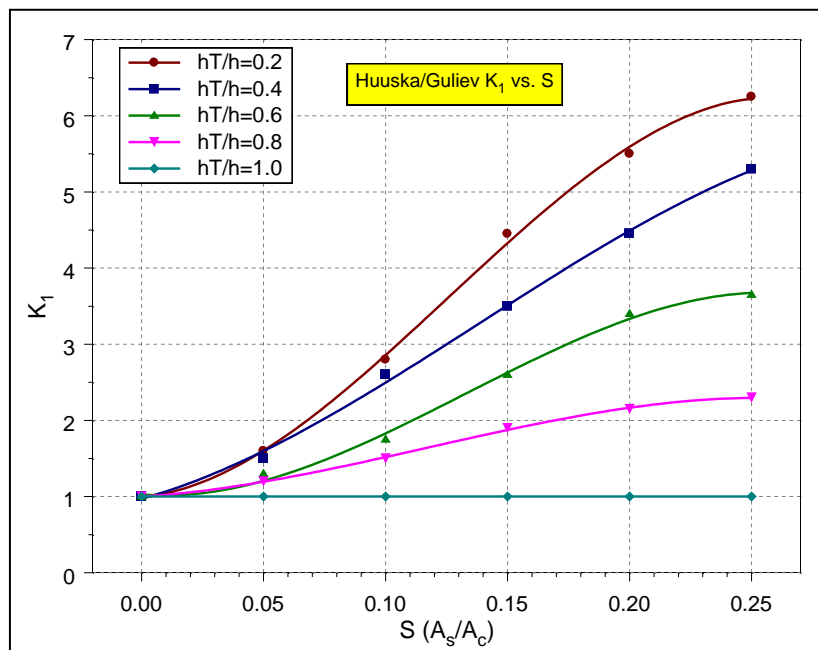


Figura 13.8 – K_1 vs S_1

$$S_1 = (A_s/A_{ch})/K_1$$

K_1 = factor de corrección = $f(A_s/A_{ch}; h_T/h)$

$$A_s = 0,98 \text{ BT}$$

En general, se recomienda no utilizar esta fórmula para valores de $F_{nh} > 0,7$

La Finnish Maritime Administration (FMA) utiliza esta fórmula para las tres configuraciones de canal. Incluyen algunas restricciones adicionales para los límites superiores e inferiores de uso que se indican a continuación

- C_B 0.60 a 0.80

- B/T 2.19 a 3.50
- L_{pp}/B 5.50 a 8.50
- h_T/h 0.22 a 0.81

13.4.2. Fórmula de Barrass

Barrass es un autor muy prolífico que ha desarrollado numerosas fórmulas para el cálculo del squat. Tiene un sitio muy interesante para consultar (www.ship-squat.com).

La siguiente ecuación empírica está basada en los trabajos realizados por Barrass (1979,1981) y permite calcular el valor máximo del squat

$$S_{\max} = \frac{C_b S_2^{2/3} V_k^{2.08}}{30}$$

donde S_2 es el factor de bloqueo = A_s/A_w , $A_w = A_{ch} - A_s$, y V_k es la velocidad relativa del buque con respecto al agua en nudos.

En la fórmula de Barrass, se considera que tenemos aguas de poca profundidad sin restricciones cuando el ancho de la solera del canal (W) es superior a 8 veces la manga (B) del buque. A pesar de no estar estipulado en PIANC (1997), la sección transversal del canal para aguas de poca profundidad no restringidas se supone equivalente a $8 \cdot B \cdot h$.

Podemos expresar W_{eff} con la siguiente fórmula

$$W_{\text{eff}}/B = 7.7 + 45 (1 - C_w)^2$$

Debe tenerse en cuenta que no hay una transición muy definida entre lateralmente no confinado y con restricciones laterales. Un canal con h_t (zanja dragada) $< 0,4 h$ (h medido desde el pelo de agua) o con $W > W_{\text{eff}}$ es considerado lateralmente sin restricciones

13.4.3. Fórmula de Barrass 3

Se utiliza la denominación Barrass 3 o B3 para esta fórmula para diferenciarla de las otras fórmulas en uso del mismo autor.

Barrass (2004) propuso la siguiente fórmula para determinar el valor máximo del squat S_{Max} para cualquiera de las tipologías de canales que es relativamente fácil de utilizar. La fórmula se obtuvo en base a más de 600 ensayos en laboratorio y mediciones en prototipo

Se determina S_{Max} (m) ya sea que se produzca en la proa o en la popa mediante el coeficiente de block C_B , la velocidad V_k en nudos y el factor de bloqueo del canal S (adimensional) mediante la siguiente fórmula:

$$S_{\text{Max}_{B3}} = \frac{K C_B V_k^2}{100}$$

El coeficiente K (adimensional) se define como:

$$K = 5.74S^{0.76}$$

Un valor del factor de bloqueo $S = 0,10$ corresponde a un río muy ancho, o sea, Tipo U. El valor de $K = 1$ y el denominador se mantiene en 100

Para canales Tipo R con un valor de $S = 0,25$ se tiene un valor de $K = 2$ y el denominador pasa a ser 50. Por lo tanto el efecto de K es modificar el denominador con valores entre 50 y 100..

Los límites de aplicación de la fórmula son:

$$1,10 < h/T < 1,40$$

$$0,10 < S < 0,25$$

13.4.4. Fórmula de Römisch

La fórmula de Römisch (1989) permite calcular el máximo squat sea por proa o por popa S

$$S = C_V C_F K_{\Delta T} T$$

donde los coeficientes C_V , C_F y $K_{\Delta T}$ se definen a continuación.

El coeficiente C_V se define como

$$C_V = 8 \left(\frac{V}{V_{cr}} \right)^2 \left[\left(\frac{V}{V_{cr}} - 0.5 \right)^4 + 0.0625 \right]$$

Para aguas de poca profundidad sin restricciones, la velocidad crítica del buque V_{cr} se define como

$$V_{cr} = 0.58 \left(\frac{hL}{TB} \right)^{0.125} \sqrt{gh}$$

Para squat por la proa, C_F se define como

$$C_F = \left(\frac{10C_b B}{L_{pp}} \right)^2$$

y $C_F = 1$ para squat por la popa. El coeficiente $K_{\Delta T}$ se define como

$$K_{\Delta T} = 0.155 \sqrt{\frac{h}{T}}$$

13.4.5. Fórmula de Yoshimura

El Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism de Japón (MLIT 2007) propuso la siguiente fórmula para el squat por proa como parte del *Design Standard for Fairways*. La fórmula fue desarrollada para aplicar en canales Tipo U típicos de Japón.

$$S_{b_p} = \left[\left(0.7 + 1.5 \frac{1}{h/T} \right) \left(\frac{C_B}{L_{pp}/B} \right) + 15 \frac{1}{h/T} \left(\frac{C_B}{L_{pp}/B} \right)^3 \right] \frac{V_e^2}{g}$$

En el 2007, Ohtsu and Yoshimura propusieron una pequeña modificación en el cálculo de la velocidad equivalente del buque V_s (m/s) incluyendo S para mejorar la predicción en canales Tipo R y Tipo C

$$V_e = \begin{cases} V_s & \text{U} \\ \frac{V_s}{(1-S)} & \text{R, C} \end{cases}$$

13.5. USO DE LAS DIFERENTES FORMULAS

Antes de utilizar alguna de las fórmulas propuestas debe recordarse que:

- todas las fórmulas generalizan el problema
- la mayoría de las fórmulas fueron desarrolladas para condiciones particulares y por lo tanto tienen límites de aplicabilidad

La Tabla 13.1 y la Tabla 13.2 indican las condiciones en las que pueden aplicarse cada una de las fórmulas. La Tabla 13.1 es una buena ayuda en el momento de elegir una fórmula

UNRESTRICTED SHALLOW WATER		RESTRICTED CHANNEL		CANAL	
CB ≥ 0.8	CB < 0.8	CB ≥ 0.8	CB < 0.8	CB ≥ 0.8	CB < 0.8
Barrass I + II 1.1 ≤ h/T ≤ 1.5	Barrass I + II 1.1 ≤ h/T ≤ 1.5	Barrass I + II 1.1 ≤ h/T ≤ 1.5	Barrass I + II 1.1 ≤ h/T ≤ 1.5	Barrass I + II 1.1 ≤ h/T ≤ 1.5	Barrass I + II 1.1 ≤ h/T ≤ 1.5
Eryuzlu/Hausser 1.08 ≤ h/T ≤ 2.75					
Eryuzlu et al 1.1 ≤ h/T ≤ 2.5		Eryuzlu et al 1.1 ≤ h/T ≤ 2.5			
Huuska 1.1 ≤ h/T ≤ 2.0	Huuska 1.1 ≤ h/T ≤ 2.0	Huuska/Guliev 1.1 ≤ h/T ≤ 2.0	Huuska/Guliev 1.1 ≤ h/T ≤ 2.0	Huuska/Guliev 1.1 ≤ h/T ≤ 2.0	Huuska/Guliev 1.1 ≤ h/T ≤ 2.0
ICORELS	ICORELS				
Millward 1990 6 ≤ L/h ≤ 12	Millward 1990 6 ≤ L/h ≤ 12				
Millward 1992 6 ≤ L/h ≤ 12	Millward 1992 6 ≤ L/h ≤ 12				
Nat. Ports Council 10 ≤ h ≤ 40 m					
Römisch 1.19 ≤ h/T ≤ 2.29	Römisch 1.19 ≤ h/T ≤ 2.29	Römisch 1.19 ≤ h/T ≤ 2.29	Römisch 1.19 ≤ h/T ≤ 2.29	Römisch 1.19 ≤ h/T ≤ 2.29	Römisch 1.19 ≤ h/T ≤ 2.29

Tabla 13.1 – Fórmulas aplicables de acuerdo las condiciones existentes (PIANC 1997)

Code ID	Configuration			Constraint								
	U	R	C	F_{nh}	C_B	B/T	h/T	h_T/h	L/B	L/h	L/T	
Barrass3 (2004)	Y	Y	Y		0.5 - 0.85		1.1 - 1.4					
Eryuzlu2 (1994)	Y	Y			≥ 0.8	2.4 - 2.9	1.1 - 2.5		6.7 - 6.8			
Huuska/Guliev (1976)	Y	Y	Y	≤ 0.7	0.6 - 0.8	2.19 - 3.5	1.1 - 2.0	0.22 - 0.81	5.5 - 8.5		16.1 - 20.2	
ICORELS (1980)	Y			≤ 0.7	0.6 - 0.8	2.19 - 3.5	1.1 - 2.0	0.22 - 0.81	5.5 - 8.5		16.1 - 20.2	
Römisch (1989)	Y	Y	Y			2.6	1.19 - 2.25		8.7		22.9	
Tuck (1966)	Y	Y	Y									

Yoshimura (1986)	Y	Y	Y		0.55 - 0.8	2.5 - 5.5	≥ 1.2		3.7 - 6.0		
Notes:											
1. Only h/T enforced for Römisch formula.											
2. Only Barrass3 and Römisch predict stern squat S_S explicitly.											
3. Others predict maximum squat, whether at bow or stern.											

Tabla 13.2 – Rangos de aplicación de las diferentes fórmulas (PIANC 2013)

Se debe recordar que:

- Todas las fórmulas son válidas para canales rectos con fondo plano y velocidades suscriticas ($F_{nh} < 1$)
- El tipo de vía navegable y coeficiente de block (C_B) deciden la fórmula adecuada
- Para el caso que se tenga buques con calados de proa y popa diferentes, en las ecuaciones se utiliza un calado promedio para el cálculo.
- La eslora entre perpendiculares y el coeficiente de block no se conocen en general para todos los buques. En ese caso esos parámetros se adoptan de la tabla de valores típicos dada en PIANC (1997)
- Deben respetarse los límites de h/T y L/h respectivamente
- El “squat” resultante será máximo en la proa para buques con C_B alto y para buques normales navegando cargados en aguas poco profundas no restringidas. Para buques de alta velocidad y $C_B < 0,7$ navegando en aguas restringidas Tipo R muy angostos o canales artificiales Tipo C, el máximo “squat” puede producirse en la popa.
- El asiento inicial (trim) tiene influencia en la ubicación del “squat” máximo

13.6. COMPARACION DE RESULTADOS

13.6.1. Análisis de PIANC WG 30

Se reproduce la información suministrada en PIANC (1997) Appendix C.

Se eligieron 3 buques cuyas características se dan en la Tabla 13.3 para comparar los resultados de aplicar las fórmulas apropiadas de la Tabla 13.1

Las Figuras 13,9, 13.10 y 13.11 muestran el “squat” por la proa resultante para aguas poco profundas no restringidas con una relación $h/T = 1,20$

Ship type	Lpp (m)	B (m)	T (m)	CB	L/T	L/B
250 000 tdw tanker	330	50	20	0.85	16.5	6.6
65 000 tdw bulk carrier	245	35	13	0.76	18.8	7.0
Panamax container vessel	270	32	12.5	0.60	21.6	8.4

Tabla 13.3 – Características de buques estudiados

En la Figura 13.9 para un buque tanque de 250.000 DWT navegando a una velocidad de 12 nudos la fórmula de Eryuzlu da $S_B = 0,76$ m y la fórmula de Millward da $S_B = 1,50$ m.

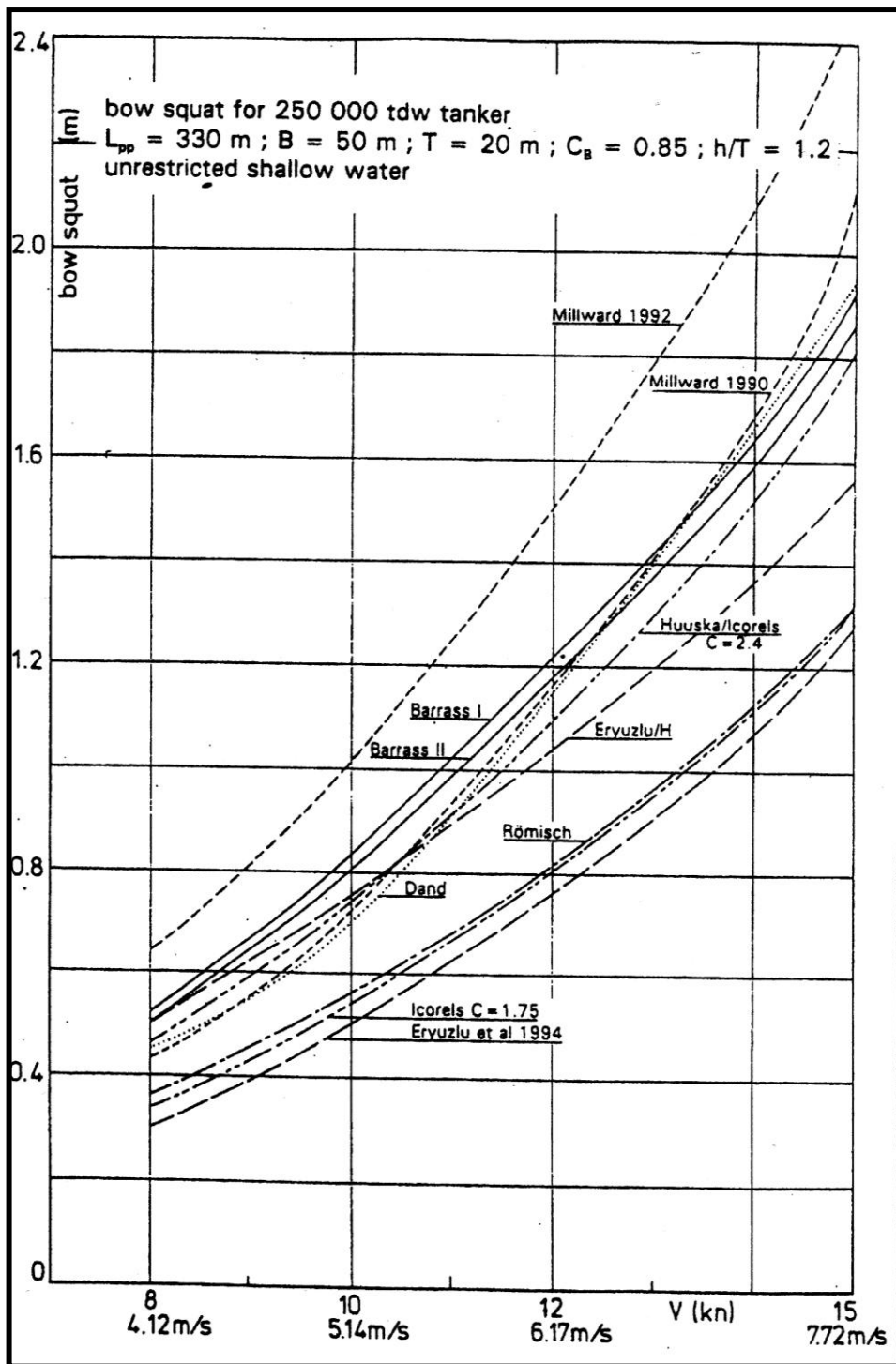


Figura 13.9 – Cálculo del squat con diferentes fórmulas – Buque Tanque

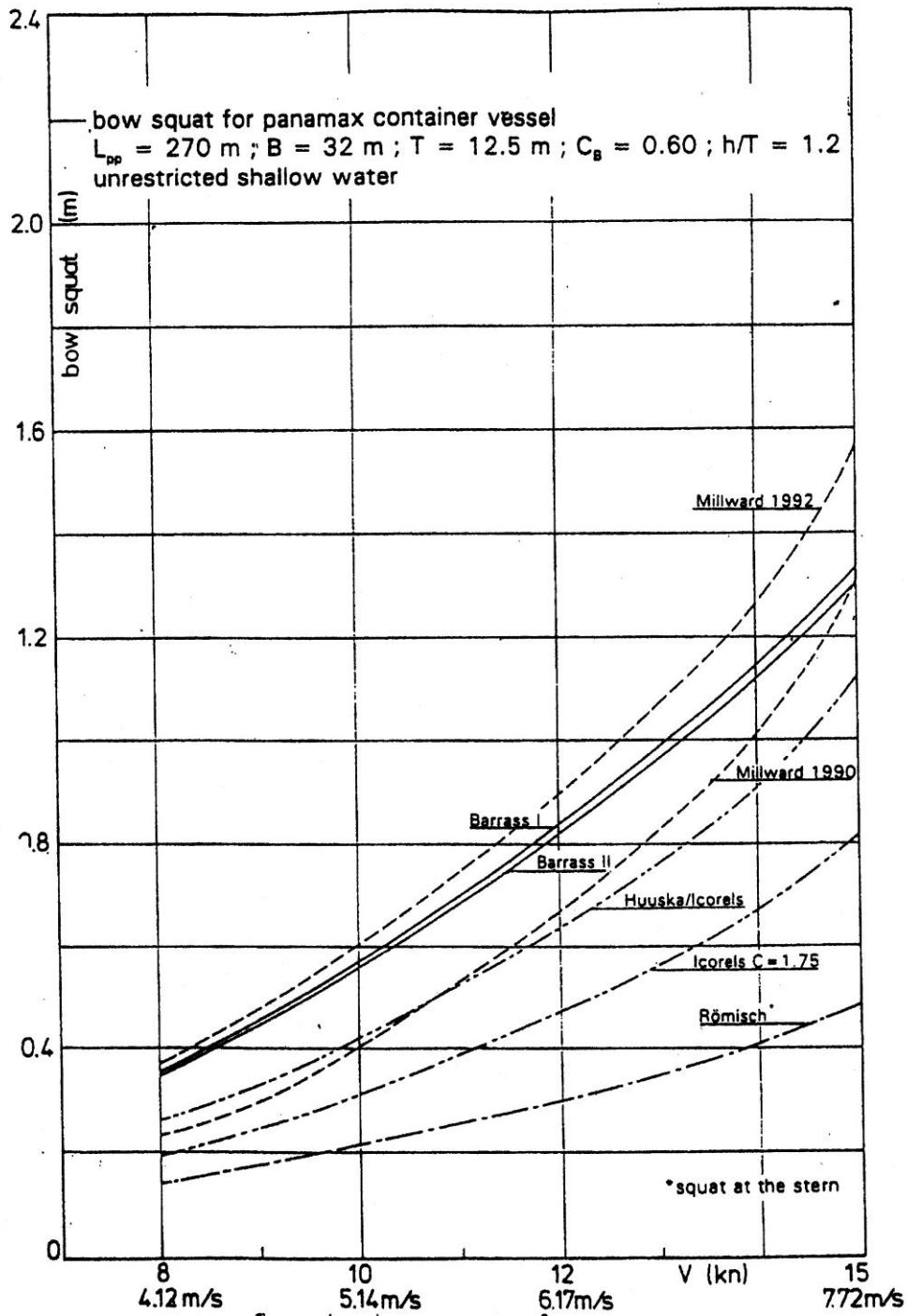


Figura 13.10 – Cálculo del squat con diferentes fórmulas – Buque portacontenedores tipo Panamax

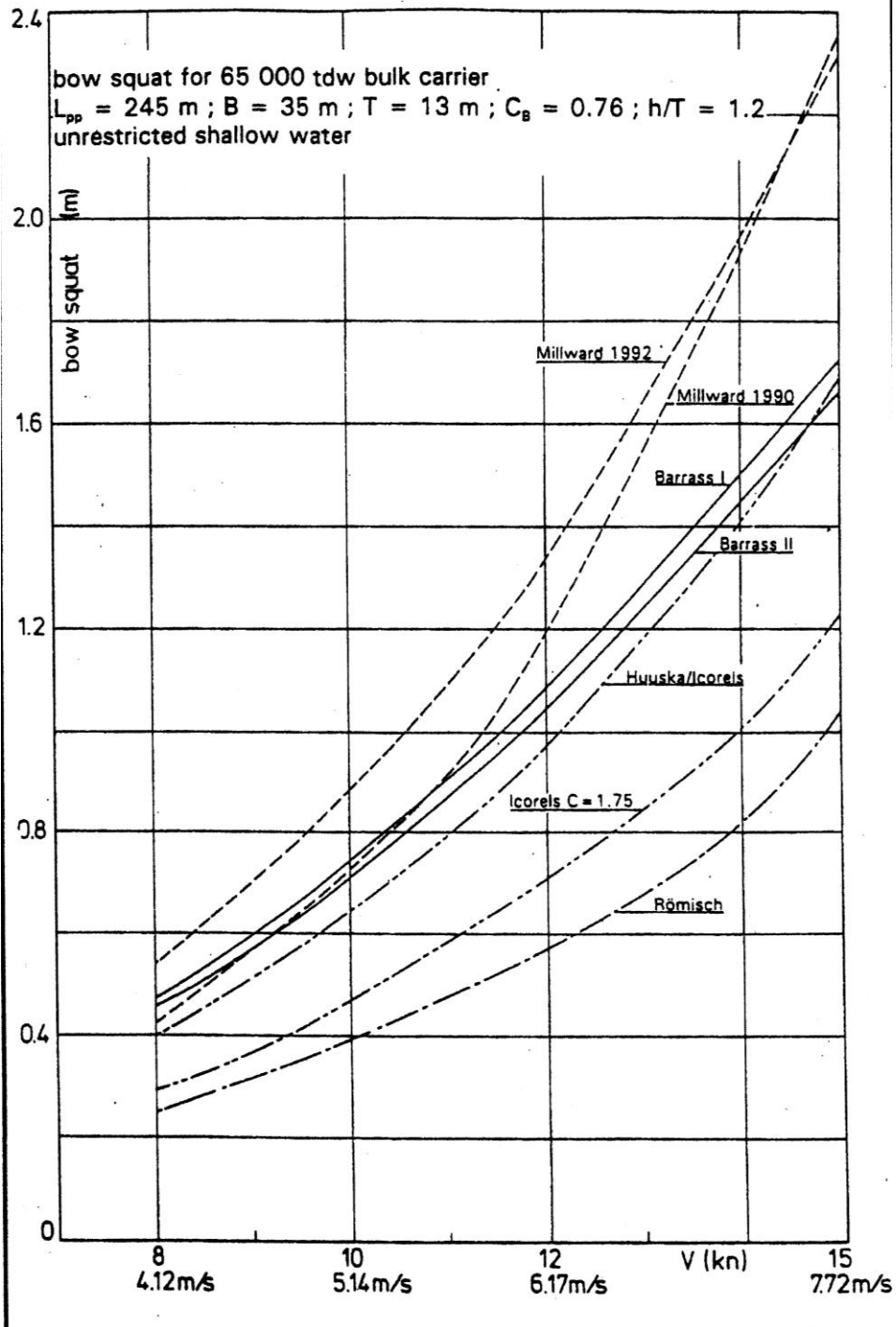


Figura 13.11 – Cálculo del squat con diferentes fórmulas – Buque granelero

13.6.2. Análisis de Demirbilek

Demirbilek, Z et al (1999) presenta un análisis de los resultados obtenidos mediante la aplicación de diferentes fórmulas. En ese documento refuerza el concepto de que hay muchas fórmulas diferentes para estimar el “squat”. El cálculo del squat en aguas poco profundas y en aguas restringidas es más complicado que su cálculo en aguas profundas. La Figura 13.12 presenta curvas que representan el valor del squat para un buque granelero, calculadas de acuerdo a 10 autores diferentes para $h/T=1,2$, o sea, aguas de poca profundidad.

Ecuaciones semejantes existen para canales Tipo R y canales Tipo C. En esas condiciones el “squat” es mayor que en aguas de igual profundidad pero no restringidas.

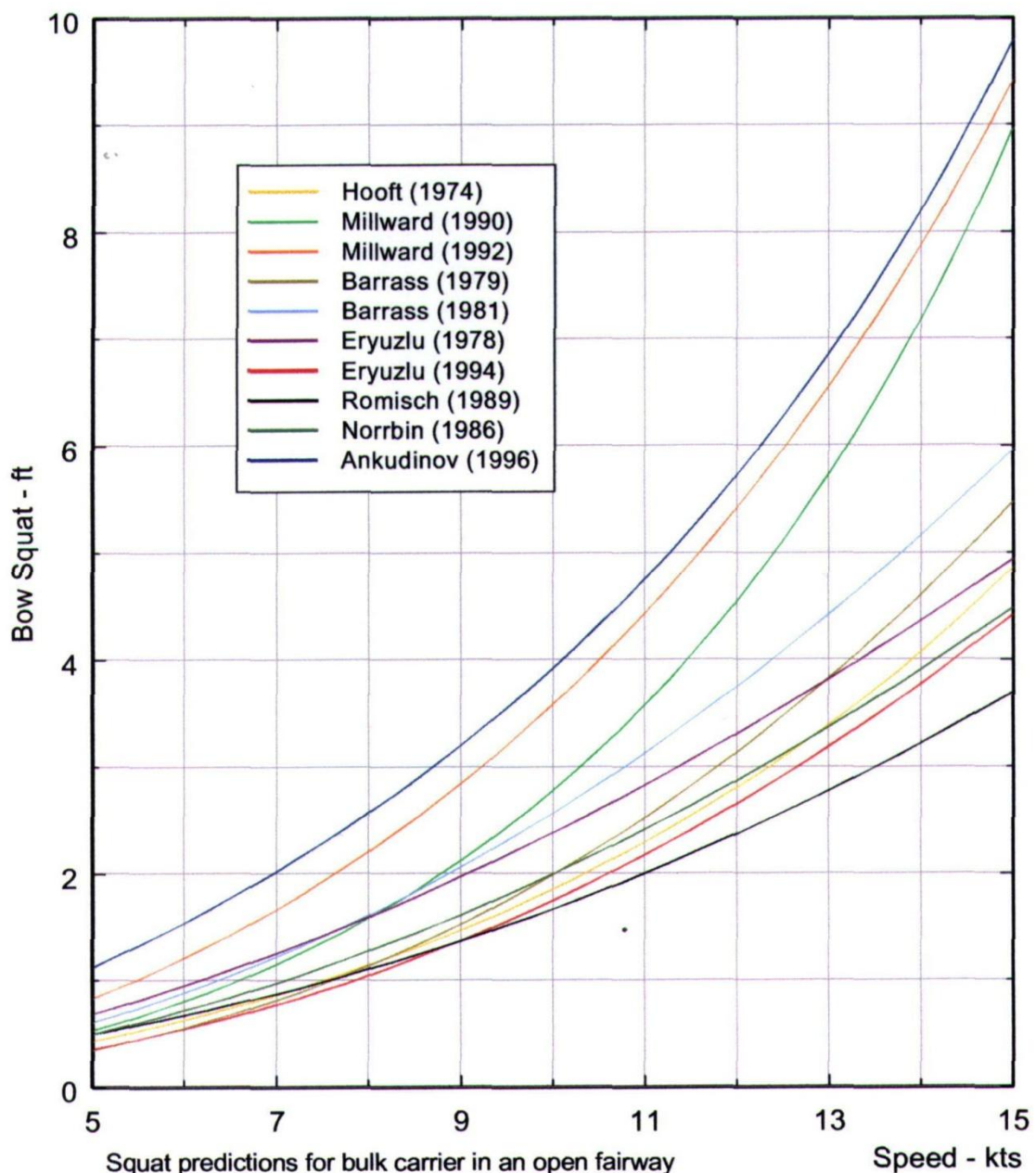
En general, el "squat" en aguas poco profundas es usualmente mayor que en aguas profundas.

Observando la Figura 13.12 se ve que para una velocidad de 10 nudos, el valor del "squat" varía entre 1,7 ft y 3,7 ft, o sea, una diferencia de 2 ft.

Para una velocidad de 15 nudos varía entre 3,7 ft y 9,8 ft, o sea, una diferencia de 6,1 ft. Esta diferencia de resultados podría limitar la velocidad del buque en 4/5 nudos si consideramos los valores extremos. El problema de los valores excesivamente conservadores es que si los elijo para el proyecto del canal me pueden resultar volúmenes de dragado innecesarios, y si los elijo para la operación del canal me puede determinar una reducción de la capacidad de transporte del mismo.

Bulk Carrier

$L_{PP} = 824$ ft, $B = 105.8$ ft, $T = 42$ ft, $h = 50.4$ ft, $C_B = 0.905$



13.7. EFECTOS ESPECIALES SOBRE EL SQUAT

Las fórmulas empíricas utilizadas para predecir el “squat” en aguas abiertas o restringidas están basadas en condiciones ideales donde un solo buque navega por el centro de un canal simétrico. La navegación de los buques en los canales del mundo real rara vez presentan esas condiciones tan simples.

Se va a analizar cómo se modifica el squat cuando se producen las siguientes situaciones:

- encuentro y sobrepaso entre buques
- proximidad del buque a los bancos sea porque no navega en el centro del canal o porque navega atravesado al eje
- aparecen cambios repentinos en la configuración de fondo del canal
- efecto de la navegación con deriva (drifting)
- efecto de fondos barrosos

13.7.1. Encuentro y sobrepaso de buques

El “squat” está causado por la velocidad del agua alrededor del casco. Si otro buque está cerca, este flujo se ve influenciado y también, por lo tanto, el “squat”. El efecto sobre el “squat” depende de varios factores:

- dirección y velocidad del otro buque
- tamaño del otro buque
- configuración de la vía navegable

No existe en la actualidad un método para calcular este efecto. Esta situación afecta el “squat” y también produce fuerzas laterales y momentos transversales (yawing). La solución para mantener la maniobrabilidad del buque es disminuir la velocidad y/o aumentar la separación lateral de los buques.

Hewlet, C et al. (2002) presenta un ejemplo interesante de cruce de dos buques portacontenedores en el estudio realizado en el Canal de Panamá

En la Figura 13.13 se aprecia que los buques presentan un squat por popa de unos 4 pies que aumenta a 8 pies después del encuentro con el otro buque. Por lo tanto 4 pies se le pueden asignar en este caso al efecto de cruce de buques.

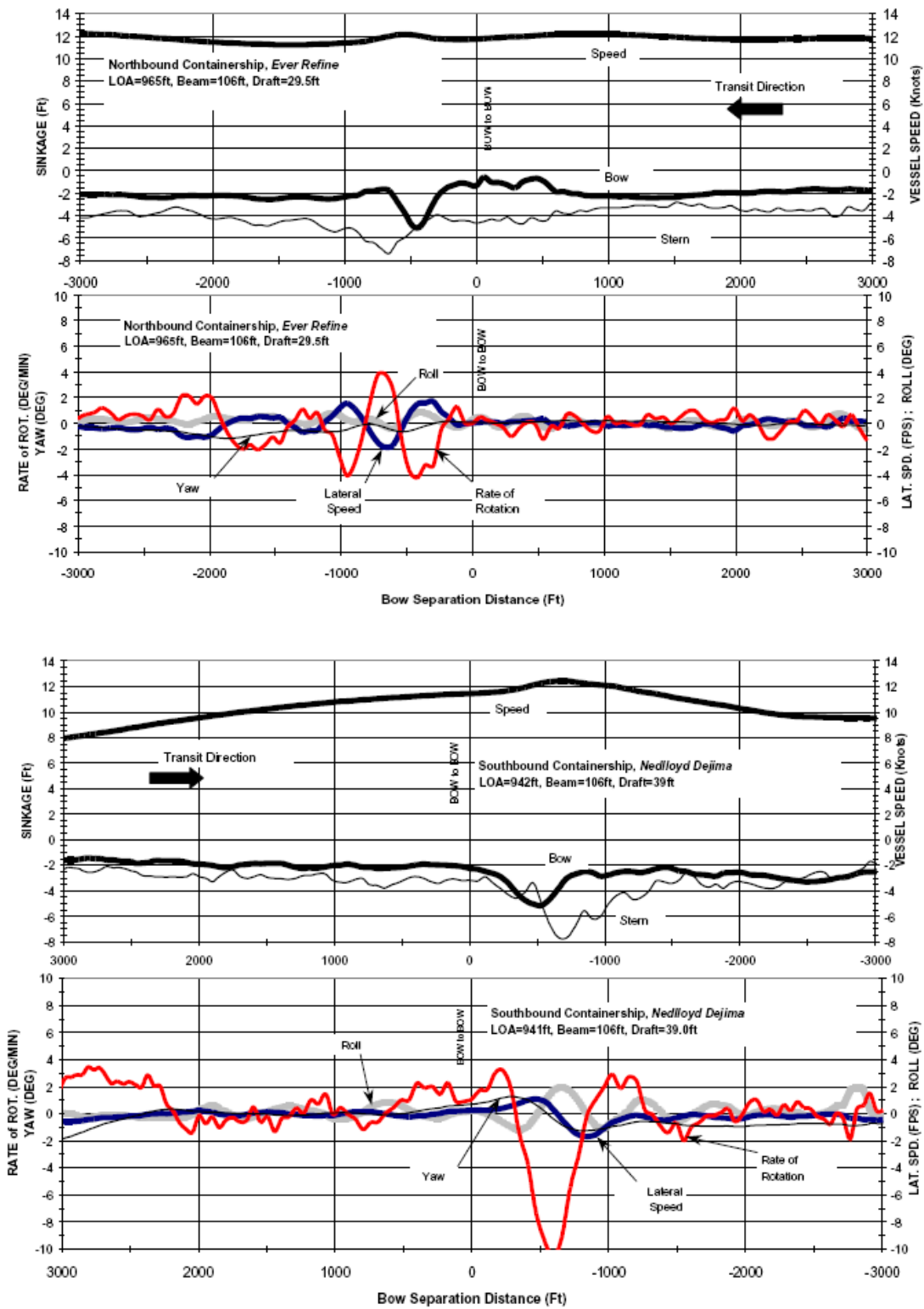


Figure 6 – Meeting/Passing, Panama Canal (Gamboa Reach) 12/16/1997

Figura 13.13 – Squat producido por encuentro de buques (Hewlett et al. 2002)

13.7.2. Proximidad de los bancos

Las fórmulas para canales de anchos restringidos Tipo R y canales artificiales Tipo C tienen en cuenta los efectos de los bancos en una forma indirecta, ya que se asume que el buque navega en el centro de la vía navegable. En muchos casos este supuesto es válido. Sin embargo, el "squat" aumenta si el buque navega más cerca del banco porque las presiones hidrodinámicas sobre el buque son afectadas por la presencia del banco.

Se produce un "squat" adicional por la presencia del banco si:

- la distancia entre el casco del buque y el pie del talud disminuye
- se reduce la relación h/T
- aumenta F_{nh}
- la cantidad de agua sobre el banco disminuye (esto es mas importante que la pendiente del banco)

En la Figura 13.14 se presenta, para una situación típica, una estimación del "squat" adicional para buques con $0,70 < C_B < 0,85$ y un asiento (static trim) $< 0,01 L$

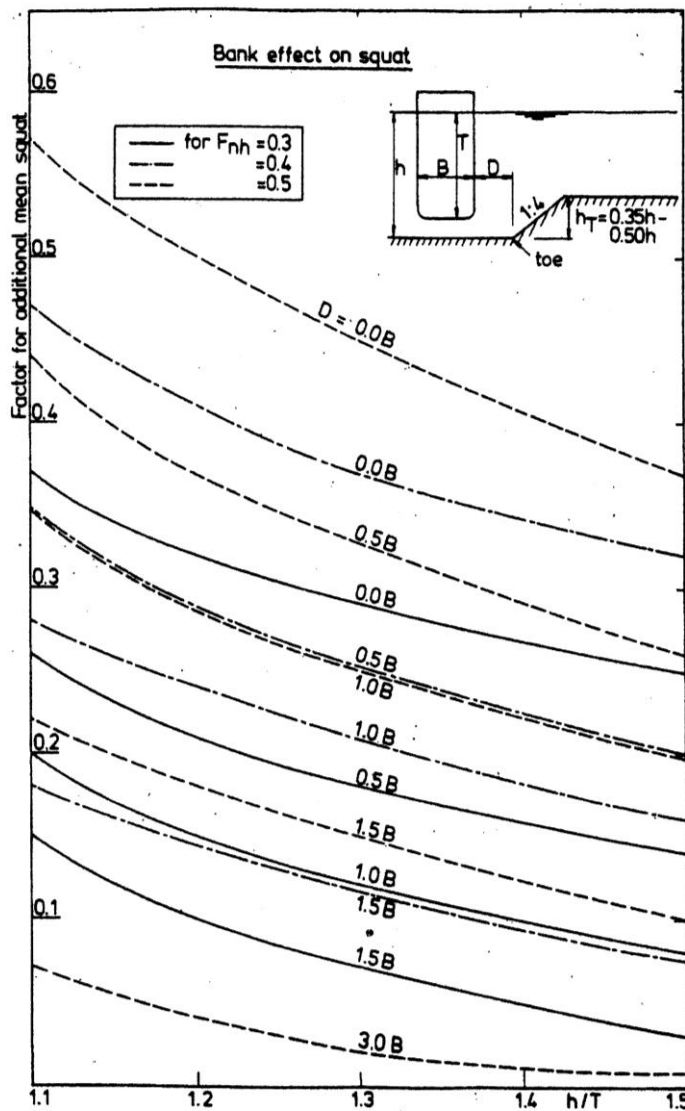


Figure C14 - Bank effect on squat
(National Ports Council, 1980)

Figura 13.14 – Efecto de los bancos sobre el squat (PIANC 1997)

h/T	Distance ship side to bank	
	0.5 B	B
1.1	47%	24%
1.2	25%	16%

Tabla 13.4 – Incremento del squat en función de la profundidad de agua y distancia al banco

El uso de la Figura 13.14 y de la Tabla 13.4 requiere el conocimiento del squat que se produce en condiciones normales, que es el valor medio del hundimiento de la proa. El “squat” adicional producido por el banco se toma como un porcentaje del “squat” medio y se agrega al hundimiento por la proa. Este valor adicional es despreciable si la distancia al banco es $>2B$ o $>3B$ dependiendo del F_{nh} (valores elevados de F_{nh} requieren mayor separación)

Es de destacar que en la versión PIANC WG49 (2013) no está incluida la Figura 13.14

Una forma de disminuir el hundimiento adicional es disminuyendo la velocidad del buque.

13.7.3. Configuración del fondo

Las formulas discutidas son válidas para condiciones uniformes caracterizadas por velocidad del buque constante y profundidad del agua constante. En canales naturales o parcialmente dragados pueden producirse variaciones importantes de la profundidad, produciendo fenómenos no uniformes transitorios de “squat”

Cuando la profundidad disminuye gradualmente la resistencia al avance del buque aumenta. Esto reduce la velocidad del buque y como resultado también se reduce el “squat”.

Por otra parte la situación deviene crítica cuando el buque pasa de aguas profundas a aguas poco profundas con un cambio abrupto de la profundidad. En este caso el buque puede ingresar en la zona de aguas poco profundas a toda velocidad lo que resulta en un “squat” muy significativo. Además, la transición entre dos estados uniformes puede estar caracterizada por oscilaciones violentas (cabeceo y heaving). Se recomienda que el $F_{nh} < 0,5$

El valor del “squat” no es sensible al tamaño de la zona de aguas poco profundas. Un escalón con un ancho de $0,3 L$ puede inducir un “squat” transitorio de la misma magnitud que un fondo plano de extensión infinita.

13.7.4. Efecto de la navegación con deriva

Es habitual que los buques naveguen en el canal con un cierto ángulo de deriva. Esta situación provoca un efecto sobre el squat. En la Figura 13.14 Bis se muestra el efecto que produce sobre el squat la deriva del buque. En la figura se indica el hundimiento para diferentes ángulos de deriva y diferentes velocidades. Para el caso

de un buque portacontenedor y una deriva de 10° aún con velocidades bajas el incremento del squat puede llegar a un 2 % del calado.

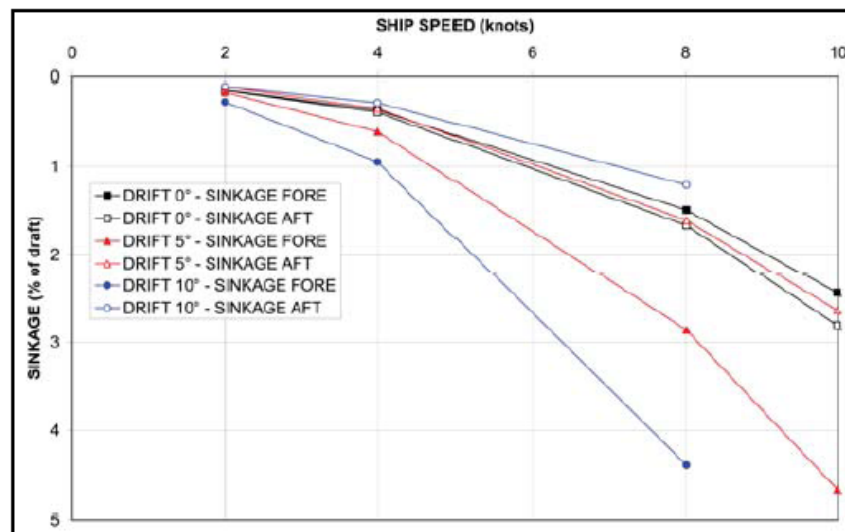


Fig. 15. Influence of drift angle on squat of a containership at constant speed in a rectangular channel of 565-m width with $h = 16$ m. Ship test specifications same as Fig. 14 (Vantorre and Dumon 2004).

Figura 13.14 Bis – Influencia de la deriva del buque en el squat

13.7.5. Incidencia de fondos barrosos

La presencia de fondos barrosos tiene efectos importantes sobre el squat. Este tema se ve en detalle en el desarrollo del Tema 14 de estos apuntes.

13.8. CALCULO DEL SQUAT MEDIANTE MODELACION NUMERICA

Briggs et al (2010) presenta una buena descripción del desarrollo de modelos numéricos para calcular el squat. Hay varios métodos numéricos que pueden utilizarse para este fin. El punto en común de todos los enfoques es que calculan la velocidad del flujo y la presión sobre el buque. Dependiendo si el fluido se modela como un fluido viscoso se puede utilizar una función potencial de velocidades o se pueden aplicar modelos de flujo mas sofisticados. Algunos modelos se basan en la teoría de cuerpos esbeltos mientras que otros métodos utilizados es la resolución mediante elementos finitos de frontera o elementos finitos. El crecimiento en la capacidad de computación a valores razonables hace que se produzcan avances importantes en estos desarrollos.

Los resultados obtenidos son promisorios y es probable que en no mucho tiempo más los modelos numéricos para calcular el squat sean más difundidos.

13.9. RECOMENDACIONES

La comparación del “squat” de acuerdo a las diferentes fórmulas muestra que se producen variaciones importantes entre los resultados que dan unas u otras. La relación entre los valores mas altos y los mas bajos está en el orden de 2. Por el momento, las razones de esas diferencias no son claras, por lo que no es posible recomendar un método para el cálculo. Sin embargo, se pueden dar los siguientes lineamientos:

Algunas fórmulas fueron desarrolladas para situaciones particulares, una configuración de una vía navegable específica, un rango limitado de profundidades de agua y/o un tipo específico de buque

Los cálculos realizados en forma sistemática muestran que algunas fórmulas dan valores altos (Milward) y otras dan valores bajos (Eryuzlu, Romisch). La fórmula ICORELS/Huuska presenta valores intermedios. Por esta razón se recomienda esta fórmula en la etapa de proyecto conceptual. Se debe tener en cuenta las eventuales consecuencias del contacto con el fondo para utilizar una fórmula “optimista” o una “pesimista”

Si los problemas debidos al “squat” se prevén en condiciones particulares o con un tipo especial de buque, entonces, se recomienda ejecutar ensayos sobre modelo físico. Es conveniente que los ensayos sean realizados con modelos auto-propulsados

13.10. PROPUESTAS PARA LINEAS DE INVESTIGACION FUTURAS

En la Figura 13.15 se presenta una comparación de resultados de la aplicación de diversas fórmulas con datos experimentales obtenidos por MARAD para squat por la proa. Los resultados son sorprendentes. Por ejemplo, a una velocidad de 10 nudos, con una revancha bajo quilla del 20 %, las ecuaciones de Millward que tienden a la sobreestimación resultan en un valor de S_B de 1 m; ICORELS da 0,75 m y Eryuzlu da 0,50 m. Los valores experimentales de MARAD dan un $S_B = 1,40$ m

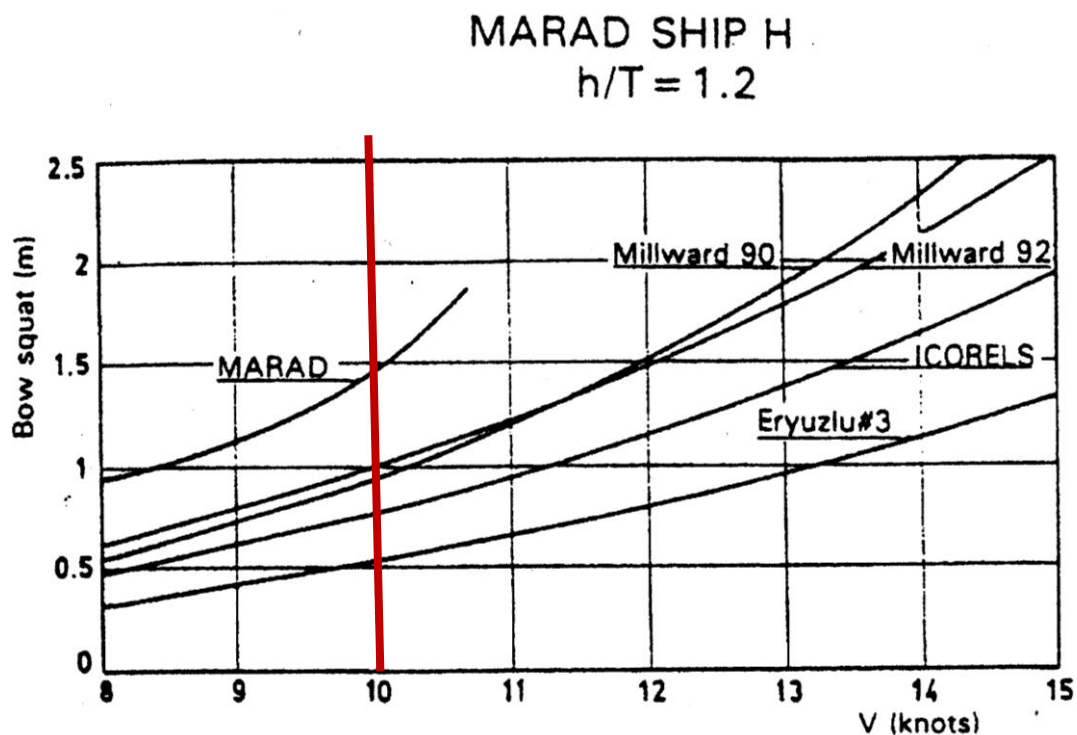


Figura 13.15 – Squat por la proa para el modelo de buque de MARAD: valores experimentales en comparación con fórmulas usuales (PIANC, 1997)

Se puede intentar explicar las diferencias mediante los siguientes comentarios:

1 - Los resultados experimentales y la fórmula de Millward están basados en ensayos con modelos de buques remolcados, mientras que los ensayos de Eryuzlu han sido realizados con modelos autopropulsados. Si el impacto de la auto-

propulsión del modelo es tan significativa esto implicaría que la credibilidad de muchos ensayos sobre modelos de estas características deben ser revisados.

2 – Una segunda explicación está vinculada con la geometría del buque. Es posible que los efectos del “squat” y particularmente el asiento dependan mucho de la geometría de la parte delantera del buque., o sea, del tipo de proa. Eryuzlu solamente adoptó buques con proas bulbo en consideración, mientras que MARAD utilizó buques con proas redondeadas o cilíndricas.

3 – Otros factores pueden ser de importancia: efectos de escala, diferente forma de analizar los datos de “squat”, falta de verificación por medio de mediciones en prototipo en condiciones comparables.

13.10.1. Propuestas de mediciones

Dado que los resultados que se obtienen a partir de la aplicación de diferentes fórmulas difieren significativamente es necesario validar estos métodos con mediciones en prototipo. Si se esperan efectos especiales para un canal dado la necesidad de realizar mediciones (in situ o en modelo) son aún mayores. Este tema se desarrolla en el parágrafo 13.12

13.11. DETERMINACIÓN DEL SQUAT EN MODELOS FÍSICOS

El Tema “Modelos Físicos en Puertos y Vías Navegables” se desarrolla en el Tema 20 de estos apuntes. Para la determinación del squat los modelos físicos han sido y son una herramienta de investigación fundamental. Los avances en electrónica, computación y comunicaciones realizados en los últimos años han permitido desarrollar instrumentos de medición de gran sofisticación redundando en grandes beneficios en los resultados obtenidos en ensayos sobre modelos físicos

Los modelos físicos de este tema no son fáciles de realizar. Se mencionan algunos de los inconvenientes que se presentan en la realización de estos estudios.

La escala de longitudes debe ser cuidadosamente elegida. Por un lado se trata de representar buques de más de 300 m de eslora. Con una escala 1:100 resultan modelos de más de 3 m de longitud, o sea, modelos importantes. Por otra parte se quiere medir el squat que tiene valores del orden de 1 a 2 m lo que llevado al modelo significa 1 a 2 cm. Esto significa que los mm son importantes en la medición. Para ello deben utilizarse instrumentos y procedimientos muy sofisticados para lograr buenos resultados.

Es muy interesante leer los informes de laboratorio sobre el instrumental de medición utilizado y los resultados obtenidos para apreciar las dificultades que el tema implica.

El buque no solo tiene que estar bien representado en la escala de longitudes sino que debe comportarse adecuadamente frente al campo hidrodinámico. En general, esto significa representar bien los aspectos dinámicos y la distribución de pesos en el modelo.

La propulsión del buque es todo un tema ya que diferentes sistemas de propulsión dan diferentes resultados.

Una vez que se cuenta con un buen modelo de buque el Laboratorio trata de utilizarlo lo más posible pues no es fácil contar con muchos modelos diferentes. Por

eso es habitual ver diferentes estudios de un laboratorio donde se ha utilizado el mismo buque. Un ejemplo se aprecia en el ejemplo desarrollado en el numeral 13.13.1 donde para simular un buque portacontenedores se alargó un modelo existente aunque el C_B no quedó adecuadamente representado.

Vistas las dificultades mencionadas para obtener buenos resultados de las mediciones sobre modelos físicos es entendible que los buenos resultados son citados repetidas veces en la literatura especializada.

13.11.1. Laboratorios de Hidráulica que realizan estudios sobre squat

Los ensayos sobre modelos físicos se realizan en los denominados Laboratorios de Hidráulica que son centros de investigación de larga y reconocida trayectoria en temas específicos. Es muy habitual relacionar el Laboratorio con alguno de los investigadores asociados al tema.

Se mencionan a continuación algunos de los investigadores reconocidos a nivel internacional y los laboratorios donde desarrollan sus trabajos y sus datos de contacto. La lista es incompleta pero se presenta a título indicativo

*Michael J. Briggs
Coastal and Hydraulics Laboratory
US Army Engineer Research and Development Center
3909 Halls Ferry Road, Vicksburg, MS 39180-6199, USA
michael.j.briggs@usace.army.mil*

*Marc Vantorre
Ghent University, IR04, Division of Maritime Technology
Technologiepark Zwijnaarde 904, B 9052 Gent, Belgium
marc.vantorre@ugent.be*

*Klemens Uliczka
Federal Waterways Engineering and Research Institute
Hamburg Office, Wedeler Landstrasse 157
D-22559 Hamburg, Germany
klemens.uliczka@baw.de*

*Pierre Debaillon
Centre d'Etudes Techniques Maritimes Et Fluviales
2 bd Gambetta, BP60039, 60321 Compiègne, France
pierre.debaillon@equipement.gouv.fr*

13.12. MEDICION DE LOS MOVIMIENTOS VERTICALES DEL BUQUE EN PROTOTIPO

Una tendencia que se ha dado en forma reciente es realizar mediciones en buques navegando en canales de acceso y comparar los valores obtenidos con los que resultarían de la aplicación de las diversas fórmulas en uso.

Se hacen a continuación algunos comentarios al respecto y se citan algunos de los trabajos recientes. Se sugiere la lectura de los mismos a aquellos interesados en la realización de mediciones en prototipo.

La medición de los movimientos verticales del buque es un proceso complejo mediante el cual se obtiene el desplazamiento vertical del buque producido por todos los factores que influyen en el desplazamiento vertical. Por ello, a los efectos de diferenciar el desplazamiento vertical producido por los movimientos del buque generados por el oleaje del desplazamiento vertical producido por la velocidad del buque (squat) se recurre a tratamiento de la información obtenida de las mediciones directas. Al realizar las mediciones se 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 de niveles 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 más 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.

Los métodos recientes de medición del squat se basan en utilizar 4 transductores GPS de doble frecuencia en modo cinemático determinando los cambios en la altura elipsoidal entre los transductores ubicados sobre el buque y en la costa. Se puede obtener precisión diferencial con post-procesamiento de los datos. Con este procedimiento se pueden obtener precisiones del orden de 1 a 3 cm.

Esta técnica requiere que la información se registre en forma simultánea en los receptores. Uno de los receptores se ubica en la costa como estación base en un

punto de control de coordenadas conocidas. Es necesario que como mínimo haya cuatro satélites en el horizonte

Este procedimiento requiere que un equipo de tres personas suba al barco e instale tres antenas de GPS en la proa y a ambos costados del puente. El proceso toma alrededor de diez a quince minutos.

Hewlett, C. et al.(2002) destacan que la aplicación del método en la última década fue mejorando progresivamente por la mayor disponibilidad de satélites y desarrollos en hardware y software. Con estas técnicas de medición permite determinar el comportamiento total del buque en aguas restringidas.

Briggs et al. (2001) 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

No debe olvidarse la importancia de hacer correcciones debido a la variación de la altura de agua y medir con precisión la batimetría.

Briggs et al. (2004) 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.

Se eligió el Puerto de Charleston para este estudio porque el canal de acceso es relativamente largo y expuesto al oleaje en la mayor parte de su recorrido. El canal de dos manos tiene 21 km de longitud, 244 m de ancho y 12,80 m (42 ft) de profundidad (MLLW)

El procedimiento operativo fue embarcar y desembarcar con el práctico. Para los buques salientes el equipo de medición debía retirarse antes de la finalización del canal de manera que la gente encargada de la medición pudiera desembarcar con el práctico. En los buques entrantes el buque ya se encontraba en el canal antes que todos los GPS estuvieran recolectando datos. En general los viajes entrantes suministraron mayor cantidad de información que los viajes salientes.

Los buques de mayor interés eran buques portacontenedores y buques graneleros con esloras superiores a los 213 m. Se monitorearon en total 18 buques

Las conclusiones y recomendaciones del estudio mencionado establecen que la evaluación del squat utilizando técnicas de GPS es una mejora muy significativa con respecto a técnicas utilizadas con anterioridad. El uso del GPS provee no solo posiciones precisas horizontales y verticales sino también un medición precisa de la

velocidad del buque, tema este que ha sido una limitante severa en otros estudios realizados.

En general, los gráficos de la velocidad muestran variaciones significativas de la velocidad del buque a lo largo del tramo recorrido.

Otro problema que perturbó los resultados de estudios realizados previamente fue la determinación con precisión de los niveles de agua y la velocidad de la corriente existente a lo largo de la trayectoria del buque

Otro aspecto a tener en cuenta es si el buque carga o descarga agua de lastre. Obviamente, un cambio en el calado del buque puede en forma inadvertida afectar los valores observados de squat.. Es de fundamental importancia discutir estos aspectos con el capitán y el práctico y controlar las operaciones del buque entre el momento en que se realizan las mediciones con el buque detenido y el momento en que se realizan las determinaciones de squat..

Cuando se realiza la comparación de resultados obtenidos mediante la medición del squat con valores obtenidos por la aplicación de fórmulas empíricas se debe elegir los lugares donde se van a aplicar las fórmulas de manera tal que la sección transversal en ese tramo sea relativamente uniforme ya que las fórmulas son solamente válidas en ese tipo de situaciones.

Durante la ejecución de las mediciones con GPS debe solicitarse al capitán del buque que trate de mantener la velocidad lo más constante posible en las secciones del canal elegidas que deben ser aquellas que tengan secciones transversales aproximadamente constantes. La falta de una velocidad constante en estos tramos significó tener que descartar del análisis un número considerable de las mediciones efectuadas en el Puerto de Charleston

La determinación del squat utilizando GPS es una mejora significativa en comparación con otras técnicas utilizadas previamente. El GPS suministra no solamente la posición vertical y horizontal con precisión sino que además da una medición precisa de la velocidad del buque cuya determinación era un problema en estudios previos. Los gráficos de velocidad muestran variaciones de velocidad significativas durante el tránsito. Un problema muy frecuente en estudios previos y también en este estudio es la determinación precisa de los niveles de agua y la velocidad de la corriente en la traza del barco.

La comparación entre valores de squat medidos y calculados presentó resultados variados. Las fórmulas de Barrass y Huuska dieron valores sobreestimados pero se considera este hecho positivo ya que los resultados son conservadores. La fórmula de Romisch dio buenos resultados tanto para el squat de proa como de popa siendo las estimaciones de squat por la popa la mejor de las cuatro fórmulas utilizadas. Se atribuye este comportamiento al hecho de tener incorporada la relación h/T en la fórmula y probablemente este parámetro es importante en los canales Tipo U utilizados en el análisis del Puerto de Charleston.

Moes, H. (2004) presenta las mediciones realizadas sobre buques y el análisis de las mismas para el canal de acceso al Puerto de Richards Bay en Sudáfrica

Harting, A. et al. (2002) presenta una propuesta para utilizar un barco escolta de pequeña magnitud que lleve la cuarta estación de GPS de referencia y de ese modo

evitar los problemas con la determinación de los niveles de agua. El método propuesto se denomina SHIPS y se ilustra en la Figura 13.16



Fig. 1: Schematic representation of the SHIPS - measuring method for static conditions



Fig. 2: Schematic presentation of the SHIPS - measuring method for dynamic conditions

Figura 13.16 – Método SHIPS

Morse, B et al. () “Ship squat in shallow and confined channels – The Canadian experience” mencionan el caso de la vía navegable del Río San Lorenzo aguas arriba de Montreal donde entre 1959 y el año 2000 se logró incrementar el calado permitido de 6,85 m a 8,0 m. Para lograr este objetivo se realizaron estudios de squat en 33 buques junto con la manera de realizar la medición de los niveles de agua y las batimetrías. El resultado fue la determinación de una nueva fórmula empírica aplicable a esta situación.

13.13. EJEMPLO DE CALCULO DE SQUAT

Se presentan ejemplos de cálculo del squat aplicando diversas fórmulas y comparando los resultados con ensayos sobre modelo físico. (Briggs, 2008)

13.13.1. Buque Portacontenedores Post Panamax - Canal Tipo U

Las características del buque y del canal se presentan en la Tabla 13.5

El ensayo sobre modelo físico fue realizado en el BAW

Se toma una velocidad del buque $V_k = 13,3$ nudos. Con esta velocidad los resultados del ensayo sobre modelo físico dan $S_b = 0,70$ m

Las dimensiones del buque son semejantes a los Emma Maersk pero con un C_B mayor. Este C_B no se ajusta a la realidad para los buques portacontenedores de nueva generación que tienen en general $C_B < 0,7$ Esta situación surge por el hecho de haber utilizado un modelo de buque existente en el laboratorio aumentando su eslora. Un valor razonable de C_B para un buque de estas características sería 0,62

La Figura 13.17 muestra la comparación de los resultados obtenidos de la aplicación de las fórmulas de Barrass, Eryuzlu, Huuska, ICORELS, Rómisch, y Yoshimura con los valores medidos en laboratorio.

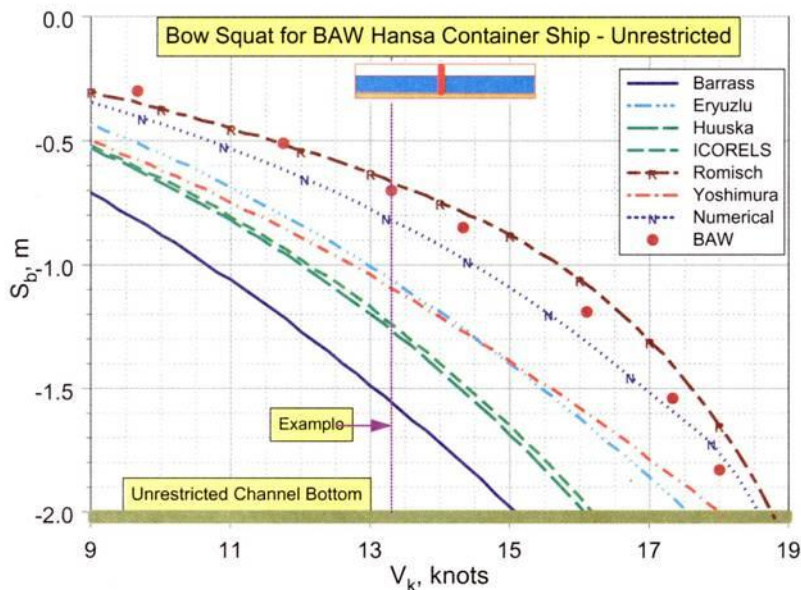


Figura 13.17 – Comparación de mediciones en modelo en BAW con fórmulas empíricas y modelo numérico para un buque portacontenedores Post Panamax en canal tipo U (Briggs 2010)

Se incluyen también los resultados de aplicar un modelo numérico descrito en el párrafo 13.8

En general los mejores resultados se obtienen mediante las formulas de Yoshimura y Eryuzlu que dan resultados ligeramente conservadores, o sea, mayores que los medidos. La fórmula de Rómisch da valores ligeramente menores que los medidos pero sigue muy bien la tendencia.

L_{pp} (m)	B (m)	T (m)	C_B	h (m)
400	50	17	0,84	19

Tabla 13.5 – Modelo de buque portacontenedores Post Panamax BAW Canal Tipo U

13.13.1.1. Verificación de restricciones

El primer paso consiste en la verificación del rango de aplicación de las diferentes fórmulas de acuerdo a lo indicado en la Tabla 13.2 con respecto a los valores del problema indicados en la Tabla 13.3

$$Fn_h = \frac{Vs}{\sqrt{gh}} = \frac{6,84}{\sqrt{9,81 \times 19}} = 0,50$$

El resultado $F_{nh} < 0,70$ nos habilita a la aplicación de todas las fórmulas

El coeficiente de block $C_B = 0,84$ es aceptable para la aplicación de todas las fórmulas pero excede ligeramente el valor superior de la fórmula de Huuska de $C_B < 0,8$

La relación $B/T = 50/17 = 2.94$, excede ligeramente los criterios de Eryuzlu y Römisch.

A continuación, $h/T = 19/17 = 1.12$ es aceptable, pero con un valor mínimo de UKC.

La relación $L_{pp}/B = 400/50 = 8.0$ es mayor al límite superior de Eryuzlu de 6.8.

Finalmente $L_{pp}/T = 400/17 = 23.53$ es ligeramente mayor que los límites superiores de Huuska and Römisch.

Como conclusión del análisis efectuado puede deducirse que para este caso es aceptable utilizar las diferentes fórmulas propuestas. Debe recordarse, sin embargo, que el buque en estudio es de un tamaño mucho mayor que los utilizados para deducir las fórmulas indicadas.

13.13.1.2. Fórmula de ICORELS

Esta fórmula es una elección lógica para un canal Tipo U y fue una de las primeras fórmulas desarrolladas.

A los efectos de estimar el squat S_b mediante la fórmula de ICORELS se deben realizar dos pasos.

Paso 1: Se calcula el desplazamiento del buque

$$\nabla = C B L_{pp} B T = 0.84(400)(50)(17) = 285,600 \text{ m}^3$$

Paso 2: Se substituye este valor de desplazamiento en la ecuación

$$S_b = C_s \frac{\nabla}{L_{pp}^2} F n h^2 / \sqrt{1 - F n h^2}$$

$$S_b = 2,4 \frac{285,000}{400^2} \frac{0,5^2}{\sqrt{1 - 0,5^2}} = 1,24 \text{ m}$$

El valor obtenido por la fórmula es muy alto comparado con el valor medido de $S_b = 0,70 \text{ m}$

13.13.1.3. Fórmula de Yoshimura

Esta es una buena fórmula para aplicar en la etapa de diseño conceptual. Se realiza el cálculo en forma directa reemplazando los valores dato del problema en la fórmula y se obtiene $S_b = 1,10 \text{ m}$ Da un resultado conservador con respecto al valor medido

13.13.1.4. Fórmula de Eryuzlu

El primer paso es calcular el factor de corrección para el ancho del canal K_b . Como en este caso estamos considerando un Canal Tipo U sin restricción lateral corresponde elegir un valor de $K_b = 1$ ya que se considera que la primera parte de la ecuación es solamente para canales Tipo R

El segundo paso es reemplazar los valores dato en la fórmula para S_b obteniendo un resultado de $S_b = 1,06$ m. Este valor es mayor que el valor medido y similar al obtenido mediante la fórmula de Yoshimura

13.13.1.5. Fórmula de Römisch

Esta es probablemente la fórmula mas complicada de todas las fórmulas empíricas recomendadas por PIANC. Se resuelve a través de cinco pasos.

Paso 1: Calcular los coeficientes requeridos para estimar la velocidad crítica V_{cr} en un canal Tipo U. Debe calcularse la celeridad C y el factor de corrección K_u

$$C = \sqrt{gh} = \sqrt{9,81 \times 19} = 13,65 \frac{m}{s}$$

$$K_u = 0,58 \left[\left(\frac{h}{T} \right) \left(\frac{L_{pp}}{T} \right) \right]^{0,125} = 0,58 [(1,12)(8,0)]^{0,125} = 0,76$$

Paso 2: Calcular C_v , factor de corrección para la velocidad del buque

$$C_v = 8 \left(\frac{6,84}{10,41} \right)^2 \left[\left(\frac{6,84}{10,41} - 0,5 \right)^4 + 0,0625 \right] = 0,22$$

Paso 3: Calcular C_F factor de corrección de la forma del buque

$$C_F = (10C_B/L_{pp}/C_B)^2 = (10 \times 0,84/8,0)^2 = 1,10$$

Paso 4: Calcular $K_{\Delta T}$ factor de corrección para squat a la velocidad crítica

$$K_{\Delta T} = 0,155 \sqrt{(h/T)} = 0,155 \sqrt{1,12} = 0,16$$

Paso 5: Substituir los valores calculados en la ecuación para S_b

$$S_b = C_v C_F K_{\Delta T} T = 0,22 \times 1,10 \times 0,16 \times 17 = 0,67 \text{ m}$$

El valor obtenido, aunque ligeramente menor al valor medido, es una excelente aproximación.

13.14. BIBLIOGRAFIA

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/>

Briggs, M; Maynard, S; Nickles, C; and Waller, T. (2004) "Charleston Harbor Ship Motion Data Collection and Squat Analysis" ERDC/CHL CHETN-IX-14 March 2004 – Este trabajo documenta la recolección de datos de campo de movimientos del buque utilizando GPS en el Puerto de Charleston en Abril 1999. Se realiza una comparación y discusión del squat medido en prototipo con diferentes formulas conocidas para la predicción del squat.

Briggs, M., Vantorre, M., Uliczka, K., and Debailon, P. (2010) “Prediction of squat for Underkeel Clearance” Chapter 26 del Handbook of Coastal and Ocean Engineering edited by Young C Kim World Scientific Publishing Co. pp 723 - 774

Demirbilek, Zeki and Sargent, Frank (1999) “Deep-Draft Coastal Navigation Entrance Channel Practice”, Coastal Engineering Technical Note I-63, USACE

Eryuzlu, N. E. et al. (1998) “Underkeel requirements for large vessels in shallow waterways” PIANC – 24th International Navigation Congress – Seville – 1998 – Section II-2 – pp17-26

Harting, A. et al. (2002) “SHIPS: A new method for efficient Full Scale Ship Squat Determination”, Paper S10B P151, PIANC 2002, 30th International Navigation Congress

Hewlett, C. Daggett, L. Stocks, D. Ankudinov V. y Taschereau, A. (2002) “Dynamic squat and UKC of ships in confined channels” Paper S10BP152 PIANC 2002, 30th International Navigation Congress

Moes, H (2004) “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, presented at 2. Squat-Workshop 2004, Elsfleth/Oldenburger (Germany)

Morse, B; Michaud, S.; Taschereau, A.; and Santerre, R. () “Ship squat in shallow and confined channels – The Canadian experience”

PIANC (1985) “Underkeel clearance for large ships in maritime fairways with hard bottom” – Supplement to Bulletin N° 51 – 1985

PIANC (1997) “Approach channels – A guide for design”. WG 30 Supplement to Bulletin Nro. 95 – June 1997 – pag 17 y Appendix C – pp73-89

PIANC (2014) “Harbour Approach Channels Design Guidelines” PIANC Report N° 121 (Originalmente se denominó WG 49) App D

www.ship-squat.com Sitio web del Dr. Bryan Barrass donde presenta mucha información valiosa sobre el tema