

Fig. 1.- DECAIMIENTO DE LA ENERGIA CINETICA TURBULENTA EN UN ESTANQUE AGITADO POR MICROCHORROS.
 Datos de Pujol (1999)

MODELACION k-ε DE LA RESUSPENSION DE SEDIMENTOS INDUCIDA POR EL VIENTO

INGRID HILLMER¹
 YARKO NIÑO²

RESUMEN

Se presentan resultados de una modelación numérica del proceso de resuspensión de sedimentos desde el lecho de un cuerpo de agua, inducido por la acción del viento soplando sobre la superficie libre. El fenómeno es modelado utilizando una versión cuasi-bidimensional de las ecuaciones de Reynolds, acopladas con un modelo de cierre de la turbulencia de tipo k-ε, y la ecuación de continuidad de sedimento. El modelo matemático es resuelto numéricamente usando el método de los volúmenes de control. Los resultados de la simulación respecto de las corrientes de circulación generadas por el viento en el cuerpo de agua son validados a partir de datos experimentales. Estos resultados predicen la existencia de seiches, durante los cuales el esfuerzo de corte sobre el fondo oscila hasta alcanzar un valor constante, asintóticamente en el tiempo. Este esfuerzo de corte es capaz de generar la resuspensión de sedimento desde el lecho. El modelo permite determinar la distribución vertical de concentración de sedimento en suspensión en el cuerpo de agua, la que depende del esfuerzo de corte inducido por el viento en la superficie libre, la profundidad del flujo y el tamaño de las partículas de sedimento del lecho. Para ciertas condiciones de flujo y tamaño de partículas, que implican una concentración extremadamente alta de sedimento en las cercanías del lecho, las simulaciones muestran la formación de una estratificación del flujo con la presencia de una interfaz de densidad, conocida como lutoclina. Los resultados de las simulaciones son utilizados para determinar una expresión que permite estimar la concentración de sedimento en las cercanías del lecho, basada en el esfuerzo de corte ejercido por el viento, la profundidad del flujo y el tamaño de las partículas de sedimento del lecho.

¹Instructor, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile

²Profesor Asistente, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile

1. INTRODUCCION

En cuerpos de agua como lagos y embalses, el viento juega un papel muy importante debido a que es una de las principales fuentes de energía mecánica, la que una vez transferida al agua es utilizada en la generación de olas y corrientes y por lo tanto en la producción de energía cinética turbulenta. Esto influye directamente en los procesos de mezcla y controla el transporte de sedimentos desde el fondo del cuerpo de agua y su difusión en la columna de agua, generando una distribución vertical de concentración de sedimentos en suspensión.

El viento ejerce sobre la superficie del cuerpo de agua un esfuerzo de corte, parte del cual es extraído por las olas. El resto del esfuerzo de corte disponible es utilizado en la generación de una corriente superficial en la dirección del viento, la cual es compensada por una corriente por el fondo en la dirección opuesta. Esta corriente ejerce un esfuerzo de corte en el fondo menor al esfuerzo de corte superficial, el cual es capaz de incorporar sedimento desde el fondo del cuerpo de agua. Esto implica, que el proceso de resuspensión de sedimentos está controlado por la interacción entre la capa límite turbulenta y la estructura del material del lecho.

El estudio de este proceso de resuspensión de sedimentos tiene gran importancia debido a la influencia que éste tiene en la calidad del agua y el desarrollo de la vida acuática. El sedimento en el fondo del cuerpo de agua puede estar compuesto por metales pesados, materia orgánica y nutrientes los cuales bajo ciertas condiciones son liberados a la columna de agua. De esta manera, cuando existe resuspensión de partículas desde el lecho no sólo aumenta la turbiedad, disminuyendo la cantidad de luz capaz de traspasar la columna de agua, sino que además existe la posibilidad de poner en circulación sustancias tóxicas o que pueden afectar las condiciones físico-químicas del agua, tales como la demanda de oxígeno disuelto.

En este estudio se presentan los resultados de una simulación numérica del proceso de resuspensión inducido por el viento, utilizando un modelo cuasi-bidimensional, que incorpora el modelo de cierre turbulento k-ε. Se utiliza en este estudio una relación empírica para determinar la tasa de resuspensión en condiciones de equilibrio dada por García y Parker (1991).

2. ECUACIONES QUE GOBIERNAN EL PROBLEMA

Para la modelación numérica se considera un flujo uni-dimensional, despreciando los gradientes en la horizontal con excepción del gradiente de presión longitudinal, y despreciando el efecto de rotación de la Tierra o fuerzas de Coriolis. De acuerdo a estas hipótesis, la ecuación para la cantidad de movimiento en la dirección del viento (promediada sobre la turbulencia), para un fluido incompresible, queda como:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_{ef} \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (1)$$

donde u denota la velocidad del flujo en la dirección del esfuerzo de corte, p es la presión, x representa el eje horizontal en la dirección del viento, z es el eje vertical con el origen en el fondo del canal, y t corresponde al tiempo. Para la determinación del gradiente de presión se utiliza una

ecuación propuesta por Svensson (1989) que entrega la variación en el tiempo de este gradiente. La densidad del agua, ρ , está determinada por la ecuación de estado

$$\rho = \rho_0 (1 + RC) \quad (2)$$

donde R corresponde a la densidad específica sumergida del sedimento, para el cual se considera un valor de 1,65, y C denota la concentración volumétrica de sedimentos en suspensión.

La viscosidad cinemática efectiva, v_{ef} , está compuesta por la viscosidad cinemática de remolino, v_r , y la viscosidad cinemática del agua, v , de modo que:

$$v_{ef}(z,t) = v + v_r(z,t) \quad (3)$$

La viscosidad cinemática de remolino v_r se estima a partir del modelo de cierre turbulento k-ε:

$$v_r = c_{\mu} \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4)$$

donde k denota la energía cinética turbulenta, ε representa la tasa de disipación de esta energía y c_{μ} es una constante (=0,09). Las ecuaciones que modelan estas variables son las siguientes:

$$\frac{\partial k}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{v_r}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right) + v_r \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + Rg \frac{v_r}{\sigma_c} \frac{\partial \phi}{\partial z} - \varepsilon \quad (5)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{v_r}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) + c_{1\varepsilon} v_r \frac{\varepsilon}{k} \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + c_{3\varepsilon} Rg \frac{\varepsilon v_r}{k \sigma_c} \frac{\partial \phi}{\partial z} - c_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (6)$$

En estas ecuaciones σ_k (=1,4) y σ_ε (=1,3) representan los números turbulentos de Prandtl/Schmidt (Rodi, 1984), y $c_{1\varepsilon}$ (=1,44), $c_{2\varepsilon}$ (=1,92) y $c_{3\varepsilon}$ (0,288) son coeficientes empíricos.

La ecuación para la conservación de sedimento en suspensión es la siguiente:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\left(\frac{v}{\sigma_c} + \frac{v_r}{\sigma_{t,c}} \right) \frac{\partial C}{\partial z} + w_s C \right) \quad (7)$$

donde w_s corresponde a la velocidad de sedimentación, y σ_c y $\sigma_{t,c}$ son los números de Prandtl/Schmidt molecular y turbulento respectivamente para la concentración de sedimentos. El valor de éstos últimos números es afectado por las fuerzas de flotación mediante la fórmula propuesta por Launder (1975).

Las condiciones de borde para la ecuación de cantidad de movimiento corresponden a una condición del tipo Neumann (de flujo) en la superficie libre, que corresponde al esfuerzo de corte τ_s conocido

$$\tau_s = \rho u_*^2 = \rho \nu \left. \frac{\partial u}{\partial z} \right|_{z=H} \quad (8)$$

y a una de tipo Dirichlet en el fondo o condición de no resbalamiento ($u=0$). Debido a que el modelo de turbulencia empleado no se puede aplicar en la subcapa viscosa es necesario utilizar funciones puente que permiten conectar las condiciones de la superficie libre y del fondo con las condiciones del flujo. Para k y ε se establecieron valores conocidos cerca del fondo y de la superficie libre, los cuales consideran los efectos boyantes debido a la presencia de sedimento en suspensión Rodi (1984).

Las condiciones de borde para la ecuación de continuidad del sedimento en suspensión corresponden a una concentración de referencia cerca del fondo y flujo de sedimento nulo en la superficie libre. La concentración de referencia se obtiene usando la relación propuesta por García y Parker (1991), la cual fue derivada para condiciones de equilibrio. Sin embargo, observaciones experimentales entregan evidencia de que esta relación puede ser utilizada en condiciones impermanentes, como una buena aproximación (Rodríguez y García, 1998):

$$C_{ref} = AZ_u^5 \left(1 + \frac{AZ_u^5}{0.3} \right)^{-1} \quad (9)$$

donde $Z_u = \frac{u_* h}{w_s} R_p^{0.6}$, donde u_* corresponde a la velocidad de corte en el fondo, $R_p = \frac{\sqrt{Rgd_s^3}}{\nu}$ y $A = 1.3 \times 10^{-7}$.

Para la resolución numérica del sistema de ecuaciones que gobiernan el problema se utilizó el método de los volúmenes de control (Svensson, 1986).

3. RESULTADOS DE LA SIMULACION

El esfuerzo de corte ejercido por el viento sobre la superficie libre de un cuerpo de agua de dimensiones finitas, como un lago o un embalse, genera una corriente superficial en la dirección del viento, generándose un gradiente de presión longitudinal el cual es compensado por una corriente de retorno por el fondo. Los resultados de las simulaciones muestran este comportamiento y además presentan un buen ajuste con resultados experimentales obtenidos por Baines y Knapp (1965) y Tsuruya (1985). En la Fig.1 se muestran los resultados de la simulación numérica en la situación de equilibrio y los resultados de Tsuruya para distintos valores de $Re_* = u_* H / \nu$, donde u_* corresponde a la velocidad de corte superficial y H a la profundidad total de escurrimiento.

Las simulaciones muestran la presencia de oscilaciones en la superficie libre del cuerpo de agua o seiches, asociadas directamente al gradiente de presión longitudinal, las que decaen con el tiempo asintóticamente. La razón L/H , siendo L la dimensión longitudinal del cuerpo de agua, afecta el desarrollo del gradiente de presión longitudinal, y por lo tanto la evolución de estas oscilaciones, afectando también la evolución temporal del esfuerzo de corte ejercido en el fondo del cuerpo de agua y de la velocidad del flujo. En las Figs.2 y 3 se observa la evolución temporal del perfil de velocidad y del esfuerzo de corte en el fondo, τ_b para un valor de $L/H=2000$, un esfuerzo de corte superficial, τ_s , de $0,5[N/m^2]$ y una profundidad del cuerpo de agua igual a $0,5[m]$. En ambas figuras se observa la presencia de oscilaciones en torno a la situación final. El valor positivo de τ_b indica que el flujo cerca del fondo se mueve en la dirección del viento, lo cual ocurre sólo en los primeros instantes, mientras se genera el gradiente de presión longitudinal. En el caso simulado en las Figs. 2 y 3 se tiene además sedimento en suspensión, caracterizado por un diámetro de partícula de $0,5[\mu m]$. La evolución temporal que presenta el perfil de concentración se muestra en la Fig.4. En esta figura se observa que el perfil de concentración presenta oscilaciones, con fluctuaciones importantes en los valores de la concentración para los primeros instantes, obteniéndose, valores bastante altos en comparación con la concentración que se obtiene en la condición de equilibrio. Los resultados de la modelación permiten concluir que la condición de equilibrio no se ve afectada por la razón L/H , sin embargo, ella si afecta la evolución temporal del esfuerzo de corte en el fondo y por lo tanto la evolución del perfil de la concentración de sedimentos en suspensión.

El modelo es capaz de predecir la formación de una lutoclina (discontinuidad de densidad debido a la presencia de sedimento en suspensión) para valores del esfuerzo de corte en la superficie más altos. En la Fig.5 se presenta el perfil vertical de concentración de sedimentos en suspensión en la situación final, adimensionalizada con la concentración de referencia, para el caso correspondiente a una profundidad de $0,5[m]$, diámetro de partícula de $30[\mu m]$ y un esfuerzo de corte superficial de $1,5[N/m^2]$. El valor utilizado para τ_s genera un alto valor de C_{ref} , produciéndose un fuerte gradiente de densidad que inhibe la difusión de concentración en la vertical, lo que a su vez favorece el desarrollo de la lutoclina. De esta manera se genera un flujo estratificado en dos capas.

4. DISCUSION

Considerando la situación de equilibrio, el proceso de resuspensión de sedimentos queda definido por los parámetros Re_* y la razón entre la velocidad de sedimentación y la velocidad de corte superficial, w_s/u_* . En la Fig.6 se muestran los resultados de la simulación para los perfiles de concentración adimensional, C/C_{ref} , para distintos valores de la razón w_s/u_* . En esta figura se observa que valores pequeños de esta razón generan un perfil de concentración más uniforme en la columna de agua. Según los resultados obtenidos, esta distribución de concentración resulta prácticamente independiente del número de Reynolds.

La presencia de sedimentos en suspensión afecta las características del flujo. Los resultados muestran una dependencia de la razón τ_b/τ_s con Re_* y la razón w_s/u_* , tal como se observa en la Fig.7. Es posible apreciar que esta dependencia con la razón w_s/u_* es importante para valores de este parámetro menores a $0,1$, pero para valores mayores a este límite se

considera que τ_b/τ_s sólo depende de Re_* . En la Fig.8 se presenta el comportamiento de τ_b/τ_s en función de Re_* (con $w_s/u_* > 0,1$) obteniéndose la siguiente relación:

$$\frac{\tau_b}{\tau_s} = -0,29Re_*^{-0,26} \quad (10)$$

A partir de la relación (10) es posible estimar la concentración de referencia inducida por el viento, basada en la relación propuesta por García y Parker (1995), de manera que:

$$C_{ref} = A' Z_u'^{1,5} \left(1 + \frac{A' Z_u'^{1,5}}{0,3} \right)^{-1} \quad (11)$$

donde $Z_u' = Z_{us} Re_*^{-0,13}$ con $Z_{us} = (u_*'/w_s) R_p^{0,6}$ y $A' = 3,77 \times 10^{-8}$. La concentración de referencia disminuye a medida que Re_* aumenta, como se puede apreciar en la Fig.9, de modo que para un valor dado del esfuerzo de corte superficial, C_{ref} es mayor en un cuerpo de agua de poca profundidad que en uno más profundo y por lo tanto el efecto que tiene el esfuerzo de corte ejercido en la superficie en el proceso de resuspensión es más importante, obteniéndose mayores concentraciones de sedimento en suspensión en toda la columna de agua.

5. CONCLUSIONES

El presente modelo reproduce adecuadamente datos experimentales de la distribución vertical de velocidades del flujo inducido por el viento soplando en la superficie libre de un cuerpo de agua. Las simulaciones realizadas muestran la existencia de *seiches*, asociados con la oscilación del gradiente longitudinal de presión, produciendo oscilaciones amortiguadas tanto de las velocidades del flujo como del esfuerzo de corte sobre el fondo. El modelo permite calcular la distribución vertical de concentración de sedimento en suspensión generado por el flujo inducido por el viento. No se contó con datos experimentales para validar estos resultados. Para ciertas condiciones de flujo y tamaño de partículas, que implican una concentración extremadamente alta de sedimento en las cercanías del lecho, las simulaciones muestran la formación de una estratificación del flujo con la presencia de una interfaz de densidad, conocida como lutoclina. Del análisis de las simulaciones realizadas, se determinó una relación entre la razón de esfuerzos de corte superficial y de fondo, la razón entre la velocidad de sedimentación de las partículas de sedimento y la velocidad de corte del viento, y el número de Reynolds del flujo, Re_* . Este resultado es utilizado para determinar otra relación que permite estimar la concentración de sedimento en suspensión inducida por el viento en las cercanías del lecho.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el financiamiento otorgado por FONDECYT, a través del proyecto N° 1981180, y por el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile.

7. REFERENCIAS

- Baines, W.D., and Knapp, D.J. (1965). "Wind driven water current." *J. Hydr. Div., ASCE*, Vol 91, No. HY2, pp. 205-221.
- García, M. and Parker, G. (1991). "Entrainment of bed sediment into suspension." *J. Hydr. Engrg.*, Vol.117, No.4, pp. 414-435.
- Rodríguez, J.M., and García M. (1998). "Incorporación de sedimento en suspensión en flujos turbulentos no permanentes" XVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, IAHR. Oaxaca; México, pp 175-184.
- Rodi, W. (1984). "Turbulence models and their application in hydraulics". IAHR Monograph.
- Svensson, U. (1989). "Formulae for pressure gradients in one-dimensional lake models". *J. Geophys. Res.*, Vol. 94, pp. 4939-4946.
- Svensson, U. (1986). "Program for Boundary Layers in the Environment." Swedish Meteorological and Hydrological Institute, S-601 76.
- Tsanis, I.K. and Wu, J. (1995). "Numerical study of wind-induced water currents." *J. Hydr. Engrg.*, ASCE, Vol. 121, pp. 388-395.
- Tsuruya, H., Nakano, S., and Kato, H.J. (1985). "Experimental study on wind driven current in a wind-wave tank — Effect of return flow on wind driven current." *The Ocean surface*, pp. 425-430.

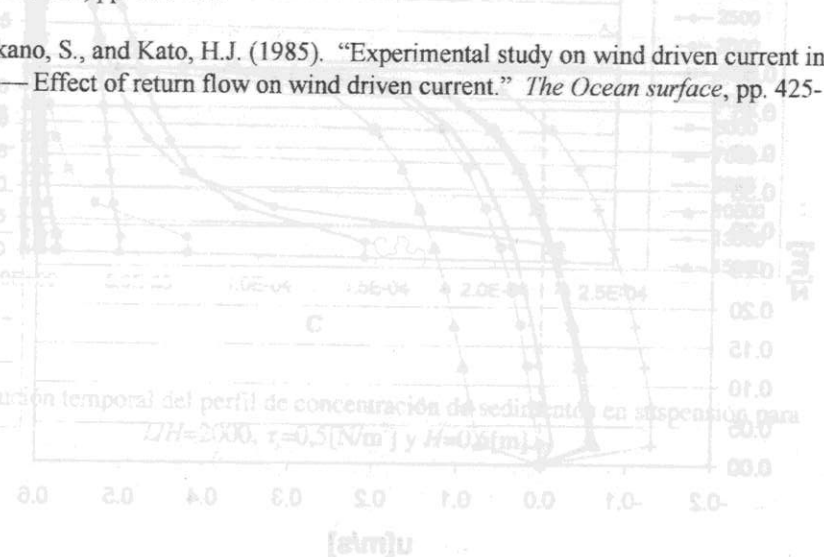


Fig.9: Evolución temporal del perfil de concentración de sedimento en suspensión para LH=2000, $\tau_s=0,5 [N/m^2]$ y $H=0,5 [m]$.

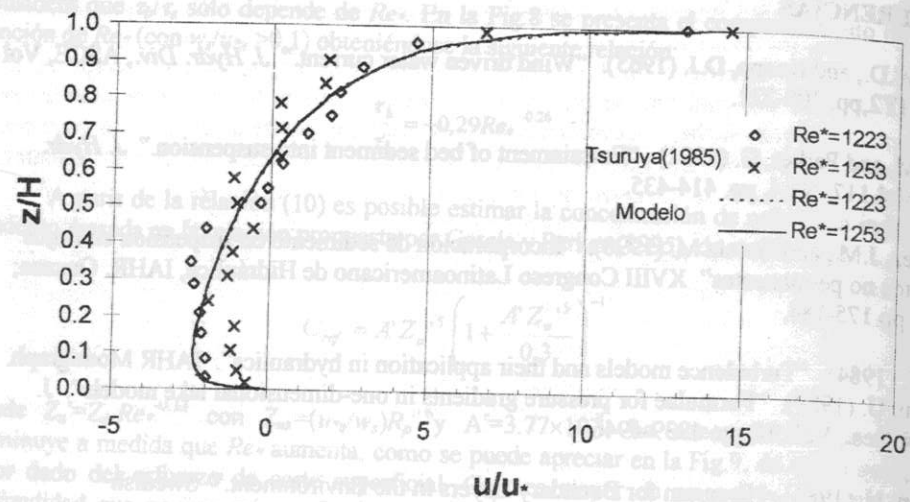


Fig1: Perfil de velocidad adimensional: comparación de los resultados de la simulación con resultados experimentales (Tsuruya, 1985).

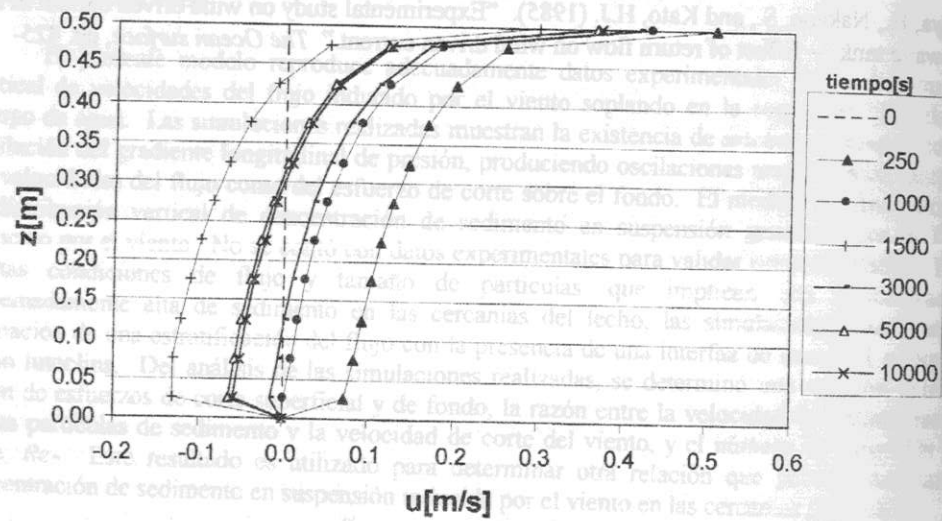


Fig2: Evolución temporal del perfil de velocidad para $L/H=2000$, $\tau_s=0,5[N/m^2]$ y $H=0,5[m]$.

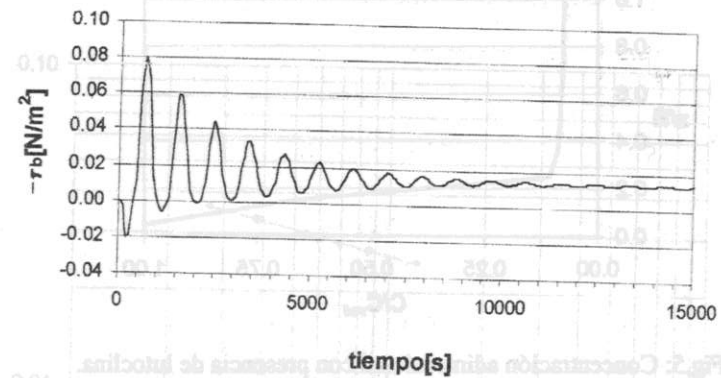


Fig.3: Evolución temporal del esfuerzo de corte en el fondo para $L/H=2000$, $\tau_s=0,5[N/m^2]$ y $H=0,5[m]$.

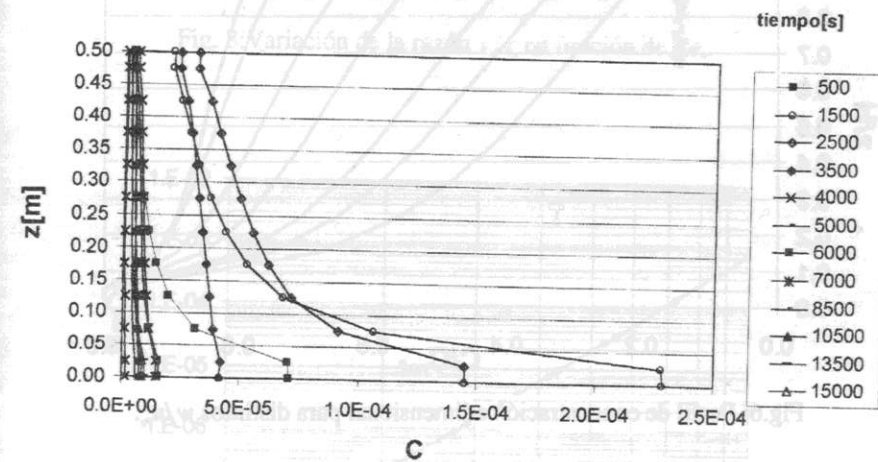


Fig.4: Evolución temporal del perfil de concentración de sedimentos en suspensión para $L/H=2000$, $\tau_s=0,5[N/m^2]$ y $H=0,5[m]$.

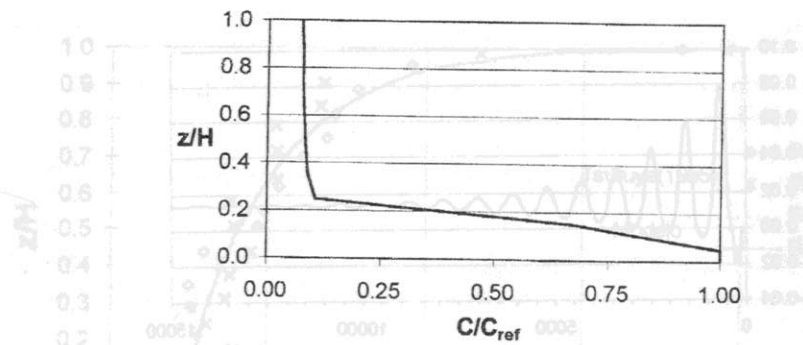


Fig.5: Concentración adimensional con presencia de lutoclina.

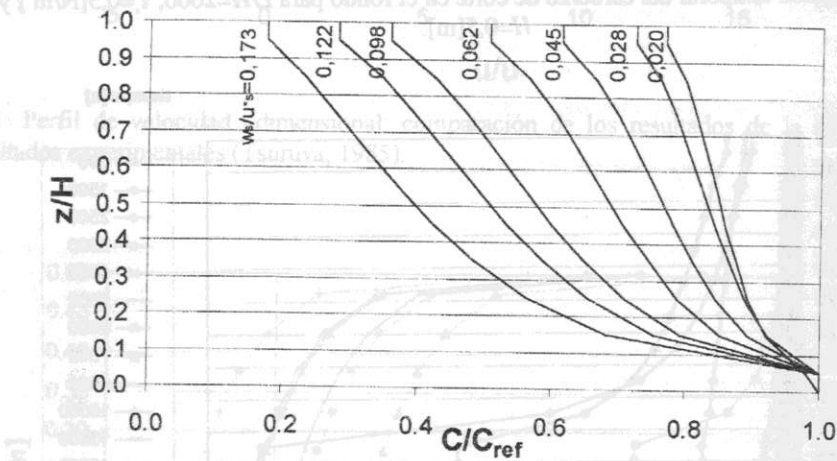


Fig.6: Perfil de concentración adimensional para distintos w_s/u_s .

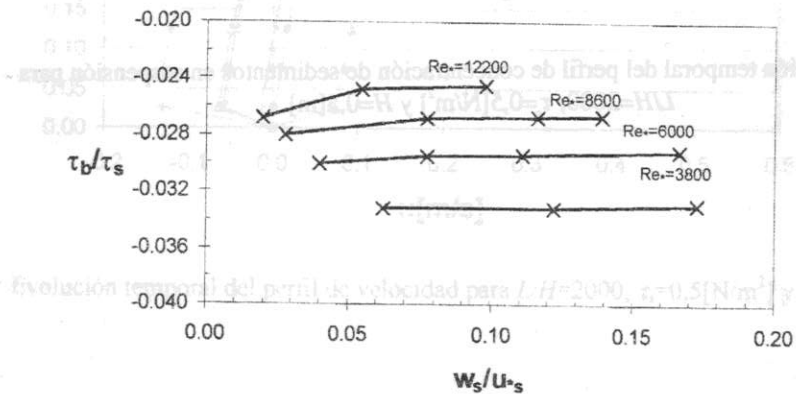


Fig.7: Variación de la razón τ_b/τ_s en función de w_s/u_s para distintos valores de Re .

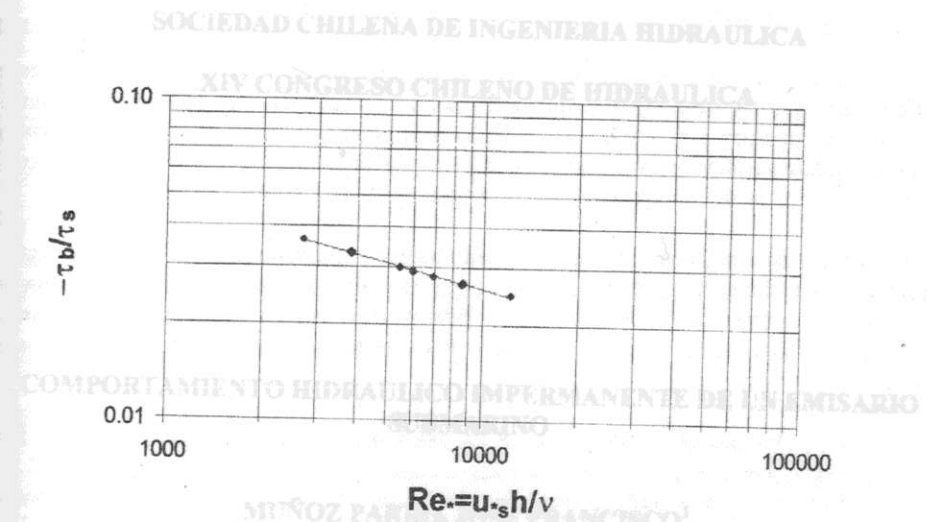


Fig. 8: Variación de la razón τ_b/τ_s en función de Re .

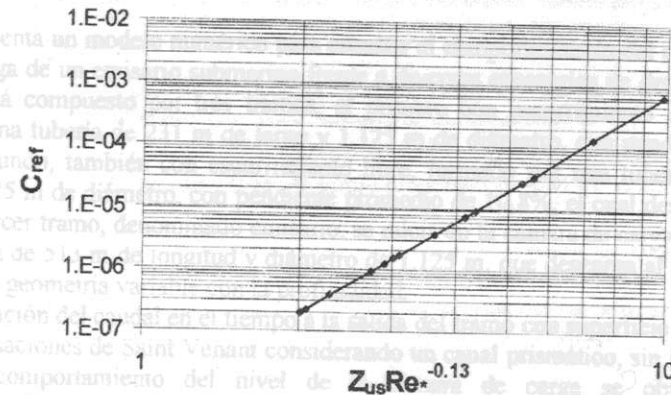


Fig.9: Variación de la concentración de referencia en función de $Z_w Re$.