

EL FENOMENO SQUAT EN AREAS DE PROFUNDIDAD VARIABLE Y LIMITADA (1)

Autores:

Miguel Angel Herreros Sierra
Ricardo Zamora Rodríguez
Luis Pérez Rojas

Descripción:

El trabajo presenta una introducción al fenómeno squat, ofreciendo unas propuestas lineales y no lineales de evaluación de squat en aguas tranquilas para las etapas previas de proyecto, contrastadas con las fórmulas más conocidas y que se indican en una tabla adjunta, añadiendo una primera consideración sobre el efecto dinámico de la variación topográfica del fondo en la vía de navegación. Todo ello es parte de la investigación que está siendo desarrollada por los autores, con el objetivo final de determinar el efecto dinámico que se produce al navegar sobre aguas de profundidad variable.

Miguel Angel Herreros Sierra
Ingeniero Naval

Profesor Titular de Escuela Universitaria. Departamento de Enseñanzas Básicas de la Ingeniería Naval. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales de Madrid. Universidad Politécnica de Madrid.

Ricardo Zamora Rodríguez
Dr. Ingeniero Naval

Profesor Titular de Universidad. Departamento de Enseñanzas Básicas de la Ingeniería Naval. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales de Madrid. Universidad Politécnica de Madrid.

Luis Pérez Rojas
Dr. Ingeniero Naval

Profesor Titular de Universidad. Departamento de Arquitectura y Construcción Naval. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales de Madrid. Universidad Politécnica de Madrid.

Areas de Interés:

Hidrodinámica, Maniobrabilidad, Métodos Numéricos

EL FENOMENO SQUAT EN AREAS DE PROFUNDIDAD VARIABLE Y LIMITADA (1)

El presente trabajo es una primer acercamiento al fenómeno squat, que incluye una propuesta de evaluación de squat en aguas tranquilas para las etapas previas de proyecto contrastada con las fórmulas más conocidas, que forma parte de la investigación desarrollada por los autores, con el objetivo final de determinar el efecto dinámico que se produce al navegar sobre aguas de profundidad variable.

Los ensayos sobre modelos autopulsados se realizaron en el Laboratorio de Dinámica del Buque del Canal de Experiencias Hidrodinámicas de El Pardo en Madrid (CEHIPAR), mediante un proyecto, financiado en su totalidad por la Unión Europea, dentro del programa “Access to Large Scale Facilities”. El sistema de medida de los movimientos empleado es el KRYPTON, que mediante triangulación óptica permite una toma de datos sin contacto.

Los ensayos se realizaron con dos modelos correspondientes a un buque de formas llenas y $C_B=0.82$ y otro fino de $C_B=0.61$, tanto en aguas tranquilas como con olas regulares de proa, con diferentes configuraciones de fondo, plano y con obstáculos de sección trapezoidal de diferente pendiente.

1. Introducción

Es de antiguo conocido¹ el fenómeno del incremento de calado y asiento en los buques en su navegación por canales estrechos y aguas someras, incluso todo buque por el hecho de navegar a una cierta velocidad en aguas libres (sin restricción vertical ó lateral) experimenta un “hundimiento” respecto a su posición de reposo, despreciable en este caso. Pero durante mucho tiempo este hecho ha sido ignorado por su escasa importancia y tal vez por su incompleto conocimiento.

Es posible definir el fenómeno squat de formas diversas, pero quizás la más clara y sencilla es la empleada por Tuck y Taylor^[**]²:

Squat es el cambio de calado y trimado de un buque que se produce como resultado de las variaciones de presión hidrodinámica sobre el casco del buque, en su movimiento en aguas de cualquier profundidad.

¹Ya Scott Russell en 1845 observó cuidadosamente el comportamiento de las gabarras en canales estrechos comprobando la interrelación entre la velocidad, la formación de olas, el hundimiento y el trimado, introduciendo el concepto de velocidad crítica y de ola solitaria, si bien existen referencias sobre algunos estudios realizados por los enciclopedistas Bossut, Condorcet y D’Alembert hacia 1750 sobre la resistencia de modelos en canales de diferente sección. Será posteriormente George Airy quien desarrolla la teoría de olas en aguas someras hacia 1850.

La ola solitaria de Russell, que es una elevación simple de altura no necesariamente pequeña comparada con la profundidad, es un paso al límite de las olas oscilatorias de tipo permanente de Stokes, donde la longitud de onda es grande comparada con la profundidad, de modo que las elevaciones que están ampliamente separadas son prácticamente independientes unas de otras. Empíricamente Russell adoptó como velocidad de propagación $c = \sqrt{g(h+a)}$ siendo “a” la máxima altura de la ola sobre el nivel de aguas tranquilas, expresión posteriormente confirmada Boussinesq y Rayleigh

que obtienen como perfil de ola el siguiente $\eta = a \operatorname{sech}^2\left(\frac{x}{2b}\right)$ siendo $b = h\sqrt{\frac{h+a}{3a}}$ y empleando como potencial de

velocidades $\Phi = Ae^{-m(x-ct)} \cos my$ obtienen una expresión de la velocidad de traslación de la ola, en $y = h$ para $m=1/b$, de $c^2 = gh \frac{tg mh}{mh}$ cuyo valor es muy aproximado a la expresión de Russell. La teoría de olas solitarias ha sido desarrollada modernamente por Weinstein en 1926, sobre los desarrollos de KdV.

² Ver listado bibliográfico ordenado alfabéticamente.

Fue el alemán Thiele quien propuso en 1901 el primer modelo teórico simplificado para el estudio del squat y más tarde el también alemán Kreitner, el primero en publicar datos fiables relativos a esta circunstancia en 1934³.

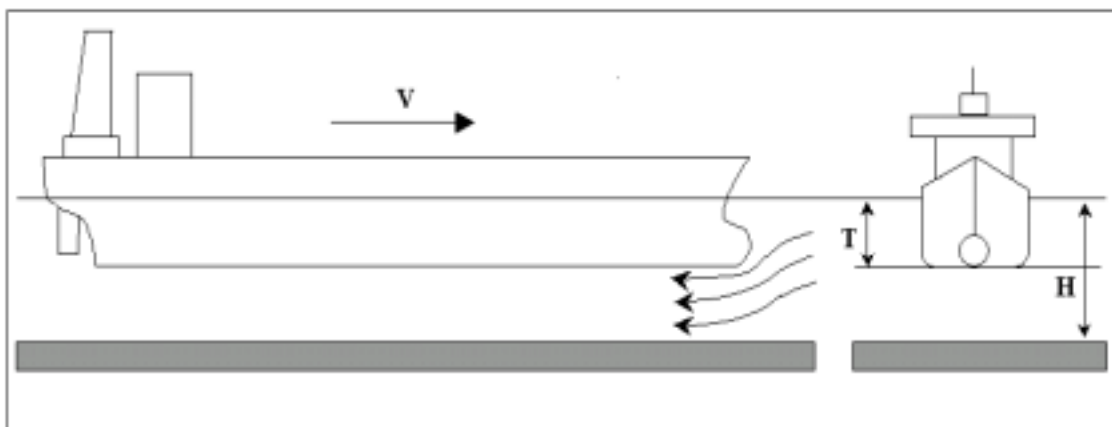


Figura 1

El fenómeno es atribuible al estrechamiento de la vena líquida, por la presencia de la carena, de acuerdo a la ley de Bernoulli. En otras palabras cuando un buque navega a velocidad subcrítica⁴ en aguas someras en calma, los cambios de las fuerzas de presión sobre el casco provocan un hundimiento y cambio de trimado en la carena, todo ello depende claramente de las características geométricas del buque y del perfil de la zona de navegación, profundidad y anchura lateral, así como de la velocidad de tránsito⁵.

Cuando el buque navega a velocidades cercanas a la crítica, lo que más adelante se denominará región transcítica, el buque tiende a generar una gran ola transversal, que avanza en la dirección del mismo, consumiendo gran energía en el proceso⁶. En la figura puede observarse la variación del

³ En 1948 Schijf presenta en el PIANC de Lisboa una solución gráfica de las ecuaciones de Thiele y es Constantine en 1960 el primero en dar una solución aproximada a dichas ecuaciones para canales de sección rectangular y McNown en 1976 para secciones trapezoidales y parabólicas. En 1966 Tuck aplicó la teoría de perfiles delgados para la evaluación del fenómeno. Actualmente se están desarrollando trabajos sobre squat dinámico, empleo de técnicas dGPS y buques rápidos

⁴ Se denomina velocidad crítica, a la velocidad correspondiente al número de Froude de la profundidad $F_{nh} = \frac{V}{\sqrt{g h}}$ igual a la unidad, siendo h la profundidad de la aguas en que se navega. Esta es la máxima velocidad a la que se pueden desplazar las olas armónicas libres en la superficie, olas que son largas de período elevado y que transportan mucha energía.

⁵ La aceleración de las partículas de agua al pasar por la sección media del buque produce la disminución de presión y por tanto una fuerza vertical de succión, por contra en los extremos de proa y popa la fuerza es de signo contrario, pero la superficie sobre la que actúa la presión es menor, añadiéndose en el extremo de popa el fenómeno del desprendimiento previo de la capa límite, y la acción del propulsor que acelera el fluido.

Hoy día tiene especial importancia este hecho por el rápido desarrollo de buques muy veloces, para aplicaciones civiles (transporte de pasajeros con servicio total o parcial en zonas de aguas someras) y militares, que deben disponer de una gran potencia instalada para atravesar esa "barrera" de la velocidad crítica en la aceleración, generando un problema añadido que es la acción de las olas de proa en la zona costera de navegación (erosión) y en sus infraestructuras (marinas, rompeolas, etc.). Ya que el número de Froude de la profundidad igual a la unidad indica el límite en que las olas armónicas libres pueden desplazarse sin distorsión sobre la superficie y al alcanzar el buque esta velocidad genera grandes olas de período alto con mucha energía, con el inconveniente de que al acercarse la ola a la orilla disminuye la profundidad, se acorta el período y aumenta la amplitud, dependiendo los límites permisibles de esta denominada "wake wash" del nivel de actividad en la zona.

Uno de los procedimientos actualmente aplicados para aliviar el efecto de la ola consiste en atravesar la barrera crítica cuando se produce, natural o artificialmente, un cambio brusco en la profundidad del agua. Feldtmann[**]

⁶ Lord Kelvin en sus estudios sobre ondas experimento el tren de olas engendrado por un punto de presión (fuente perturbadora concentrada) que se desplaza en línea recta a velocidad constante caracterizando su estela por un tren de olas transversales y otro de olas divergentes, tal que la línea de intersección de crestas forma un ángulo constante con la dirección del movimiento de unos 20°, en aguas profundas.

cociente resistencia por formación de olas en aguas profundas y someras frente al valor del número de Froude de la profundidad.

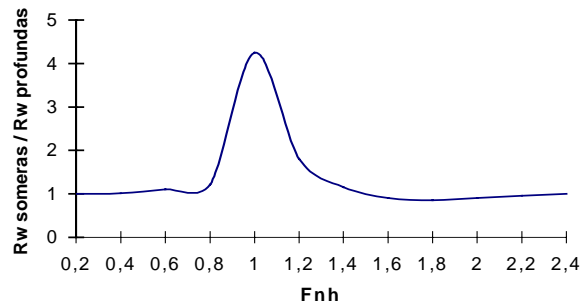


Figura 2

La distinción entre canales estrechos ó aguas restringidas y aguas someras, podemos establecerla en modo tal que la restricción en el primer caso es de profundidad y anchura y en el segundo solo de profundidad⁷, si bien es claro que la restricción es relativa y depende del tamaño del buque.

Tuck y Taylor [**] señalan a la hora de distinguir sobre la profundidad de las aguas que: Aguas de profundidad finita son aquellas en las que se producen cambios significativos en el flujo respecto a profundidad “infinita”, pero el efecto del fondo no es dominante en el comportamiento del buque. Por contra las aguas se denominan someras cuando la proximidad del fondo es tal que este, es el factor dominante en el comportamiento hidrodinámico del buque.

El fenómeno de Squat ó Surenfoncement (según la denominación en la literatura inglesa ó francesa), que quizás podríamos denominar en español como “sobrecalado”, y que implica no solo la variación de calado paralelo sino también del trimado del buque, de escasa importancia durante largo tiempo, ha tomado carácter de “problema” al aumentar el tamaño de las construcciones y la velocidad en servicio de los buques. De modo que canales de navegación y vías de acceso a puertos que no eran conflictivos, pues se les consideraba profundos, han pasado a serlo.

El squat aparece ligado a un aumento de la resistencia al avance que también es experimentado desde que el hombre navega a remo. Así los marineros necesitan incrementar su esfuerzo en la boga cuando el bote se mueve en aguas muy poco profundas para mantener la velocidad del mismo.

Además desde la aparición de la resolución A.601 de la I.M.O. la administración debe exigir que: los buques de nueva construcción con obligación de SOLAS’74, todos los buques de mas de 100 m de eslora y todos los gaseros y quimiqueros incluso de menor porte, lleven a bordo un manual de maniobra. Esta información que debe estar permanentemente expuesta en el puente en forma de cartel y disponible en el manual, incluye las características de maniobra del buque en aguas

Del estudio de las olas que progresan en un canal recto infinito de sección constante se obtiene la expresión de la función de onda superficial $\xi(x, t) = \frac{k A}{\omega} \text{Sh} kh \text{sen}(kx - \omega t) = \frac{\hat{H}}{2} \text{sen}(kx - \omega t)$ con \hat{H} altura de la ola.

De modo que con velocidades de desplazamiento del buque (fuente perturbadora) hasta $0.4 V_C$ el comportamiento de la estela es como el descrito por Kelvin y al acercarse al 100 % de la velocidad crítica el ángulo de divergencia se aproxima a 90° , la ola se desplaza a la misma velocidad que el elemento que la provoca. Por encima de la velocidad crítica la estela queda contenida en un cono de semiángulo cónico α , dado por la expresión $\text{sen } \alpha = g H / V^2$. Havelock[**] calculó el efecto de la disminución de la profundidad en la formación de olas y en la estela del buque, estudiando la transición en el sistema de Kelvin desde las líneas cuspidales hacia la ola solitaria transversal al acercarse el buque a la velocidad crítica.

⁷ La cuantificación del límite entre aguas profundas y someras puede establecerse en el rango $1.5 ; 2$ para el cociente H/T . El límite en restricción lateral se sitúa aproximadamente entre 7.5 y 12.5 para el cociente B_C / B dependiendo del tipo del buque según propone Barrass, pero en cualquier caso para valores alrededor de 5 el canal debe considerarse estrecho y para valores aproximadamente de 3 se considerará como muy estrecho.

someras, con determinación específica de las curvas de squat en aguas someras sin restricción lateral y en canales restringidos, $f_1(Sq; H/T)$; $f_2(Sq; S = \text{factor de bloqueo})$.

Por todo ello tiene especial importancia una adecuada predicción de dichos valores que deben ser mantenidos al día si el buque sufre algún tipo de modificación que altere sus características de maniobra.

Inciendiando en la importancia del hecho, existe constancia documental tras las investigaciones abiertas en algunos accidentes, de que la razón básica de los mismos residió en la aparición del fenómeno de squat, ó de que la gravedad de los mismos se acrecentó al producirse dicho fenómeno.

Este es el caso del hundimiento del ferry “Herald of Enterprise”, en el que la aparición de squat facilitó la entrada de agua por las portas mal cerradas, pero también han ocurrido otros accidentes como el del Queen Elizabeth 2, Sea Empress, European Gateway, Diamond Grace e incluso el Estonia, con considerables costes económicos y lo que resulta más grave, elevados costes humanos y ecológicos.

Sabemos que la situación de calado y asiento de un buque en navegación a velocidad estable en aguas libres y tranquilas queda determinada por su distribución de pesos y que sin modificación de estos, el equilibrio anterior puede modificarse por razones diversas:

- Variación de la densidad del agua.
- Variación de la velocidad del buque.
- Navegación en aguas restringidas ó someras y cambios de perfil en la vía de navegación.

Hecho este último de carácter cualitativo, que puede cuantificarse atendiendo al coeficiente de “empacho” o de bloqueo del buque en su canal de navegación. Este coeficiente mide la relación, en una sección perpendicular a la vía de navegación, entre el área de la sección máxima del buque y el área de la sección del canal de navegación. $C_E \equiv S = S_M/S_C$, de lo anterior se deduce que cuanto más cercano sea este coeficiente a la unidad mayor importancia tendrá el fenómeno. (En aguas libres $C_E \rightarrow 0$)

2. Variables intervinientes

La aparición del fenómeno squat, cambio de calado y trimado en el buque, se ve influida por gran cantidad de variables que deben tenerse en cuenta, y que contribuyen sumándose a determinar el valor final del calado del buque, como son: La profundidad del agua, las restricciones laterales en manga y calado, el cambio de perfil de la vía, las corrientes, las termoclinas, el gradiente salino, el estado de la mar, la geometría del casco, la situación de calados y trimados estáticos, el tipo de propulsión, los apéndices y henchimientos, la acción del viento, la proximidad de otros buques, los aportes de aluvión etc.

De modo que el cambio de asiento y calado total en un instante dado sería la suma de los valores siguientes $S = \sum_i S_i$; $i \in \{1,2,3,4,5\}$

1. El squat en aguas tranquilas, estático, que es el relacionado con la restricción lateral y vertical de la vía de navegación, superado el transitorio del cambio de sección.

2. El squat dinámico que representa los incrementos, sobre los valores estacionarios del caso anterior, cuando el buque “siente” los transitorios debidos a los cambios en el perfil de la sección de la vía de navegación⁸.
3. El cambio de asiento y calado debido a las olas, ya que estas inducen movimientos en el buque que dan componente vertical, arfada (z), cabeceo (θ) y balance (ϕ), de modo que la variación vertical del cdg será $z_t = z + x_i \theta + y_i \phi$ ⁹.
4. El squat inducido por cruces con obstáculos laterales u otros buques en la vía de navegación, o por proximidad a la orilla, valores que pueden ser suficientemente significativos como se ve en el gráfico. (m = distancia al obstáculo)

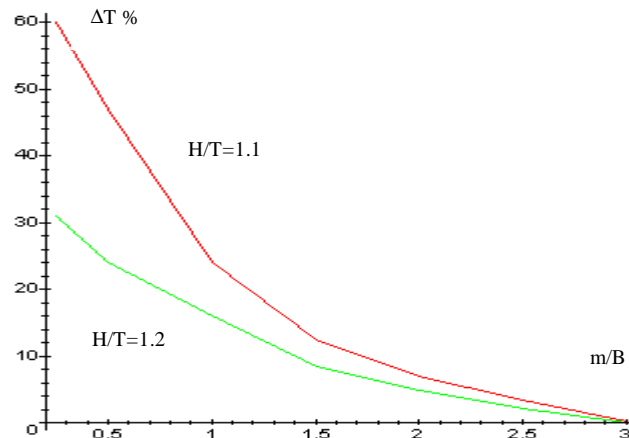


Figura 3

5. El squat inducido por la acción del viento, ya que provoca oscilaciones en el buque que aumentan su calado principalmente en aquellos que tienen una gran superficie expuesta como los portacontenedores¹⁰.

Se ha optado por una estimación determinista linealizada sumando los incrementos de squat de todos los factores intervinientes. Pero es posible una determinación probabilística, que quizás pueda permitir un mejor aprovechamiento de la vía de navegación, pero que plantea aún demasiadas incertidumbres y requiere una gran aportación de datos, fundamentalmente locales, como: mareas, vientos, corrientes, condiciones atmosféricas e hidrológicas, densidad y distribución de tráfico, criterios y límites de explotación, tipos de buques que intervienen en el tráfico etc. Con todos estos datos se procedería a hacer un análisis de riesgo, en función del tipo de averías y su incidencia en el buque, puerto o vía de navegación y su impacto ecológico, y se optimizaría el tráfico determinado ventanas de marea y condiciones atmosféricas¹¹.

⁸ Así un buque que navega a 7 nudos y ve disminuida la profundidad de las aguas en que navega pasando de $H/T=1.7$ a 1.1 , con un talud de pendiente $1/6$, puede ver incrementado su calado a la nueva profundidad en aproximadamente un 15%, respecto del correspondiente a esa nueva profundidad.

⁹ En la variación de squat debida a los movimientos inducidos en el buque por las olas han de tenerse en consideración; los movimientos de primer orden que son lineales con la amplitud de la ola en el ancho de banda de frecuencias correspondientes al rango de frecuencias de encuentro del espectro de ola incidente y los movimientos de segundo orden que son no lineales pero despreciables con olas de período largo. Kaplan[**]

La amplitud de este movimiento depende de la altura, periodo y dirección de las olas, sobre todo si la frecuencia de encuentro coincide con la frecuencia propia y el mar es de tres cuartos.

Los datos relativos a los ensayos con olas serán evaluados en una etapa posterior.

¹⁰ El valor aproximado de este incremento se obtiene de la expresión $\Delta S_q = 0.5 B \operatorname{tg} \alpha$ siendo α la escora alcanzada.

¹¹ De modo que para determinar la profundidad de la zona de navegación habrá que desarrollar un análisis económico que tenga en cuenta los costes de explotación del buque; retrasos, carga, operación, etc. por un lado y los de construcción, mantenimiento y tráfico de la vía de otro, determinando una profundidad mínima que tenga en cuenta las siguientes variables: Nivel máximo de marea dependiendo de la zona y la estación del año, calado en reposo, margen por movimientos verticales (hundimiento paralelo, trimado, olas e interferencias con otros buques en función del tráfico de la

También, deben tenerse en cuenta los siguientes condicionantes, que influyen sobre los parámetros de contorno de las variables cuyo efecto se ha mencionado con anterioridad.

Las zonas de navegación en estuarios, canales de acceso a puertos abrigados, rías etc. están sometidas a un aporte continuo de sedimentos¹² que terminan depositándose en el lecho marino aumentando el nivel del fondo y por tanto limitando la profundidad de la zona navegable, de modo que es necesario mantener un doble compromiso, económico y de seguridad (explotación del buque contra mantenimiento portuario), entre el calado admisible y la profundidad que es necesario dragar en cada campaña, por lo elevado de su coste.

Estos sedimentos pueden ser material de aluvión del río, residuos urbanos e industriales y otros materiales aportados por el mar, y en general podemos clasificarlos en dos grupos:

Materiales cohesivos, tendentes a la floculación creando copos por agrupación debido a la atracción interparticular, carga iónica etc.

Materiales no cohesivos, como la arena que precipitan más rápidamente creando una capa plástica superficial en el fondo.

De esta forma se obtiene un perfil estratificado de la zona de navegación similar al de la figura

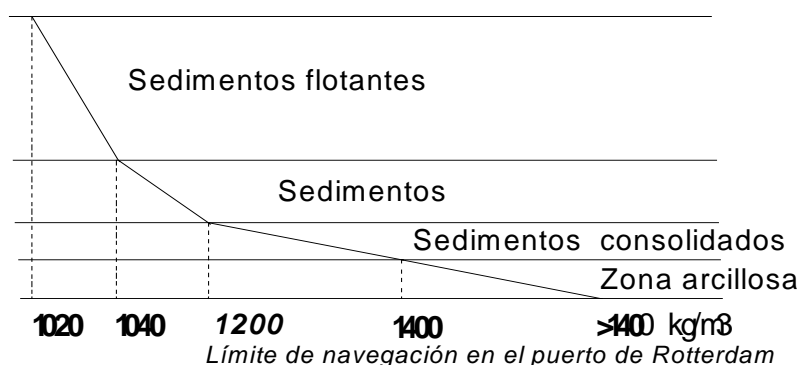


Figura 4

En función de la distribución de estos sedimentos puede quedar reducida la capacidad de navegación en la zona, bien por la acción de corrientes, por gradiente térmico o bien por la propia navegación. Pues el buque al navegar determina un campo de presión, con sobrepresiones en proa y popa y depresión bajo la quilla, que dependiendo de la consistencia del fondo puede alterar considerablemente la distribución del fondo de aluvión, aumentando la dispersión y posterior floculación. También debe tenerse en cuenta que algunas de estas zonas de navegación, son especialmente propensas a la creación de capas de fluido de diferente densidad, dando lugar a la aparición de olas internas en la intercara de separación de ambos líquidos.

3. Consideraciones generales.

Como primera aproximación al problema, y a título general, podemos afirmar que:

zona), margen de efectos dinámicos por variación batimétrica, margen por aporte sedimentario, márgenes de dragado y sondaje y el margen de tipo de fondo. Ver Canadian Coast Guard [**]

¹² Vantorre[**], empleando como soporte teórico el modelo de Dand y Ferguson[**] desarrolla un procedimiento de cálculo de squat en zonas con un fondo sedimentario en el canal.

a.- La variación de asiento y el “hundimiento” ó succión que conlleva el fenómeno de squat, al producirse en un buque durante su navegación, atiende, en líneas generales, al siguiente esquema¹³:

Navegación en aguas someras:

- Buques de formas llenas, en “U”, toman asiento negativo (triman de proa)
- Buques de formas finas, en “V”, toman asiento positivo (triman de popa).

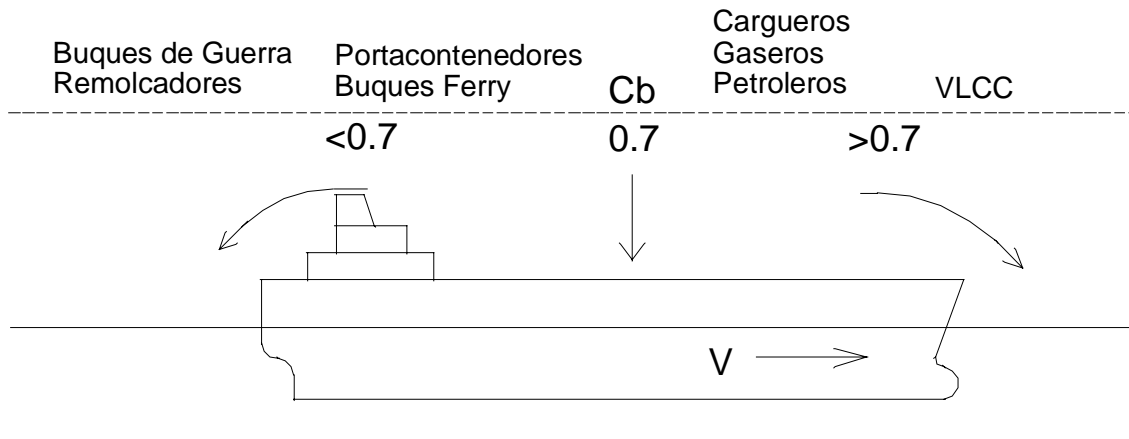


Figura 5

Navegación en canales estrechos:

- Prácticamente todos los buques toman asiento positivo, en modo “casi” independiente de sus formas.
- Los bulbos de proa disminuyen en ambas situaciones de navegación el asiento negativo, caso de producirse.
- Un buque que por su condición de carga lleve asiento positivo es muy probable que el squat máximo se produzca en la popa.

b.- El fenómeno puede “amplificarse” transitoriamente según sean las circunstancias:

b1.- Si el paso de aguas libres a aguas restringidas se produce en un intervalo de tiempo demasiado pequeño (cuando la velocidad sea elevada), la amplitud del fenómeno puede crecer del orden de un 20%, pero con una rápida atenuación.

b2.- Si un buque encuentra en su tránsito normal una irregularidad en el fondo que suponga una disminución brusca de profundidad, el efecto transitorio es de mayor magnitud que si la reducción de profundidad fuese permanente y de igual valor, produciéndose un cabeceo muy brusco con gran riesgo de colisión.

b3.- Si se produce un cruce de buques en aguas restringidas, el factor de amplificación puede ser de hasta el 100%. Igual magnificación se produce si el buque navega cerca del costado del canal ó cerca de un dique, al producirse efecto Venturi con las paredes cercanas del fondo ó costado.

¹³ Según afirma Guicharousse[**] el trimado se producirá atendiendo al siguiente patrón de comportamiento: Cuando el centro de gravedad del buque se encuentre a proa de la sección media (o del centro de gravedad de la flotación) el buque tomará asiento negativo, en caso contrario tomará asiento positivo aunque no siempre de una forma clara, hundiéndose paralelamente en caso de que coincidan.

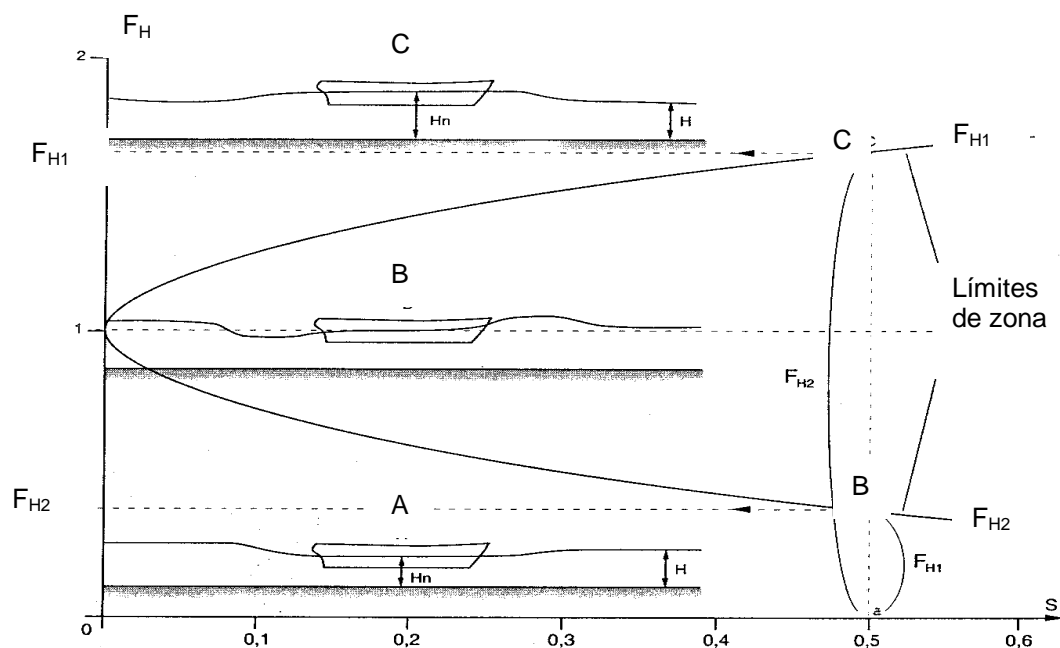
c.- A igualdad de velocidad se produce mayor squat, navegando autopropulsado que remolcado con hélices paradas. Hecho justificable en principio por la mayor aceleración del flujo a lo largo de la carena cuando las hélices están girando.

d.- El fenómeno de squat, se presenta siempre en todo tipo de buques en navegación por aguas libres ó restringidas y a cualquier velocidad. Siendo su importancia tanto mayor cuanto mayores dimensiones tenga el buque, mayor sea su velocidad y mayor sea el “empacho” en la zona de navegación.

e.- Como se indicará seguidamente el squat depende fundamentalmente de tres factores, que son:

1. La profundidad de la zona de navegación H .
2. El empacho que provoca el buque en esa zona medido por el coeficiente de bloqueo S (cociente entre el área máxima del buque y de la zona de navegación) y
3. La velocidad del buque V , que puede relacionarse con H mediante el coeficiente adimensional F_H ó número de Froude de la profundidad.

Es posible distinguir tres zona de comportamiento radicalmente distinto en el buque, que se denominan subcrítica, crítica o transcrítica cuando se atraviesa la barrera $F_H = 1$ y supercrítica, siendo la frontera dependiente del valor de S^{14}



Comportamiento del buque en las zonas subcrítica A, transcrítica B y supercrítica C, definidas por el coeficiente de bloqueo y el número de Froude de la profundidad

Figura 6 (Hervieu [**])

Como puede observarse en la figura en la zona “A” el buque disminuye su clara bajo la quilla, en la zona “B” genera una ola a proa y una depresión a popa y en la zona “C” aumenta su clara bajo la quilla subiéndose en la ola.

¹⁴ La expresión de la curva, aproximadamente parabólica, de la figura se indica en el anexo I

4. Factores críticos

Los parámetros de mayor “peso específico” en la incidencia del fenómeno squat, son los siguientes:

- La clara quilla-fondo o clara bajo la quilla, estimable por el coeficiente adimensional H/T , razón entre la profundidad del agua bajo el casco y el calado del buque, en forma inversamente proporcional¹⁵.

- La velocidad del buque, en modo claramente proporcional a su cuadrado, pudiendo estar esta incrementada en el caso de la existencia de corrientes.

- Las formas del buque, que en primera aproximación son estimables mediante el coeficiente de bloque, razón entre el desplazamiento del buque y el producto eslora, manga y calado $C_B = \nabla / LBT$, en razón directa, al incrementarse el “empacho” en la zona de navegación.

- El número de Froude de la profundidad, $F_H = V / \sqrt{gH}$, razón entre la velocidad del buque y la profundidad de las aguas en que se navega, en forma proporcional

Cuando un buque que transita por aguas poco profundas ó atraviesa situaciones que implican condiciones favorables a la aparición del squat se advierten los siguientes síntomas generales, además de las variaciones en las lecturas de los indicadores de a bordo, si es que existen:

- Ola de proa más pronunciada.
- Reducción de la velocidad de avance y de las revoluciones de la hélice para la misma potencia (se incrementa la resistencia al avance). La reducción puede ser de hasta el 15% de las R.P.M., 30% en la velocidad en servicio, en aguas someras y de un 20% en las R.P.M., 60% en la velocidad en servicio en aguas restringidas¹⁶.
- Reacción más lenta del buque a la maniobra, con el correspondiente incremento del diámetro del círculo de evolución e incremento de la distancia necesaria para parar.
- Posibilidad de vibraciones súbitas e intermitentes debido a la aparición de turbulencias y resonancia en la popa, debido al flujo de estela.
- Posible aparición de lodo en el agua alrededor del buque

5. Propuesta preliminar

¹⁵ Este parámetro es determinante pues es patente la necesidad de definir una mínima clara bajo la quilla, en la situación más desfavorable, desde las ópticas de explotación, mantenimiento del puerto, canal ó zona de navegación y de seguridad y maniobra. Teniendo todo esto en cuenta el comité técnico del CIERGNA determina tres categorías de factores intervinientes:

1. Factores relativos a la altura del agua (Nivel de marea y Condiciones meteorológicas desfavorables)
2. Factores relativos al buque.(Calado estático, margen de incertidumbre, margen de respuesta a olas, variación de densidad del agua, hundimiento dinámico y por interacción con obstáculos u otros buques, acción del viento y cambios de salinidad)
3. Factores relativos al fondo.(Margen de incertidumbre en la cota de fondo, tolerancia de dragado y margen de sedimentación entre dragados, tolerancia de dragado)

¹⁶McNown [**] propone que la reducción de potencia, debida a la geometría del buque y del canal, a su velocidad y al tren de olas generado, puede estimarse mediante la expresión $\Delta P = V * S_M * H * d * \gamma$ en razón a que el buque navegando en el canal está bombeando permanentemente agua desde la depresión generada hasta el nivel del canal.

En este primer trabajo se proponen tres variantes de cálculo no lineal, de tipo empírico y válido en la etapa de proyecto preliminar y que emplea un reducido número de parámetros, frente a otros de tipo teórico que requieren las formas del buque.

El squat en la maestra, es posible aproximarlos con una logarítmica de amplitud exponencial

$$S_q = k \sin(x) e^x \ln\left(\frac{1+x}{1-x}\right) \quad (i)$$

siendo $k = 0.74$ a $y x = F_H$

Una variante analizada es la aproximación de dicha curva con un polinomio de Legendre de 2ª clase y grado tres con coeficientes correctores k_1 ; k_2 y k_3 ;

$$[k_1 P_1(x) + k_2 P_2(x)] k_3 = S_q(x)$$

donde $k_1 < 1$; $k_2 > 1$ pero acotado superiormente (la cota depende de las características geométricas del buque, pudiendo tomar como límite superior en todos los casos $\cong 4$) y siendo $k_2 + 1 > k_3 > 1$ resultando la siguiente curva de ajuste para el squat en proa

$$\left[C_B \frac{5x^3 - 3x}{4} \ln\left(\frac{1+x}{1-x}\right) - \frac{L_{pp}}{2B} \frac{5x^2}{2} \right] S = S_q(x); x = F_H \quad (ii)$$

lo que permite predecir valores de squat con velocidades superiores al máximo de la curva S_q

También puede emplearse como fórmula predictora una exponencial amortiguada, con la siguiente expresión en tanto por ciento de la eslora entre perpendiculares

$$k \frac{L_{pp}}{B} \left(-x + x \frac{L_{pp}}{T} \right) C_B (e^{-x} - 1)(1 - S) = S_q(x); x = F_H; y k \cong 0.6 \quad (iii)$$

que permite un mejor ajuste de la curva de squat real hasta la velocidad crítica.

Todos ellos son aceptables en la zona subcrítica $F_H < 0.65$, pero en la zona transcítica existen grandes diferencias como se observa en la figura, comportándose la expresión (i) en el mismo modo que los modelos con asíntota vertical en las proximidades de la velocidad crítica, siendo las expresiones (ii) y (iii) adecuadas en la zona transcítica baja y similares al modelo de Ankudinov[**], con los característicos máximos en su posición $0.8 < F_H < 0.9$.

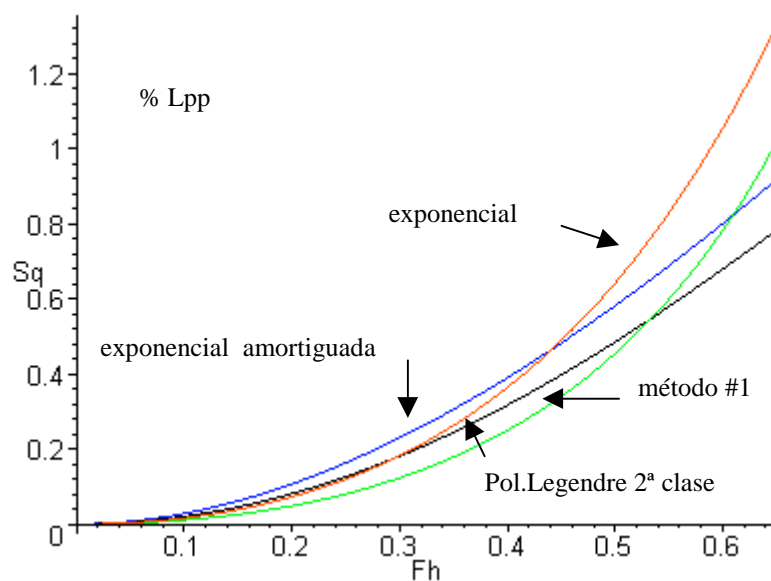


Figura 7 “Comparación entre método #1 de Millward y las propuestas con $F_h < 0.6$ ”

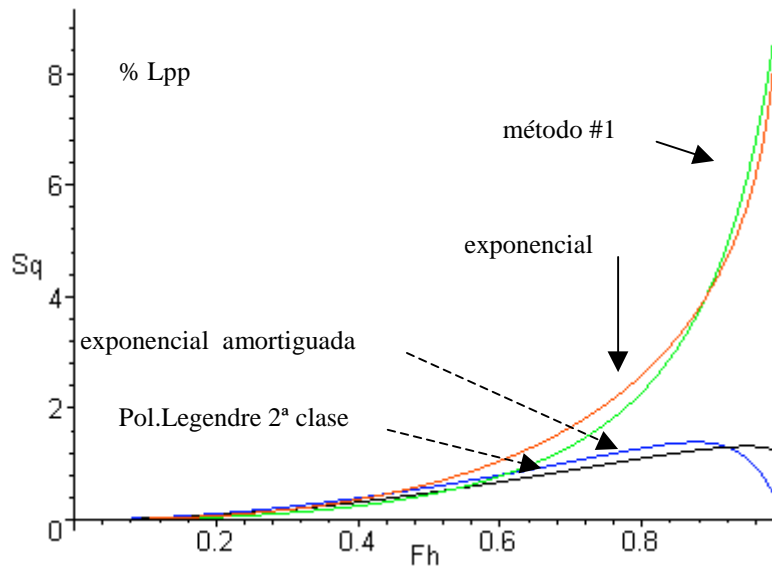


Figura 8 “Comparación entre método #1 y los propuestos con $F_h < 0.99$ ”

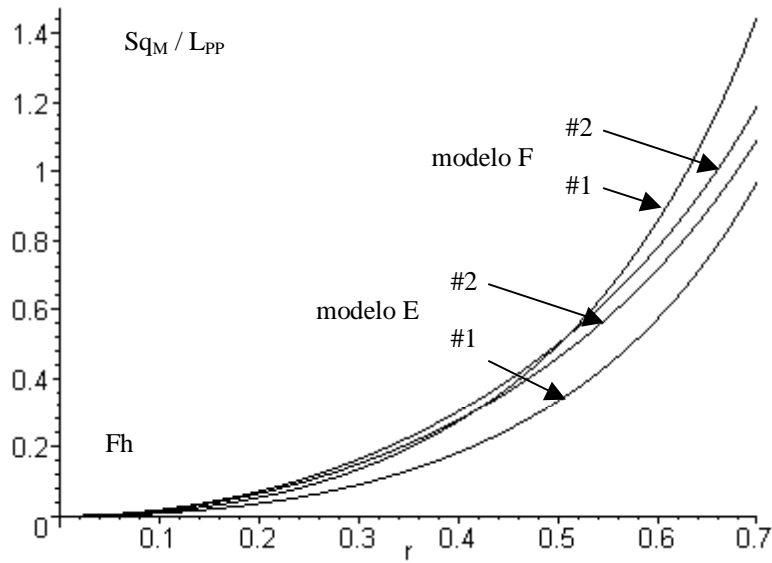
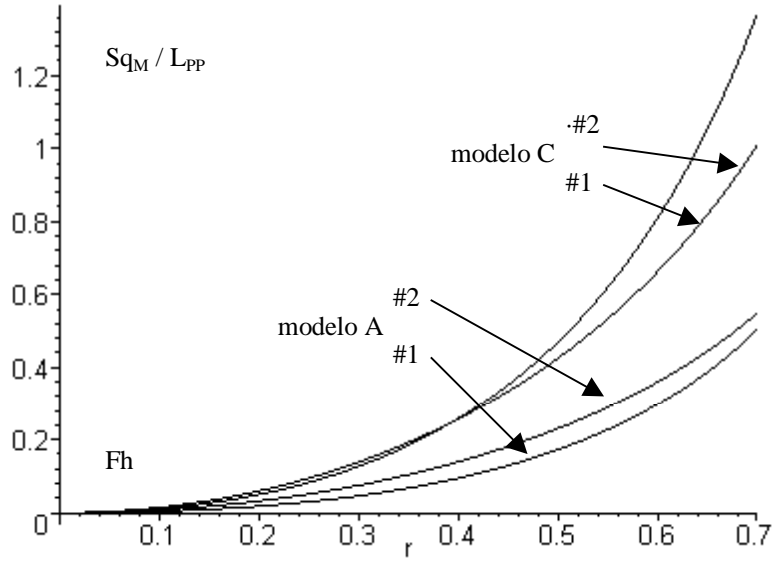


Figura 9 “Comparación de las aproximaciones 1 (1990) y 2 (1992) para los modelos A,C,E,F”

Características de los modelos en estudio (B tiene arbotantes y D,E y F tienen bulbo)

Identificador	Tipo	Lpp (m)	Lpp/T	Lpp/B	CB
A	Emb. ligera	3,167	20,7	6,463	0,444
B	Emb. ligera	3,715	24,28	7,887	0,5
C	LNG	3,115	23,25	6,242	0,735
D	Tanque	3,344	18,27	7,831	0,763
E	Tanque	3,387	18,02	6,464	0,82
F	Tanque	3,536	14,92	6,128	0,828

Los modelos predictivos analizados, son los que se indican en el cuadro adjunto

METODO	RESTRICCIONES			FORMULACION S=hundimiento; A=asiento	Aplicabilidad Aviles	*11 Margen de Aproximación
	Lateral	Profundidad	Tipo de Buque			
ALMIRANTAZGO			todos	S	Empírica	SI *6
ANKUDINOV			todos	S ; A	Empírica	SI
BARRASS		$1,10 < H / T < 1,5$	todos	$S_{Pr} \text{ ó } P_p$	Empírica	SI
BOUVMEESTER			todos	S_{max} *9	Teórica/Empírica	SI *15
SHARP y FENTON (Epiqr. 4.14/Nota 82)	$0,026 < S < 0,455$	$1,10 < H / T < 2,7$	todos	S	Teórica/Empírica	SI
CONSTANTINE	$0,05 < S < 0,4$ *8		todos	S_{max} *9	Teórica	SI *15
DAND y FERGUSON		$1,01 < H / T < 1,5$	$0,8 < C_b < 0,9$	S ; A *10	Teórica/Empírica	SI
ENSTRAND, WAHL y SJOSTROM	$0,1 < S < 0,21$	$1,05 < H / T < 4,0$	todos	S	Teórica/Empírica	SI *4
ERYUZLU y HAUSSER	*5	$1,08 < H / T < 2,78$	VLCC	$S_{max,Pr}$	Empírica	SI *1
FUEHRER y ROMISH	$0,032 < S < 0,43$	$1,19 < H / T < 2,29$	todos	S ; A	Teórica/Empírica	SI
GULIEV (Epiqrfe 4.10 / Nota 65)	$0,05 < S < 0,25$	$1,2 < H / T < 4,6$	$0,6 < C_b < 0,8$	S	Empírica	SI
McNOWN	$0,005 < S < 0,8$		todos	S_{max} *9	Teórica	SI *15
MILLWARD	$S < 0,08$	$1,25 < H / T < 6,0$	$0,44 < C_b < 0,83$	$S_{max,Pr}$	Empírica	SI
SOUKHOMELL y ZASS			todos	S ; A _{Pr}	Empírica	SI *2
TOTHILL	$0,02 < S < 0,26$ *8	*7	todos	S_{max} *9	Teórica	SI *15
TUCK	$S < 0,15$	$H / T < 2,0$	Buques en "V"	S ; A	Teórica	SI *3
VANTORRE		$1,02 < H / T < 1,2$	$0,65 < C_b < 0,85$	S ; A	Teórica	SI
VERMEER *16		$H / T < 2$	todos	S ; A *10	Teórica	SI

1 El buque a ensayar aún no siendo VLCC posee un coeficiente de bloque alto. Valoración estimativa.

13 Solo indica orden de magnitud

2 La predicción de este método aunque de aplicación general está basada en ensayos sobre buques "finos".

14 Los valores predichos son altos en el régimen subcrítico, pero mejores a alta velocidad.

3 Puede ser estimativa, si consideramos que su base teórica son los "slender bodies".

15 La modelización del fenómeno pide aguas restringida. Puede aplicarse utilizando la idea del canal virtual

4 La formulación de Sjostrom es "optimista" predice valores pequeños.

de Barrass en aguas someras, al igual que la prolongación de costados en canales "trinchera"

5 En los márgenes del parámetro Bc/B establecidos en el método el coeficiente de bloqueo será $S < 0,03$.

16 También plantea aproximación unidimensional con buque prismático ó con formas. => CONSTANTINE y DAND

La manga del canal supera la anchura de la zona de influencia=>el coef.de bloqueo según Barrass será $S < 0,11$

6 Sobreestima el valor del squat para buques rápidos.

7 Los valores de los ensayos y las medidas "en vivo" son $1,1 < H / T < 1,25$

8 El intervalo de coeficiente de bloqueo útil puede ser mayor según la teoría pero no estaba contrastado

9 No es posible conocer el asiento pues el buque es un prisma recto de sección la máxima. Ver Nota ** de Tothill.

10 Es un modelo unidimensional que mantiene las formas por rebanadas pudiendo calcular el asiento.

11 Intervalo de restricción en anchura con error mínimo en la predicción. En régimen SUBCRITICO

12 El límite Bc/B<13 lo es porque representa agua "limitadas" en anchura para régimen subcrítico

Estos modelos permiten tener presente este fenómeno al considerar las condiciones de operación en la etapa de diseño, conjugando viabilidad económica y seguridad¹⁷, así como diseñar los canales

¹⁷ Un conocimiento a priori del valor del squat en la zona de navegación en función de la velocidad, podría haber evitado los 75 millones de dólares de pérdidas en el accidente del QE2 o los 20 millones de libras de reparación del Sea Empress o podría aumentar la capacidad de carga del buque, por el calado extra, mejorando su rendimiento económico. Así cabe señalar un proyectos como el S2000V-MAX de Stena que puede alcanzar directamente y a plena carga puertos costeros de calado reducido o lugares en ríos o canales de navegación, de modo que se reducen o eliminan los gastos de "lightering", descarga parcial en instalaciones portuarias o sobre otro buque, mejorando la oferta de flete y disminuyendo el riesgo ecológico en los trasiegos.

adecuándolos al tipo de buque que lo empleará o modificar los buques o su modo de operación en los ya existentes.

El análisis estadístico inicial de los datos correspondientes a los ensayos realizados en el CEHIPAR permite proponer dos modelos predictivos **lineales**, para aguas tranquilas y olas, en función de un pequeño número de variables:

$$S_q = -17.664 - 8.737 \cdot Fn^2 - 0.0099 \cdot H + 3.923 \cdot Fn_H + 0.635 \cdot \frac{H}{T} + 21.339 \cdot C_B - 0.027 \cdot \lambda$$

que representa el squat medio en aguas tranquilas, siendo λ la pendiente equivalente del obstáculo que varía el perfil del fondo.

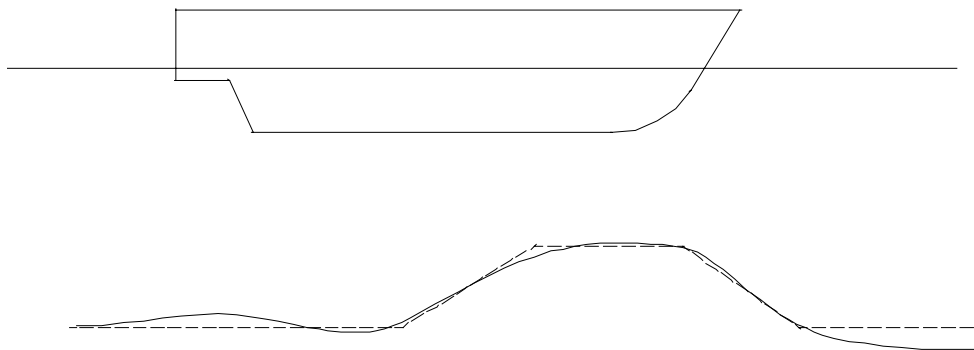


Figura 10

$$S_q = -15.203 + 2.727 \cdot Fn^2 + 4.086 \cdot 10^{-3} \cdot H + 1.511 \cdot Fn_H + 0.564 \cdot \frac{H}{T} + 16.414 \cdot C_B + 11.077 \cdot \frac{h_{ola}}{T_{ola}} - 0.027 \cdot \lambda$$

que representa el squat medio en olas¹⁸.

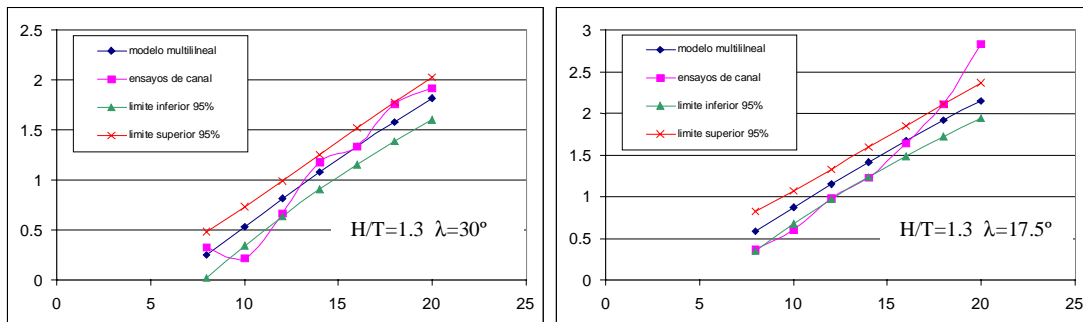


Figura 11 “Squat en aguas tranquilas”

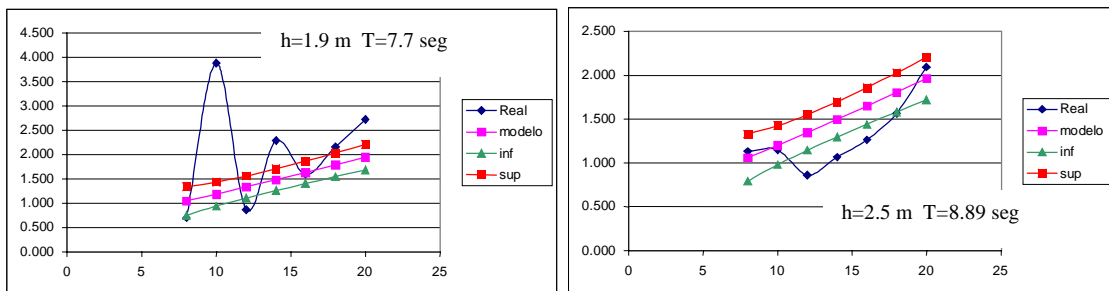


Figura 12 “Squat en olas”

¹⁸ El análisis estadístico ha sido realizado por D. José R. Rodríguez[**]

En el caso de la navegación en olas se observa la escasa eficacia del modelo por la clara **no linealidad** del fenómeno.

Actualmente se está efectuando el estudio de los datos obtenidos de los ensayos que permitirán estimaciones dinámicas fidedignas teniendo presentes los fenómenos transitorios y el estado de la mar.

6. Comparación de resultados.

Seguidamente se presentan los datos y curvas comparativas resultado de la aplicación, de los métodos de cálculo evaluados, con un grupo representativo de buques en un canal de sección rectangular en el margen subcrítico de velocidad y aplicándolos a un bulkcarrier “panamax” (uno de los modelos ensayados en el CEHIPAR) en las vías y canal de acceso a Raices (Puerto de Avilés)

Los buques analizados son: •Una gabarra, que es el buque que toma como ejemplo McNown en su trabajo. •Una patrullera (el modelo “A” de Millward). •Un buque tanque. y •El bulkcarrier “panamax” de los ensayos.

Lpp eslora	B manga	T calado	SM sección media	CB coeficiente de bloque	
140.6	21.3	2.5	53.25	0.9	GABARRA
3.17	0.49	0.15	0.06	0.44	PATRULLERA
180	32	12	353.3	0.89	PETROLERO
185	32.3	11.5	315.7	0.81	PANAMAX

Se comparan los resultados de los distintos modelos de predicción en los anteriores buques para establecer un criterio de aplicabilidad, siendo todos ellos relativos al hundimiento de la sección media.

Los métodos anteriores se aplican para comparar sus predicciones en el margen subcrítico $F_H < 0.7$, al canal de acceso a Raices, que se modeliza como un canal rectangular con una manga media de 90 m, según los datos topográficos disponibles.

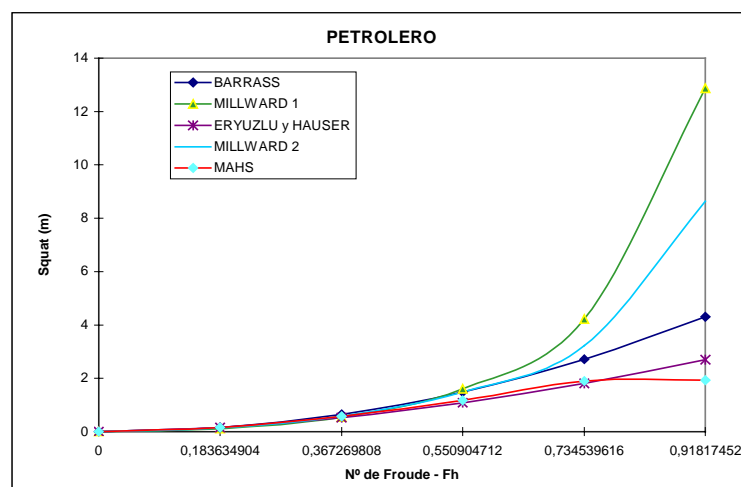


Figura 13 “Squat en la sección media para el petrolero seleccionado”

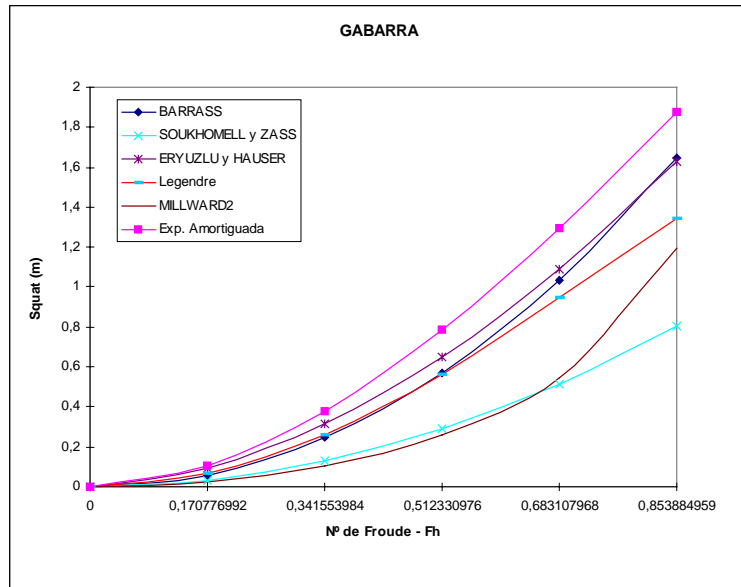


Figura 14 “Resultados comparativos para una gabarra”

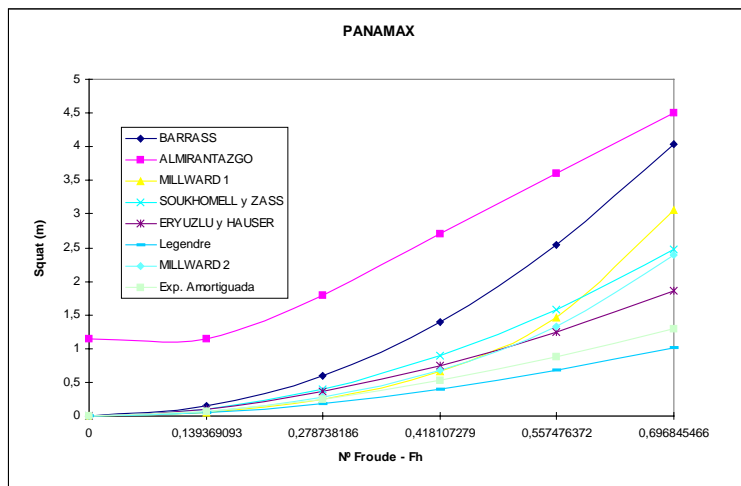


Figura 15 “Squat en aguas tranquilas para el modelo panamax”

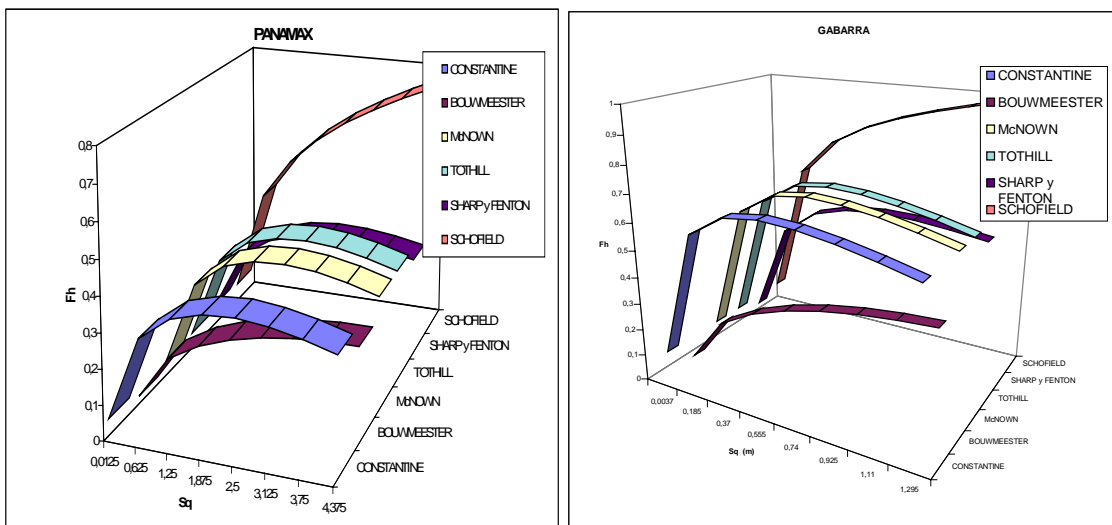


Figura 16 “Resultados de distintos métodos en el canal de Raices, para aguas tranquilas”

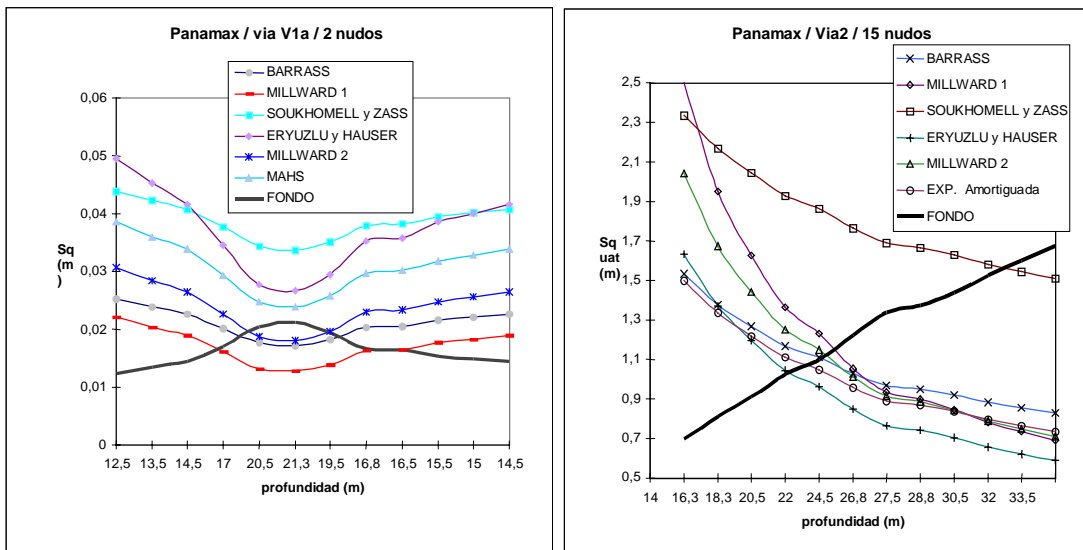


Figura 17 “Comparación para las vías de acceso V2 y V1a. Se incluye el perfil de la vía”

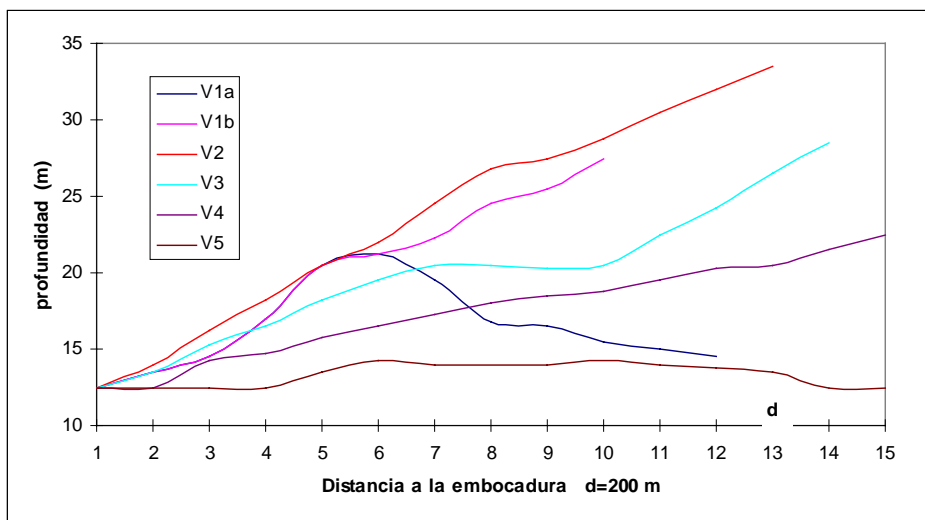


Figura 18 “Perfiles de las vías de acceso al puerto de Aviles”

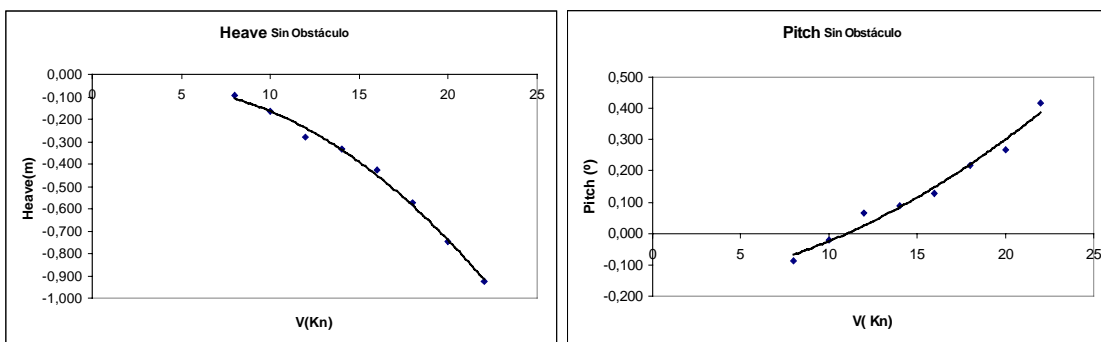


Figura 19 “Resultados del buque panamax en los ensayos de CEHIPAR, para aguas tranquilas”

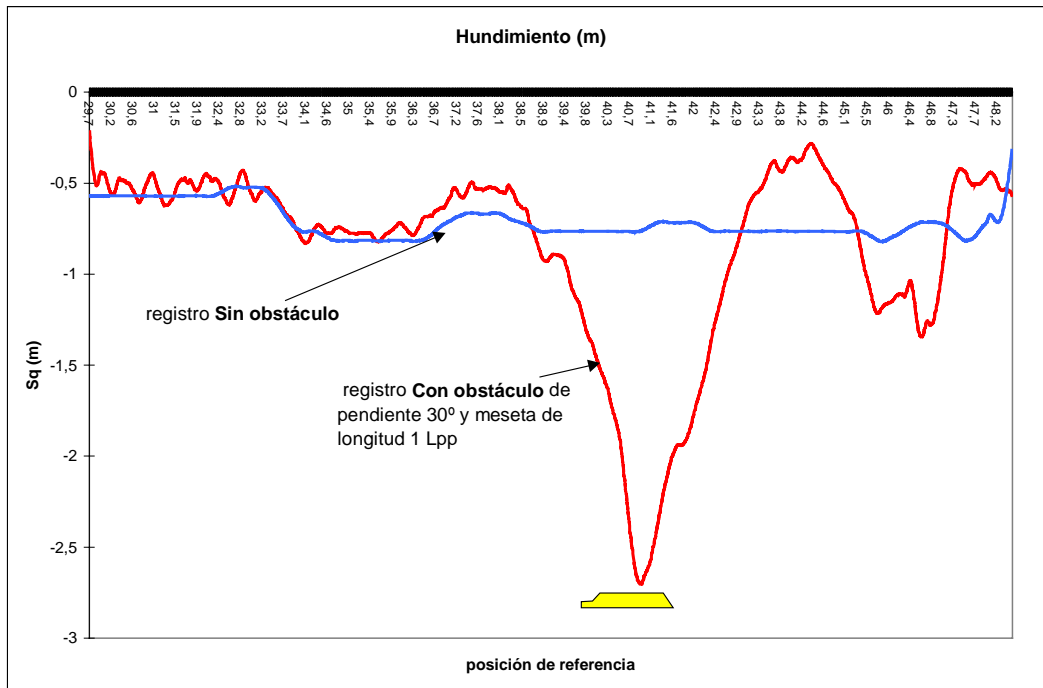


Figura 20 “Comparación del squat con y sin obstáculo trapezoidal en los ensayos CEHIPAR, donde se observa el transitorio de aguas profundas a aguas someras.”

7. Conclusiones.

De los datos obtenidos en el margen subcrítico, se desprende lo siguiente:

El carácter muy conservador de la predicción correspondiente a la fórmula del Almirantazgo, así como de la fórmula de Fuhrer y Romish especialmente a bajas velocidades.

La mayor coherencia en rangos de las predicciones correspondientes a los métodos uno dimensionales con enfoque energético, frente a los que emplean conservación de momento, señalando las elevadas predicciones del método de Schofield en todos los casos.

El carácter conservador de la predicción empírica de Barrass, dentro de un conjunto de métodos, que proporcionan unos resultados bastante homogéneos, que está constituido por él mismo junto con los métodos de: Eryuzlu y Hauser; Soukhomel y Zass; Millward en sus dos variantes y los métodos propuestos.

Que la variante 1 de Millward, al presentar una asíntota vertical para n° de Froude igual a 1.1, proporciona predicciones altas para valores por encima de $F_H=0.75$ y que la predicción del método señalado como de Legendre es demasiado baja con coeficientes de bloqueo pequeños $S<0.1$ siendo aplicable para buques de alto coeficiente de bloque que presenten gran empacho en la vía de navegación.

Los resultados obtenidos señalan que las predicciones sobre modelo autopropulsado son extrapolables a buque real con una aproximación razonable, ofreciendo favorables expectativas sobre la validación de los métodos propuestos.

El suficiente nivel de aproximación en las predicciones empíricas que pueden ser empleadas en las etapas previas de proyecto o bien para análisis económicos del tráfico en la vía de navegación.

El perfil aproximado del squat en proa y popa, de un buque de formas llenas al atravesar una zona con una elevación en el perfil del fondo aproximadamente trapezoidal es tal que: Presenta un máximo en proa al inicio de la zona de meseta, seguido de un mínimo de hundimiento a unos $2/3 L_{pp}$ del punto anterior con una zona de oscilaciones (15%) en la parte central de la meseta y una inflexión simétrica respecto a la vertical pero de signo contrario, a unos $2/3 L_{pp}$ antes de la salida de la zona de meseta. Por contra el comportamiento del squat en popa es prácticamente simétrico respecto a la horizontal del de proa, lo que supone grandes modificaciones de trimado¹⁹.

La presencia de la capa sedimentaria decrementa el squat, salvo que se navegue a baja velocidad con una relativamente grande clara bajo la quilla, o bien que se navegue a mayor velocidad con una parte significativa sumergida en una capa sedimentaria con un gradiente de concentración pequeño.

Los modelos propuestos son más ajustados para las velocidades subcríticas y dan predicciones razonables en la zona transcítica baja salvo el modelo (i) que predice valores demasiado altos al igual que los modelos asintóticos señalados en el cuadro general.

Agradecimientos

Queremos aprovechar estas líneas para dar las gracias por su inestimable colaboración a todo el personal del CEHIPAR, sin cuya ayuda no hubiera sido posible la realización de los ensayos, y a los alumnos de la ETSIN D^a Nuria Paz, D^a Carmen Pujol, D. Miguel Talens por su apoyo y colaboración, y en especial a D. José Ramón Rodríguez por su plena y total participación en el proyecto.

¹⁹ Los ensayos desarrollados con modelos para la zona de “Toroa patch” en el río Tamara en Port Launceston (Australia) por Renilson [***], se observa que siguen aproximadamente el mismo patrón propuesto, si bien el modelo matemático empleado, muy simple ya que solo considera la sección máxima del buque, produce oscilaciones alrededor del valor correspondiente a esa misma profundidad pero con un fondo uniforme.

Los incrementos de hundimiento por el transitorio al navegar sobre la irregularidad del fondo, frente a los valores estacionarios a la misma velocidad con profundidad constante, son crecientes en función de la velocidad y la clara bajo la quilla, variando entre un 2-3 % a velocidades bajas 4 a 6.5 nudos y un 17 -19 % a velocidad cercana a la que da lugar al contacto con el fondo. Por ejemplo un buque navegando a 7 nudos al pasar de un fondo con relación $H/T = 1.7$ a una zona somera con $H/T = 1.1$ con un talud de pendiente 1/6 puede sufrir un incremento de calado de aproximadamente un 15%.

ANEXO I

Modelo teórico simplificado²⁰ para un buque desplazándose por un canal:

- El fluido se considera ideal.
- El buque se mueve a velocidad constante V a lo largo de un canal de sección rectangular constante con anchura B_C y profundidad H .
- El buque es de sección rectangular constante entre proa y popa, despreciando los efectos de los extremos.
- El canal se extiende indefinidamente.
- La velocidad de las partículas de agua es constante para cualquier punto de una sección transversal y solo tiene componente en la dirección de la eslora.
- Se considera el buque sin propulsor ignorando la acción de este sobre el agua **.

Al aplicar la ecuación de continuidad al fluido que se mueve en el canal de sección $B_C H$ a velocidad V aguas arriba del buque, que es la situación de reposo, y siendo V_2 la velocidad del fluido que fluye alrededor del casco, con una altura de columna de agua sobre el fondo H_2 (la depresión del nivel de agua es $H-H_2$) resulta:

$$VB_C H = V_2 (B_C H_2 - S_M) \quad (C.1)$$

al considerar el estrechamiento de la vena líquida que supone la sección máxima sumergida del buque.

La ecuación de Bernoulli tiene la forma:

$$\frac{V^2}{2g} + H = \frac{V_2^2}{2g} + H_2 \quad (C.2)$$

despejando H_2 de la ecuación de Bernoulli y sustituyendo en la ecuación de continuidad a la vez que se emplean los parámetros adimensionales; coeficiente de bloqueo, número de Froude de la profundidad y el que el autor define como hundimiento adimensional $d = (H-H_2) / H$ se obtiene la siguiente expresión²¹

$$F_H = \sqrt{\left[\frac{2d(1-d-S)^2}{1-(1-d-S)^2} \right]} \quad (C.3)$$

²⁰ En los fenómenos de aguas someras el número de Froude de la profundidad $F_H = V / \sqrt{gH}$ juega el mismo papel que el número de Mach en aerodinámica, de modo que $F_H = 1$ actúa como una “barrera del sonido” de forma tal que la teoría linealizada prevé un hundimiento infinito para ese valor. Los ensayos sobre modelos confirman que las cercanías de ese punto se produce un fuerte hundimiento y una considerable ola de proa.

²¹ Teniendo en cuenta que $H_2 = H-d'$, siendo d' el hundimiento sin adimensionar, de la ecuación C1 es posible obtener el cociente de velocidades $V_2/V = 1/(1-d-S)$ y de la ecuación de Bernoulli es posible despejar el hundimiento adimensionalizado $d = (1/2) F_H^2 ((V_2/V)^2 - 1)$ y de entre ellas se elimina el cociente de velocidades, se obtiene la ecuación C3.

Si de entre estas dos ecuaciones se elimina d , resulta el siguiente polinomio de grado tres en la variable V_2/V ; $P(V_2/V) = (1/2) F_H^2 (V_2/V)^3 - (1-S - (1/2) F_H^2) (V_2/V) + 1 = 0$ cuyo máximo representa la mayor cantidad posible de agua que puede pasar a través de la sección ocupada por el buque, entonces derivando e igualando a cero se obtiene un valor de V_2/V que

sustituido en $P(V_2/V) = 0$ da como resultado la ecuación $S = S(F_H)$; $S = 1 - \frac{3}{2} F_H^{2/3} + \frac{1}{2} F_H^2$ cuyas raíces determinan los

límites de las regiones sub y supercrítica. De forma que la ecuación C3 solo describe flujos estacionarios en los intervalos $0 < F_H < F_1$ y $F_2 < F_H < \infty$ siendo F_1 y F_2 las dos raíces de la ecuación anterior. En la zona crítica o transcítica $F_1 < F_H < F_2$, se presenta el fenómeno no estable que describe Constantine[**].

BIBLIOGRAFIA

	AUTOR	TITULO	PUBLICACION	FECHA y/o EDIT.	PAGINA	
1	Alález J.A.	Navegación en aguas restringidas	Revista General de Marina	1977		
2	AMSA	Hydrodynamic interaction	Australian Maritime Safety Authority	1997	March	
3	Ankudinov V. Daggett L. Huval C. Hewlett Ch.	Squat predictions for manoeuvring applications	Marine simulation and Ship Manoeuvrability	1996	Chislett ed.	pp 467/95
4	Barrass C.B.	Ship squat	Lorne & MacLean Marine Pb.	1978		
5	Barrass C.B.	Ship squat a reply	The Naval Architect	1981	November	pp. 268/71
6	Barrass C.B.	The phenomena of ship squat	International Shipbuilding Progress	1979		No. 26 pp. 44-47
7	Barrass C.B.	Reflections on ship squat	The Naval Architect	1998	March	pp. 19/20
8	Barrass C.B.	Squatting of ships crossing in a confined channel	Seaways	1989	November	pp. 17/19
9	Barrass C.B.	Further discussion on squat	Seaways	1994	March	pp. 4/6
10	Beck R.	Forces and moments on a ship moving in a shallow channel	Journal of Ship Research	1977	June	Vol. 21 No.2 pp. 107/19
11	Beck R.F. Tuck E.O.	Computation of shallow water ship motions	Symposium on Naval Hydrodynamics	1972		pp. 1543/1587
12	Blaauw H. Van der Knaap	Prediction of squat of ships sailing in restricted water	8 th International Harbour Congress	1983		pp. 2. 81/93
13	Bouwmeester J.	Calculation return flow and water level depressions	PIANC XXIV Leningrad	1977	SI 3	pp. 148/51
14	Collinson R.G.	A review of methods of predicting the squat of a ship in shallow water	Liverpool University	1994		
15	Constantine T.	On the movement of ship in restricted waterways	Journal of Fluid Mechanics	1960	October	No. 9 pp. 247/56
16	Dand I.W.	Hydrdynamic aspects of the sinking of the ferry "Herald of Free Enterprise"	The Naval Architect	1988	June	pp. 145/66
17	Dand I.W.	Hydrodynamic aspects of shallow water collisions	RINA Transactions	1976		Vol.118
18	Dand I.W.	On ship bank interaction	RINA Transactions	1982		Vol. 124 pp. 25-40
19	Dand I.W.	Full form ships in shallow water: Some methods for the prediction of squat in subcritical flows	National Physical Laboratory	1972	February	Report No. 160
20	Dand I.W. Dinham-Peren T.A. King L.	Hydrodynamic aspects of a fast catamaran operating in shallow water	Hydrodynamics of High Speed Craft RINA	1999	November	pp 1/17
21	Dand I.W. Ferguson A.M.	The squat of full ships in shallow water	RINA Transactions	1973		Vol. 115
22	Dand I.W. Ferguson A.M.	Estimating the bow and stern sinkage of a ship under way in shallow water	The Naval Architect	1973	January	pp. 238
23	Duffy J. Renilson M.	An investigation into the effect of propulsion on ship squat	Oceanic Engineering International	2000	July	Vol.4 No. 1 pp 1/12
24	Edstrand H. Norrbin N.H.	Shallow water phenomena and scale model research. Some experience from the SSPA maritime dynamics laboratories	SSPA	1978	March	pp 181/95
25	Eryuzlu N.E. Hausser R.	Experimental investigation into some aspects of large vessel navigation in restricted waterways	Symposium on aspects of navigability. DELFT	1978		Vol. 2 pp. 1- 15
26	Eryuzlu N.E. Cao Y.L. D'agnolo F.	Underkeel requirements for large vessels in shallow waterways	XXVIII Int. Nav. Congress. Seville	1994		pp 17/26
27	Feldtmann M.F. Garner J.	Seabed modifications to prevent wake wash from fast ferries	Coastal ships and inland waterways	1999	February	Paper no.8 pp. 1/4
28	Ferguson A. Seren D.B. McGregor R.C.	Experimental investigation of a groundidng on a shoaling sandbank	RINA Transactions	1982		Vol. 124
29	Ferguson A.M. Dand I.W.	Hull and bulbous bow interaction	RINA Transactions	1970		Vol. 112 pp. 421/41
30	Fuehrer M. Romisch K.	Effects of modern ship traffic on inland and ocean waterways and their struct.	PIANC XXIV Leningrad	1977		pp 79/93
31	Gourlay t. Tuck T.P.	One dimensional theory for flow past a ship in a channel of variable depth	Australian Mathematical Society Gazette	1999		Vol.25 no.4 pp 206/11
32	Gourlay T.	The effect of squat on steady non linear hydraulic flow past a ship in a channel	Schiffstechnik	1999		46, No. 4, pp.217/22
33	Gourlay T.	The supercritical bore produced by a high speed ship in a channel	Adelaide University	2000	January	pp 1/9

34	Gourlay T. Tuck E.O.	The maximum sinkage of a ship	Adelaide University	1999	May	pp 1/18
35	Gourlay T.	Mathematical and computational techniques for predicting the squat of ships.	University of Adelaide.	2000		PhD thesis
36	Gourlay T.P. Tuck E.O.	Hydraulic and slender-body shallow-water theories for flow past a ship in a channel, and determination of squat	EMAC'98 Adelaide University	1998		pp 233/36
37	Guicharousse C.	Surenforcement et autres derives du theoreme de Bernouilli	Navigation	1991	July	No. 155 pp. 378/94 pp 17/23
38	Guliev J.M. Vorobjev J.	Determination of safety dimensions of the cross section in maritime approach channels	XXIII Int. Nav. Congress. Ottawa	1973		Vol 1 No. 7 pp. 17/22 Rep.No.14 pp 1/65
39	Guliev J.M.	On squat calculations for vessels going in shallow water and through channels	PIANC Quarterly Bulletin	1971		Vol. 100 p. 133/35
40	Haatainen P. Lund J. Kostilainen V.	Experimental investigation on the squat in changing water depth conditions	Helsinki University	1978		Vol. 100 p. 133/35
41	Havelock T.H.	The effect of speed of advance upon the damping of heave and pitch	RINA Transactions	1958		Vol. 100 p. 133/35
42	Hervieu R.	Le surenforcement des navires	Masson Pb.	1993		pp 367/90
43	Hoof J.P.	The behaviour of a ship in head waves at restricted water depths	NSS/TNO report no.188S	1974		Rep. No. 9
44	Huuska O.	On the evaluation of underkeel clearance in Finnish waterways.	Helsinki University of Technology	1976		Rep. No. 9
45	I.M.O.	Resolution A.601(15)	I.M.O.	1987	November	
46	Kaplan P.	Probabilistic measures of bottom contact due to waves for ships in shallow harbour channels	Twelfth STAR symposium	1987	May	pp. 1/9
47	McNown J.S.	Sinkage and resistance for ships in channels	Journal of Waterways, Harbours and Coastal Engineering	1976	August	pp. 287/98
48	Millward A.	The effect of water depth on hull form factor	International Shipbuilding Progress	1989		No. 407
49	Millward A.	A comparison of the theoretical and empirical prediction of squat in shallow water	International Shipbuilding Progress	1992		No. 417 pp. 69/78
50	Millward A.	A review of the prediction of squat in shallow water	The Journal of Navigation	1996		Vol.49 pp. 77/88
51	Millward A. Bevan M.G.	Effect of shallow water on a mathematical hull at high subcritical and supercritical speeds	Journal of Ship Research	1986	June	Vol. 30 No.2 pp. 85/93 Vol. 128 pp. 189/04 Vol.27
52	Millward A. Bevan M.G.	The behaviour of high ships forms when operating in water restricted by a solid boundary	RINA Transactions	1985	June	Vol. 128 pp. 189/04 Vol.27
53	Millward.A.	A preliminary design method for the prediction of squat in shallow water	Marine Technology	1990	January	Vol.124 pp.175
54	Millward.A.	The effect of shallow water on the resistance of a ship at high subcritical and supercritical speeds	RINA Transactions	1982	December	Vol.125 pp.163
55	Millward.A.	Shallow water and channel effects on ship wave resistance at high subcritical and supercritical speeds	RINA Transactions	1983	December	pp. 71/88
56	Norrbin N.H.	Bank effects on a ship moving through a short dredged channel	10 th Symposium on Naval Hydrodynamics FEIN	1974		pp. 71/88
57	Núñez Basañez García Gomez	Navegación Fluvial. Posibilidades de navegación de la red fluvial española.	FEIN	1981		
58	Perez Rojas L.	Métodos matemáticos en hidrodinámica	ETSIN	1997		
59	Renilson M. Hatch T.	Preliminary investigation into squat over an undulating bottom	The Naval Architect	1998	February	pp. 36/37
60	Romisch K.	A squat in limited-depth navigation channel as seen from the hydrodynamic point of view	Schiff & Hafen Seewirtschaft	1993	October	pp. 58/62
61	Schofield R.B.	Speed of ships in restricted navigation channels	Journal of waterways harbours and coastal engineering division	1974	May	pp 133/50
62	Schofield R.B. Martin L.A.	Movement of ships in restricted navigation channels	Institution of civil engineers Proceedings	1988	March	Vol. 85 Part 2 pp. 105/20 E228/30
63	Seren D.B. Ferguson A.M.	Squat an examination of two practical prediction methods	The Naval Architect	1981	September	No. 48 pp. 242/44 pp 18/23
64	Sharp BB. Fenton S.D.	A model investigation of squat.	The Dock and Harbour Authority	1968	November	pp 271/74
65	Shuokhomel G.I. Zaas.V.M.	Abaissement du navire en marche	Navires, Ports et Chantiers	1958	January	pp 271/74
66	Sjostrom C.H.	Effect of shallow water on speed and trim	Naval Engineers Journal	1967	April	pp 42/48
67	Söding H. Bertram V. Jensen G.	Numerische Berechnung von absenkung und trimm von schiffen durch fahrt in flachem wasser	Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft	1989		pp. 42/48

68	Tohill J.T.	Ships in restricted channels	Marine Technology	1967	April	pp 111/28
69	Tuck E.O.	Shallow water flows past slender bodies	Journal of Fluid Mechanics	1966		Vol. 26 part 1
70	Tuck E.O.	A systematic asymptotic expansion procedure for slender ships	Journal of Ship Research	1964	June	
71	Tuck E.O.	Ship motions in shallow water	Journal of Ship Research	1970	December	
72	Tuck E.O.	Sinkage and trim in shallow water of finite width	Schiffstechnik	1967		Bd. 14 H. 73
73	Tuck E.O.	Hydrodynamic problems of ships in restricted waters	Ann. Rev. of Fluid Mechanics	1978		Vol. 10 pp. 33/46
74	Tuck E.O.	Unstable squat from Lateral Motion of Ships in Shallow Water	Journal of Ship Research	1974	March	Vol. 18 No. 1 pp. 50/55 pp. 627/659
75	Tuck E.O. Taylor P.J.	Shallow wave problems in ship hydrodynamics	8 th Symposium on Naval Hydrodynamics	1970		
76	Tuck E.O.	Some classical water-waves in varying depth	Symposium on waves in water of variable depth.	1976	June	pp. 9/20
77	Vantorre M. Cohen I.	On sinkage and trim of vessels navigating above a mud layer	Terra et Aqua	1989		No. 40 pp. 11/21 pp 1/27
78	Varios	Le pied de pilote pour grandes navires dans des chenaux maritimes a fond dur	Comité Technique PIANC	1985		
79	Varios	Estudio de los movimientos verticales del buque. Puerto de Avilés	ETSIN – CEPYC	1998		
80	Varios	Approach channels. A guide for design	PIANC-IAPH	1997	June	PTC II-30
81	Varios	Ships for Coastal and Inland Waters (Design Building and Operation)	WEGEMT 21th School	1994		
82	Varios	Canadian waterways national manouvering guidelines. Channel desing parameters	Canadian Coast Guard	1999		pp. 1/58
83	Varios	Hydraulic design of small boat navigation	U.S.A.C.E.	1998		ER1110-2-1457
84	Varios	Hydraulic design of deep-draft navigation projects	U.S.A.C.E.	1997		ER1110-2-1404
85	Varios	Ship behaviour in ports and their approaches. The prediction of squat for vessels in shallow waters	National Ports Council	1981	February	Ref: 629.12 532.58 2289/81 pp. 1/19 pp. 1/16
86	Varios	Modern measurement of vessel squat and settlement using GPS	NOAA U.S.Dept. of Commerce	1998		
87	Varios	29 th PIANC Congress Conclusions	29 th PIANC	1998	September	
88	Varios	The Seaway Handbook	The St. Lawrence Seaway Management Co.	2000		
89	Vermeer Ir. H.	The behaviour of a ship in restricted waters	International Shipbuilding Progress	1977		Vol.24 No.280 pp. 323/36