

MODELAMIENTO DEL IMPACTO SIMÉTRICO BIDIMENSIONAL EN AGUA EN CALMA DE BOTES DE PLANEOS TÍPICOS

MODELING SYMMETRIC 2-D IMPACT OVER CALM WATER IN TYPICAL PLANING BOATS

ROBERTO ALGARÍN

Universidad del Norte, Departamento de Ingeniería Mecánica. algarinr@uninorte.edu.co.

ANTONIO BULA

Universidad del Norte, Departamento de Ingeniería Mecánica, abula@uninorte.edu.co.

OSCAR TASCÓN

COTECMAR, Director de investigación, desarrollo e innovación. otascon@cotecmar.com

Recibido para revisar julio 27 de 2009, aceptado abril 4 de 2010 , versión final mayo 5 de 2010

RESUMEN: El presente artículo muestra el estudio del impacto en dos dimensiones de secciones típicas de botes de planeo con entrada simétrica y agua en calma. El análisis se desarrolló por medio de la programación del algoritmo de Söding [1], determinando la fuerza durante el impacto y la distribución de presión en la sección. Los resultados fueron validados por medio de comparación con los estudios de Mohamed [2], Tveitnes [3], Vorus [4] y Wagner [5]. Estos resultados muestran que uno de los principales factores que afectan el desarrollo de la distribución de presión durante el impacto sobre el casco es el tipo de geometría del bote.

PALABRAS CLAVE: Impacto 2D, bote de planeo, entrada simétrica, modelamiento, algoritmo de Söding.

ABSTRACT: This paper presents a 2-D impact study for typical sections used in planing boats considering symmetric entrance and calm water. The analysis is carried out using Söding [1] algorithm, determining the force and pressure distribution produced during the impact. The results were validated by comparison with Mohamed [2], Tveitnes [3], Vorus [4], and Wagner [5]. The results showed that one of the main factors affecting the pressure distribution during the impact is the geometry considered.

KEYWORDS: 2D impact, planing boat, symmetric entrance, modeling, Söding Algorithm.

1. INTRODUCCIÓN

El impacto de secciones en 2D es de especial interés en el estudio hidrodinámico de botes de planeo. Por medio de la teoría de cuerpos esbeltos, es posible extender los resultados de 2D a 3D y determinar de esta manera la fuerza de sustentación y la fuerza de arrastre sobre el casco del bote. De igual manera se pueden obtener las condiciones de equilibrio del mismo, las cuales incluyen el momento y el ángulo de trimado en el caso de entrada simétrica. El fenómeno de impacto en 2D se ha estudiado con diversos enfoques. Por medio de teoría de adición de masa (Wagner [5], Tveitnes [3], Söding [1]), la teoría de vórtices (Vorus [4], Savander [6]) y modelamiento CFD (Mohamed [2]). En el desarrollo de este trabajo se solucionó el problema por medio del algoritmo de Söding [1].

2. MARCO REFERENCIAL

En la mecánica de fluidos, la masa adherida es la inercia añadida a un sistema debido a la aceleración

o desaceleración de un cuerpo que se encuentra inmerso en un fluido, el cual debe mover el fluido que lo rodea. Wagner [5] fue el primero en aplicar la teoría de adición de masa al estudio de impacto de secciones 2D en el agua, y determinó la distribución de presión alrededor de una sección tipo cuña y la fuerza de empuje del fluido en secciones tipo circular y cuña con entrada simétrica y velocidad constante.

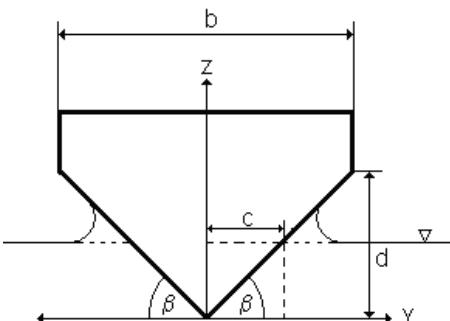


Figura 1. Sección tipo cuña con entrada simétrica
Figure 1. Wedge section with symmetric entrance

La figura 1 muestra una sección tipo cuña donde β es el ángulo de astilla muerta, z e y son las coordenadas cartesianas de la sección, c la distancia de media manga, b es la manga de la sección. Wagner [5] determinó que la distribución de presión en una sección tipo cuña es:

$$\frac{P(\xi)}{\rho} = \frac{\pi}{2 \tan \beta} \frac{V^2}{\sqrt{1-\xi^2}} - \frac{V^2}{2} \frac{\xi^2}{1-\xi^2} \quad (1)$$

Donde V es la velocidad en el impacto, ρ es la densidad del fluido, P es la presión y $\xi = \frac{y}{c}$.

Wagner [5] calculó la fuerza de sustentación hidrodinámica aplicando teoría de adición de masa de la siguiente manera:

$$F(t) = \frac{\mu \pi V^3}{\tan^2 \beta} t \quad (2)$$

Donde t es el tiempo y F la fuerza.

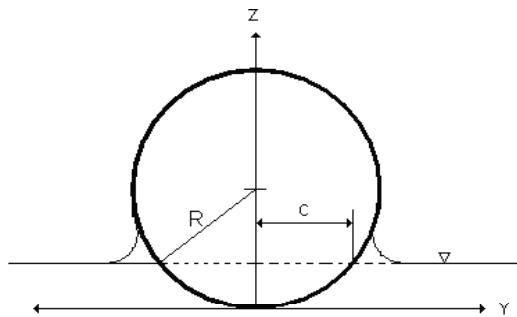


Figura 2. Impacto Sección circular con velocidad vertical
Figure 2. Circular section impact with vertical velocity

Para una sección circular, Wagner [5] propuso la fuerza en el impacto como:

$$F(t) = 2\mu \pi V^2 (R - V) \quad (3)$$

Donde R es el radio de la sección.

Tveitnes [3] estudió el impacto aplicando la teoría de adición de masa y su influencia en el planeo, determinando la fuerza de sustentación. Observó que la fuerza hidrodinámica que experimenta una sección tipo cuña se debe a la variación del momento del flujo y el momento de masa para una velocidad de entrada constante, también estudió el flujo después de la separación en el codillo de una sección tipo cuña.

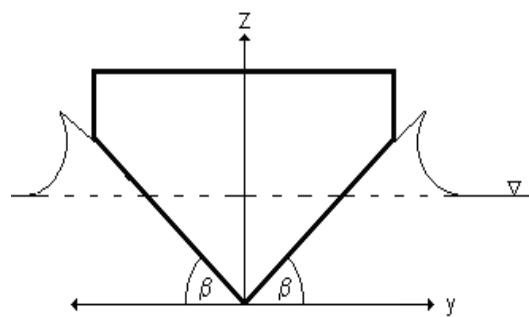


Figura 3. Sección tipo cuña con entrada simétrica y separación de flujo de la sección

Figure 3. Wedge section with symmetric entrance and flow separation.

Aplicando un desarrollo similar al de Wagner [5] encontró la fuerza hidrodinámica en la sección tipo cuña, introduciendo factores experimentales que dependen del ángulo de astilla muerta de la sección.

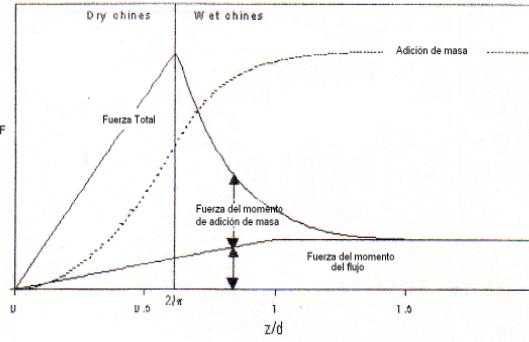


Figura 4. Magnitud de la fuerza de sustentación vs parámetro adimensional de profundidad (Tveitnes [3]).

Figure 4. Lift force magnitude vs adimensional parameter of depth (Tveitnes [3]).

La figura 4 muestra que la fuerza hidrodinámica aumenta hasta que comienza la separación del flujo y esto ocurre según Tveitnes [3] cuando $\frac{z}{d} = \frac{2}{\pi}$, a partir

de este momento decrece la variación de la adición de masa respecto al tiempo, Tveitnes [3] determinó empíricamente el comportamiento en esta zona, por otro lado la fuerza después de cierto tiempo permanece constante, esto se explica por el momento de flujo permanece constante después de la inmersión de los codillos. También cuantificó la fuerza hidrodinámica en la salida, observó que esta se da principalmente debido al momento de flujo

En la entrada de la sección la fuerza hidrodinámica por unidad de longitud es

$$F = F_m + F_{fn} \quad (4)$$

Donde F_m y F_{fn} son las fuerza hidrodinámicas debido al momento de masa y el momento del flujo respectivamente.

$$F_{fn} = C_{fn} \frac{1}{2} \rho V^2 * 2y, \quad z < d \quad (5)$$

$$F_{fn} = C_{fn} \frac{1}{2} \rho V^2 * b, \quad z > d, \quad (6)$$

$$C_{fn} = 1.08 \cos^2 \beta \quad (7)$$

$$F_m = C_m w^2 \rho \pi \frac{z}{\tan^2 \beta}, \quad z < \frac{2}{\pi} d \quad (8)$$

$$\text{Donde } C_m = 0.89 \left(\frac{\pi}{2\beta} - 1 \right)^2 \tan^2 \beta \quad (9)$$

$$F_m = C_m w^2 \rho \frac{b^2}{2\pi} \frac{0.57^2}{\frac{Z_c^2}{d} + \frac{\pi}{\pi} + \frac{0.57^2 d}{\pi^2}}$$

$$\text{Para } z > \frac{2}{\pi} d \quad (10)$$

$$\text{Donde } z_c = z - \frac{2}{\pi} d \quad (11)$$

Söding [1] generalizó el impacto para la entrada simétrica para cualquier tipo de sección con velocidad de entrada y ángulo de astilla muerta variable, también evaluó la separación del flujo para secciones con codillos, cuantificando la fuerza vertical y la distribución de presión. Como se muestran en la figura 5 c, T y A son la distancia de media manga, la altura y área húmeda respectivamente, mientras grafica c_0 , T_0 y A_0 son la distancia de media manga, la altura y área sumergida.

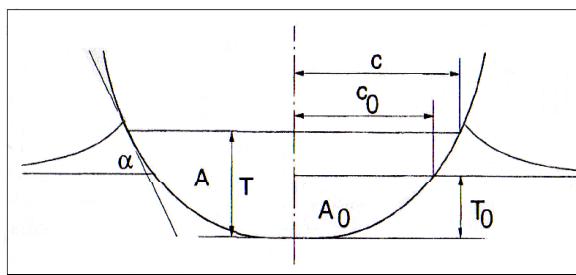


Figura 5. Sección con ángulo de astilla muerta variable, (Söding [1])

Figure 5. Section with variable dead rise angle, (Söding [1])

La fuerza por unidad de longitud evaluada por Söding [1] se deriva de un desarrollo similar al de Wagner [3] con la siguiente ecuación:

$$F = k \rho \frac{\pi}{2} \left(c^2 \frac{dV}{dt} + \text{Max}(V, 0) \frac{dc^2}{dt} \right) \quad (12)$$

Donde k es un factor de corrección que depende del ángulo de astilla muerta, para una velocidad constante de entrada

$$F = k \rho \frac{\pi}{2} \left(V \frac{d^2}{dt} \right) \quad (13)$$

La altura húmeda y sumergida se relaciona mediante la siguiente ecuación.

$$T = T_0 + 0.6A/c \quad (14)$$

De acuerdo a la ecuación 16, el valor de T se determina de forma iterativa. La velocidad se determina de la siguiente forma:

$$V = \frac{1}{c} \frac{dA}{dt} - \frac{d}{dt} (T - T_0) \quad (15)$$

El factor de corrección k se calcula de la siguiente forma

$$k = 0.75 \left(\frac{\pi}{2} - \bar{\alpha} \right) \quad (16)$$

$$\text{Donde } \bar{\alpha} = \arctan(2A/c^2)$$

Después de la separación del flujo, cuando la altura T alcanza el codillo se estima que:

$$\frac{dc}{dz} = 0.64 \left(1 - \frac{\bar{\alpha}}{\pi/2} \right) \quad (17)$$

La distribución de presión se cuantifica de la siguiente manera:

$$P(y) = k \rho \frac{dV}{dt} \sqrt{c^2 - y^2} + \quad (18)$$

$$k \rho \text{max}(V, 0) c \frac{dc}{dt} \frac{1}{\sqrt{c^2 - y^2}}$$

Si la velocidad de entrada es constante,

$$P = k\rho \max(V, 0) c \frac{dc}{dt} \frac{1}{\sqrt{c^2 - y^2}} \quad (19)$$

Las expresiones mostradas anteriormente no incluyen la fuerza y la presión hidrostática que experimenta la sección cuando es sumergida, la cuales se cuantifican como:

$$F = \rho g A_0 \quad (20)$$

$$P = \rho g z \quad (21)$$

3. COMPARACIONES

Para solucionar el modelo de Söding [1] se discretizó la geometría de la sección y las ecuaciones diferenciales se calcularon aproximándolas mediante la aplicación de serie de Taylor, la formulación se programó en Matlab® determinando la distribución de fuerza y presión en el tiempo, el período de cálculo de maquina promedio es de 10s por simulación, siendo mucho menor que el tiempo usado por un CFD para modelar fenómenos superficie libre.

Los parámetros adimensionales de fuerza, presión y tiempo se definen como:

$$C_F = \frac{F}{\frac{1}{2} \rho b V^2} \quad (22)$$

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho V^2} \quad (23)$$

$$\tau = \frac{Vt}{\frac{1}{2} b} \quad (24)$$

Donde C_F , C_p y τ son los coeficientes de fuerza, presión y tiempo respectivamente.

Para una sección circular de radio $R=5.5m$ y una velocidad vertical de 10m/s se calculó la distribución de fuerza y presión como se muestran en la figuras 6, 7 y 8.

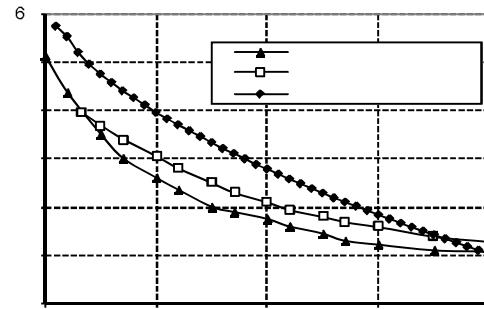


Figura 6. Impacto de sección circular. C_F vs τ

Figure 6. Circular section impact. C_F vs τ

La figura 6 muestra que la fuerza hidrodinámica es mayor cuando empieza el contacto con la superficie del agua, similar a los resultados mostrados por Mohamed [2], respecto a los resultados experimentales de Campbell [2], se sobre predice la fuerza en el inicio del contacto con en el agua, esto debido a que los resultados experimentales se ven afectados por la hidroelasticidad del fluido y la deformación elástica del cuerpo.

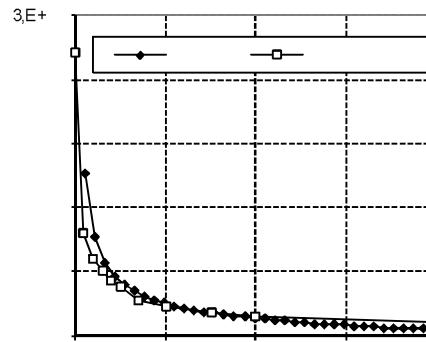


Figura 7. Distribución de presión en el tiempo de una sección circular, (punto inicial de contacto)

Figure 7. Pressure distribution of circular section, (initial contact point)

La figura 7 muestra la variación de la presión en el tiempo durante el impacto la sección circular en punto inferior de la sección se observa resultados muy similares a los encontrados por Mohamed [2] en sus experimentos con CFD. La distribución de presión debido al efecto hidrodinámico se muestra en la figura 8, se observa que la presión es mayor cuando empieza el contacto con el agua y va disminuyendo a medida que se va sumergiendo la sección.

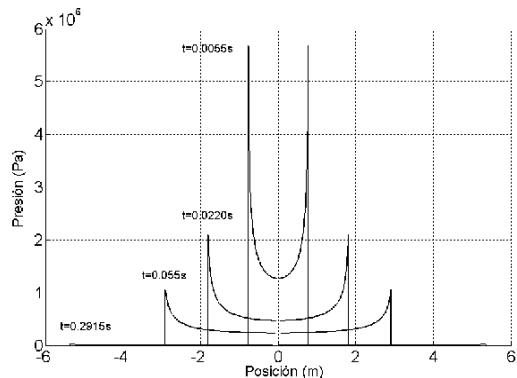


Figura 8. Presión vs posición, sección circular
Figure 8. Pressure vs position, circular section

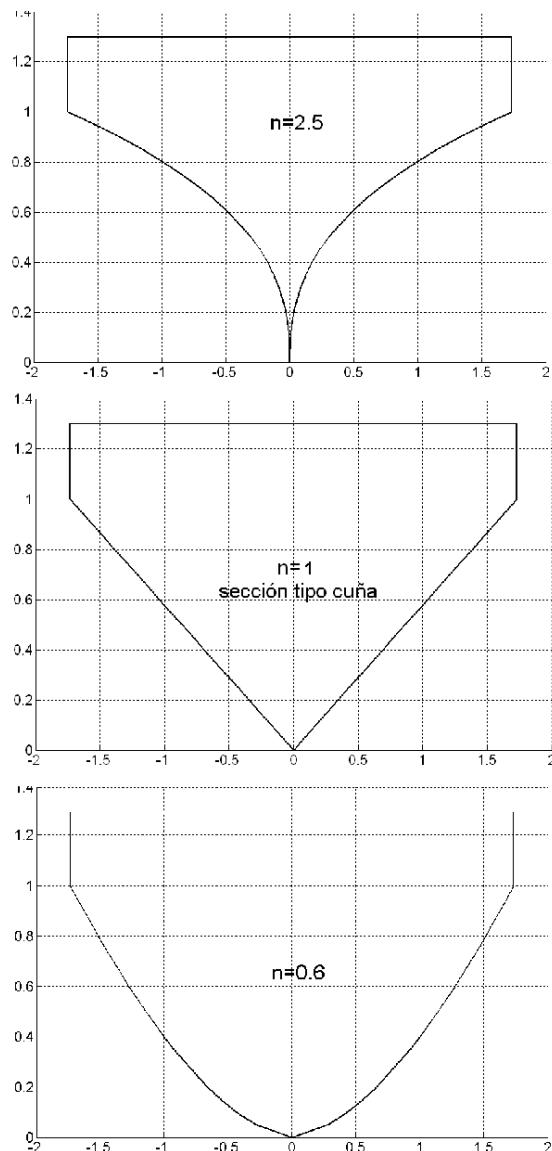


Figura 9. Secciones de la forma $c=1.732z^n$, para $n=2.5$,
1.0, y 0.6

Figure 9. Sections with the form $c=1.732z^n$, for $n=2.5$,
1.0, y 0.6

La figura 9 muestra secciones en las cuales se evaluó la distribución de fuerzas y de presión en el tiempo, se tomó una curva genérica polinómica de la siguiente forma $C=1.73z^n$ donde n se evaluó para los siguientes valores de $n=2.5, 1.0, 0.6$. Cuando $n>1$, la sección es cóncava, cuando $n=1$ la sección es tipo cuña, cuando $n<1$, la sección es convexa, todas las secciones tienen la misma distancia quilla-codillo $d=1m$, una manga $b=3.464m$, las secciones cóncava y convexa tiene ángulo de astilla muerta variable mientras se sumerge. Los resultados de la distribución de fuerza y distribución de presión en el tiempo de las secciones se muestran en las graficas 10 a la 15. En las graficas 10, 11 y 12 se muestran los coeficientes adimensional de fuerza hidrodinámica. Para las secciones cóncavas, se tiene un pico mayor en la fuerza hidrodinámica y aumenta a medida que aumenta el exponente n . Sin embargo, al inicio del impacto la fuerza hidrodinámica crece muy lentamente para este tipo de secciones.

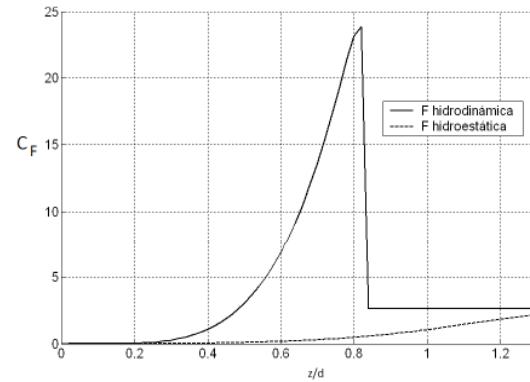


Figura 10. C_F vs z/d , $n=2.5$
Figure 10. C_F vs z/d , $n=2.5$

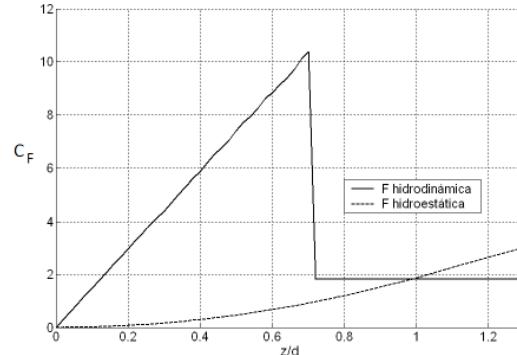


Figura 11. C_F vs z/d , $n=1$
Figure 11. C_F vs z/d , $n=1$

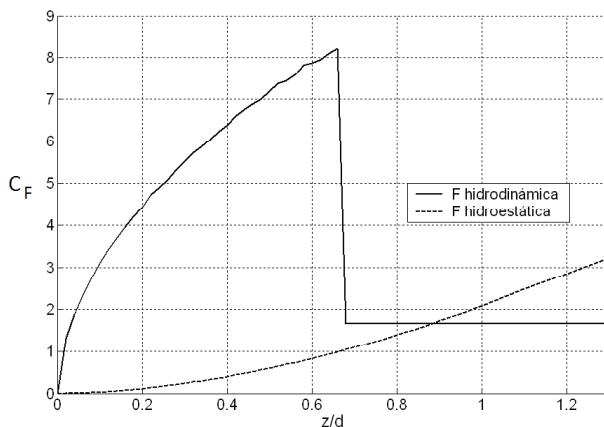


Figura 12. C_F vs z/d , $n=0.6$
Figure 12. C_F vs z/d , $n=0.6$

Para las secciones convexas el pico de fuerza hidrodinámica es menor en comparación con las secciones cóncavas, en general al inicio del impacto para una sección convexa la fuerza aumenta mas rápidamente que una sección cóncava, entre menor sea el coeficiente n , mas rápido es el aumento en el comienzo del impacto y mas rápido llega su valor máximo. Esto se debe a que la fuerza depende de $c = \frac{dc}{dt}$. El momento de

la separación del flujo de la sección coincide con el momento donde se da la máxima fuerza durante el impacto, para la sección tipo cuña, $n=1$, la separación del flujo se da cuando $\frac{z}{d} \approx \frac{2}{\pi}$, como lo

predice Tveitnes [3].

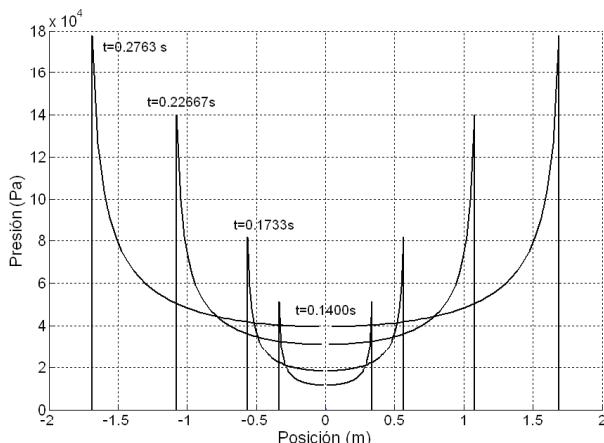


Figura 13. Distribución de presión en el tiempo, $n=2.5$
Figure 13. Pressure distribution in the time, $n=2.5$

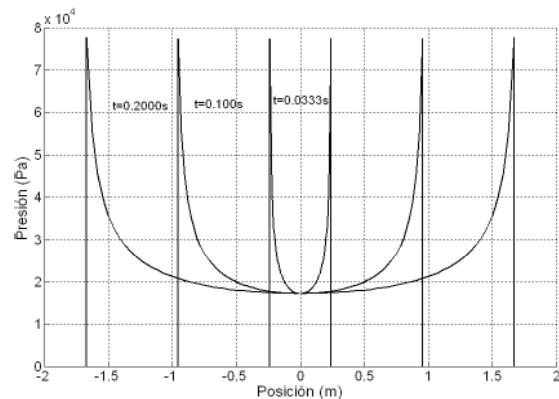


Figura 14. Distribución de presión en el tiempo, $n=1$
Figure 14. Pressure distribution in the time, $n=1$

Las figuras 13 a la 15 muestran la distribución de presión en el tiempo antes de la separación del flujo de la sección. En general se observa que para las secciones cóncavas la presión aumenta a medida que esta se va sumergiendo, para la sección tipo cuña, el valor pico de presión permanece constante en el tiempo como lo predijo Wagner [5]. Para una sección convexa el pico de presión se da al inicio del impacto y va disminuyendo a medida que transcurre el tiempo. A pesar de que los picos de presión son grandes en secciones de geometría convexa, la fuerza de sustentación es pequeña, esto debido a que la ocurrencia se da al inicio del impacto donde el área de contacto es pequeña.

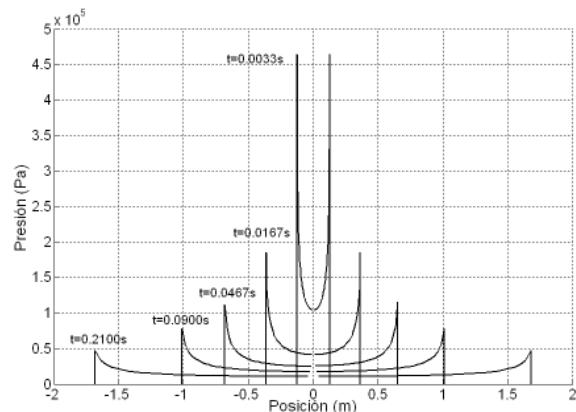


Figura 15. Distribución de presión en el tiempo, $n=0.6$
Figure 15. Pressure distribution in the time, $n=0.6$

La figura 16 muestra secciones cóncava, cuña y convexa evaluadas por Voros [4]. Las figuras 17, 18 y 19 muestran la distribución de presión en la quilla en el tiempo para diferentes tipos de secciones. Los

resultados muestran gran similitud en la distribución de la presión antes de la separación del flujo del codillo.

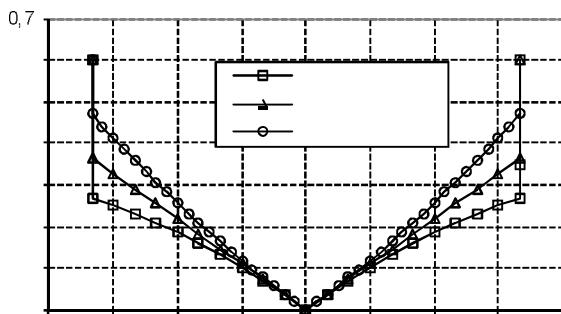


Figura 16. Secciones evaluadas por Vorus [4]
Figure 16. Sections evaluated by Vorus [4]

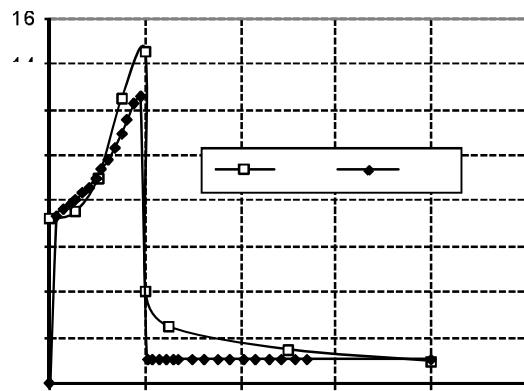


Figura 17. C_p vs τ , Sección 20-10
Figure 17. C_p vs τ , Section 20-10

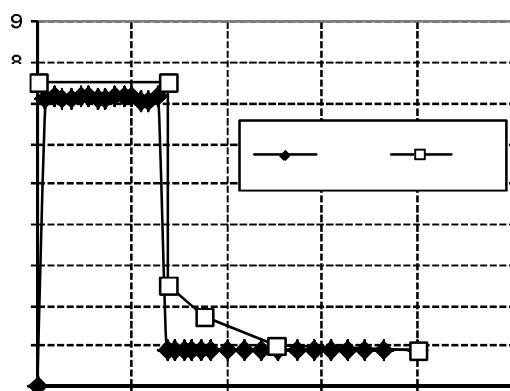


Figura 18. C_p vs τ , Sección 20-20
Figure 18. C_p vs τ , Section 20-20

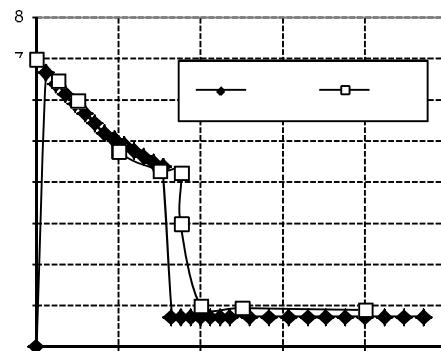


Figura 19. C_p vs τ , Sección 20-30
Figure 19. C_p vs τ , Section 20-30

Las figuras 20, 21 y 22 muestran la fuerza hidrodinámica en el tiempo para las mismas secciones.

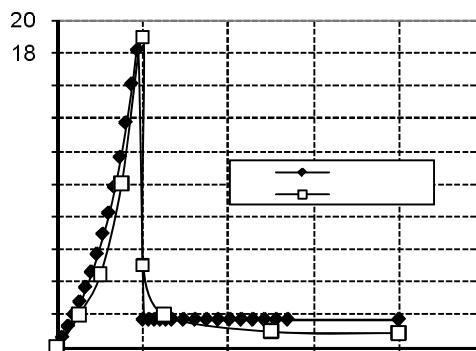


Figura 20. C_F vs τ , Sección 20-10
Figure 20. C_F vs τ , Section 20-10

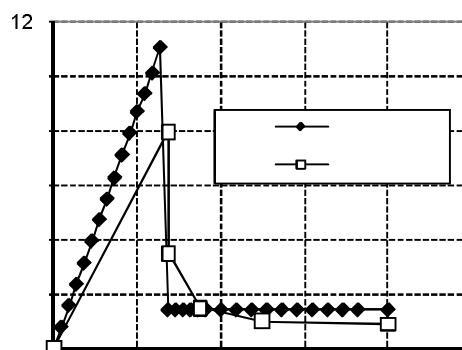


Figura 21. C_F vs τ , Sección 20-20
Figure 21. C_F vs τ , Section 20-20

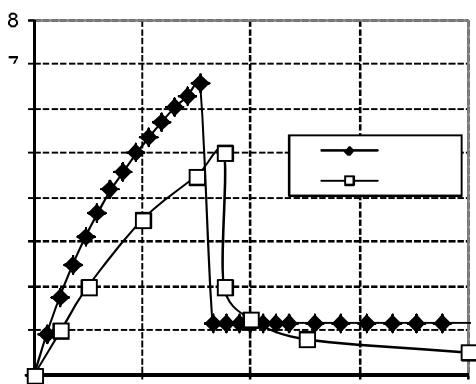


Figura 22. C_F vs τ , Sección 20-30

Figure 22. C_F vs τ , Section 20-30

En la figura 20, sección cóncava se observa una gran similitud entre los resultados de Vorus [4] y Söding [1] respecto a la magnitud de la fuerza hidrodinámica, sin embargo los valores predichos por el algoritmo de Söding para secciones cuña y convexa son mayores que los mostrados por Vorus [4].

La figura 23 muestra los resultados de la fuerza hidrodinámica en el tiempo durante impacto de una sección tipo cuña, se observa que el algoritmo de Söding da valores mas altos de picos de fuerza que el modelo de Tveitnes [3] para ángulos de astilla muerta de 10° y 20° y menor valor para un ángulo de astilla muerta de 30° .

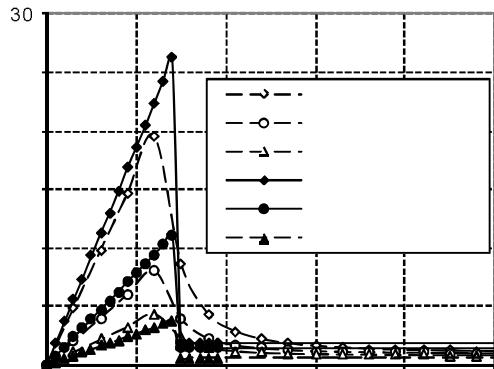


Figura 23. Impacto de sección tipo cuña, C_F vs z/d

Figure 23. Wedge Section impact, C_F vs z/d

La figura 24 muestra una sección típica, en la cual cambia el ángulo de astilla muerta de 15° a 30° grados,

el grafico 25 se observa el coeficiente adimensional de fuerza hidrodinámica, en el inicio del impacto se comporta como una cuña de 15° de ángulo muerto, en el cambio de sección existe un cambio de pendiente $\frac{dc}{dt}$ y disminuye la fuerza abruptamente, a medida que se sumerge la sección en el impacto la fuerza aumenta hasta que ocurre la separación del flujo.

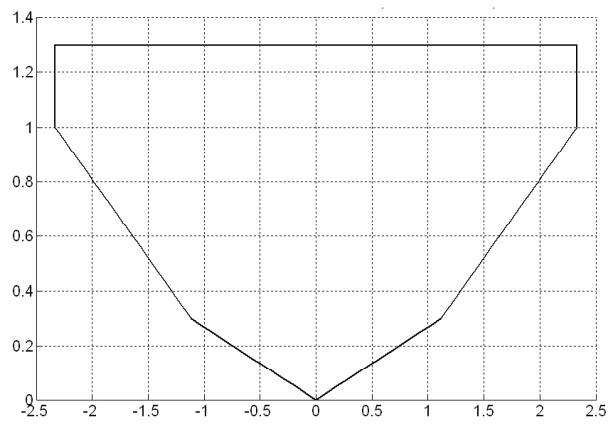


Figura 24. Geometría de sección típica

Figure 24. Typical section geometry

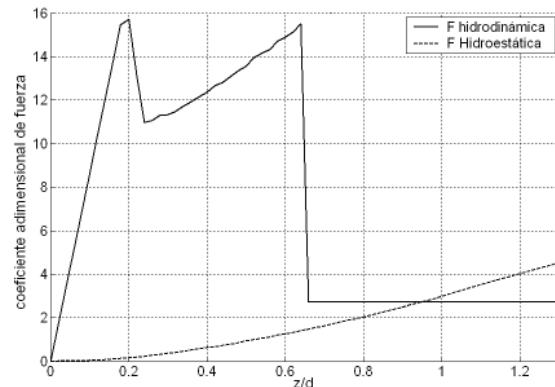


Figura 25. Distribución de fuerza en el tiempo de sección típica, C_F vs z/d

Figure 25. Force distribution of typical section, C_F vs z/d

La figura 26 muestra la distribución de presión en el tiempo para la sección típica, se observa que en los primeros instantes del impacto los picos presión permanecen constantes, similar al caso de una sección tipo cuña simple, en el cambio de sección esta disminuye bruscamente, después del cambio de sección esta sigue disminuyendo de manera suave, hasta que ocurre la separación del flujo.

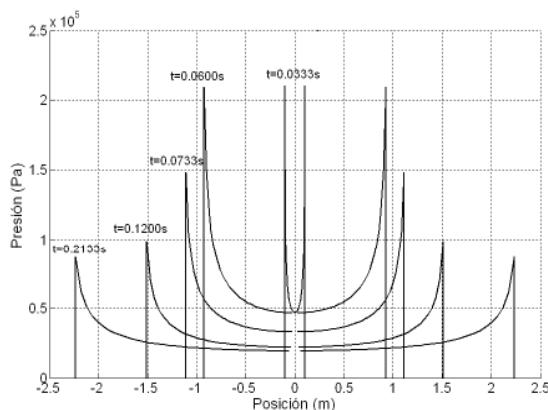


Figura 26. Distribución de presión en el tiempo de sección típica

Figure 26. Pressure distribution in typical section

4. CONCLUSIONES

El estudio del impacto 2D con entrada simétrica de secciones muestra que las características de distribución de presión y fuerza en el tiempo durante el impacto dependen de la geometría de la sección, un parámetro importante que influye es la magnitud del cambio de la longitud de media manga $c = \frac{dc}{dt}$, relacionado

íntimamente con el ángulo local de astilla muerta, por lo cual se observa que para secciones cóncavas que la presión aumenta cuando se sumerge la sección, al igual que la fuerza, esta crece cuando disminuye el ángulo de astilla muerta hasta el momento en que ocurre la separación del flujo del codillo. Para secciones tipo cuña el ángulo de astilla muerta es constante por lo cual la magnitud del pico de presión

permanece constante y también lo es la pendiente de la curva F vs t. En caso de secciones convexas el ángulo de astilla muerta aumenta cuando se sumerge la sección, por lo cual el pico de presión se da en el punto inicial del contacto y empieza a caer en el tiempo, por otro lado la pendiente de la curva F vs t disminuye a medida que se sumerge.

Es posible determinar el comportamiento general respecto de la distribución de presión y fuerzas en el tiempo utilizando pocos recursos computacionales a partir del algoritmo desarrollado por Söding [1].

REFERENCIAS

- [1] SÖDING, H. Flow Computations for Ship Safety Problems, Ocean Engineering, 29, 721-738, 2002.
- [2] MOHAMMED S. S., SEYED M. M., SEYED H. S., Numerical Modeling of 2-D Water Impact in One degree of Freedom, Síntesis Tecnológica, 2, 79-83, 2005.
- [3] TVEITNES, T. Application of Added Mass theory in planing [Ph.D. Thesis], University of Glasgow, 2001.
- [4] VORUS, W. S., A flat cylinder theory for vessel impact and steady planing resistance. *Journal of Ship Research*, 40, 2. 89-106, 1996
- [5] WAGNER, H., Über stoss – und gleitvorgänge an der oberflashe von flüssig-keiten. *Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*, 12, 193-215, 1932.
- [6] SAVANDER, B., Steady Hydrodynamic Analysis of planing Surfaces. *Journal of Ship Research*, 46, 248-279, 2002.