

**ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA ESTRUCTURA DEL FLUJO
ESTRATIFICADO INDUCIDO POR UN ESFUERZO DE CORTE
SUPERFICIAL**

**LAURA REYES¹
YARKO NIÑO²**

RESUMEN

Se realizaron experimentos de laboratorio para estudiar el campo de velocidad, la estructura de la turbulencia y los procesos de mezcla inducidos por un esfuerzo de corte en la superficie de un volumen de agua con una estratificación de dos capas. Los experimentos fueron realizados en un estanque provisto con una cinta transportadora en su parte superior para ejercer el esfuerzo de corte. Se utilizó un procedimiento experimental basado en el análisis de imágenes de video para medir campos instantáneos bidimensionales de velocidad y de densidad del flujo. Los resultados obtenidos muestran que el esfuerzo de corte superficial induce una inclinación de la interfaz de densidad y genera mezcla en la base de la capa superior. Además, induce una circulación de dos celdas dentro del estanque, la que se restringe principalmente a la capa superior, mientras que la región inferior permanece prácticamente en reposo. La velocidad rms longitudinal es máxima en la zona cercana a la superficie y tiene un segundo máximo en la zona donde los gradientes de velocidad de la corriente de retorno son mayores. La velocidad rms vertical tiende a cero en la zona cercana a la superficie y tiene un máximo en la misma ubicación del segundo máximo de la velocidad rms longitudinal. El esfuerzo de corte total, que incluye los esfuerzos de Reynolds y los viscosos, es máximo cercano a la superficie libre y decrece en profundidad en la capa superior. Inicialmente, existe un máximo negativo en la zona de la interfaz de densidad, y luego disminuye hasta llegar a cero en el fondo del estanque. A medida que avanza el proceso de mezcla en el tiempo, el esfuerzo de corte en la zona de interfaz de densidad llega a ser despreciable. Se pudo investigar, además, la energía cinética turbulenta inducida por el esfuerzo de corte superficial y su rol en la eficiencia de mezcla en el sistema. Los resultados anteriores permiten un mayor conocimiento de la hidrodinámica de cuerpos de agua como lagos y embalses.

¹ Ayudante de Investigación, ² Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

1. INTRODUCCIÓN

La mayoría de los cuerpos de agua naturales presentan algún tipo de estratificación. Éste es un fenómeno natural, caracterizado por la existencia de un gradiente vertical de densidad en el agua, el cual puede involucrar diversas propiedades tales como temperatura, salinidad o suspensión de sedimentos. El estudio de la estratificación y mezcla producida, tiene una aplicación en la hidrodinámica de lagos y embalses, y está directamente relacionada con la respuesta del flujo estratificado a agentes externos, tales como el esfuerzo de corte ejercido por el viento, el calentamiento superficial, y corrientes de densidad que conducen energía hacia estos cuerpos de agua (Hodges et al., 2000). El calentamiento superficial es provocado por la radiación solar, que es responsable de la estratificación por temperatura en cuerpos de agua, la que usualmente se modela en dos capas: el epilimnion, o capa de mezcla, y el hipolimnion, o capa inferior, las que se encuentran separadas por una interfaz de densidad llamada termoclina. El viento, en ausencia de flujos que entren o salgan del cuerpo de agua, es la principal fuente de energía para la columna de agua, pues genera ondas internas y superficiales, turbulencia, y una circulación generalizada, que pueden provocar la mezcla vertical (Stevens e Imberger, 1996). Variados estudios de mezcla inducida por el viento han sido realizados, desde los trabajos de Kato y Phillips (1969), hasta los más recientes realizados por Monismith (1986), y Stevens e Imberger (1996). En este trabajo se presentan y analizan nuevos resultados respecto de los procesos de mezcla y la estructura de la turbulencia del flujo estratificado de un estanque, debido a la aplicación de un esfuerzo de corte superficial. En particular, las mediciones de los campos instantáneos de velocidad y densidad del flujo, son usadas para investigar los esfuerzos de Reynolds y la energía cinética turbulenta inducida por el esfuerzo de corte superficial, y su rol en la eficiencia de los procesos de mezcla.

2. ESTUDIO EXPERIMENTAL

Los experimentos fueron realizados en un estanque de laboratorio de 2 m de longitud, 0.3 m de ancho y 0.7 m de profundidad. A media altura, se instaló una cinta transportadora para ejercer el esfuerzo de corte superficial al volumen de agua ubicado en la parte inferior del estanque. Se incorporaron, al principio de cada experiencia, trazadores de peso boyante nulo en el fondo del estanque. Se formó una estratificación de dos capas en el estanque, donde la capa superior correspondía a agua pura, y la inferior era una solución salina al 3.8 %, teñida con permanganato de potasio para poder distinguirlas. Se empleó un procedimiento experimental basado en el análisis de imágenes de video para medir los campos bidimensionales instantáneos de velocidad y densidad en el flujo. Dos filmaciones simultáneas, usando cámaras de video, fueron hechas en distintas posiciones del estanque, una denominada x_1 , ubicada a 0.3 m de la pared de viento arriba del estanque, y la segunda, x_2 , ubicada en el centro del estanque (0.9 m de la pared de aguas arriba del estanque). Los videos resultantes fueron analizados mediante una técnica de seguimiento de partículas, obteniéndose, con una resolución de 0.01 m, perfiles verticales de velocidad media longitudinal y vertical, velocidad rms longitudinal y vertical, esfuerzos de Reynolds longitudinales y perfiles verticales de energía cinética turbulenta. Para obtener los campos de densidad del flujo, se seleccionaron imágenes de la filmación las que se digitalizaron convirtiéndolas a escala de grises. Mediante una relación calibrada, ya existente, se relacionaron los valores de intensidad de luz de las imágenes con valores conocidos de la concentración de sal en la solución teñida, obteniéndose perfiles de densidad del flujo. Estos perfiles fueron analizados para conocer la posición de la interfaz de densidad, y cómo ésta variaba en el tiempo, comparada con la progresión de los campos de velocidad.

En este trabajo se muestran los resultados de tres series de experimentos, correspondientes a las razones $L/H = 6, 9$ y 12 , donde L es la longitud del estanque y H es la altura total del volumen de agua. La altura inicial de la capa de mezcla, D_0 , varió entre 0.037 y 0.06 m para las distintas experiencias, y la diferencia de densidad entre la capa superficial y la de fondo, $\Delta\rho$, con respecto a la densidad del agua pura, se mantuvo constante e igual a $\Delta\rho/\rho_0 = 0.022$. La velocidad de la cinta transportadora, u_s , varió entre 0.06 y 0.4 m/s. Con las condiciones experimentales anteriores, el número de Richardson, definido en términos de la velocidad de la cinta, $Ri_s = (\Delta\rho g D_0)/(\rho_0 u_s^2)$, varió entre 0.08 y 3.23, y el valor del número de Reynolds, definido también en términos de u_s , $Re_s = u_s H/\nu$, donde ν denota a la viscosidad cinemática del agua pura, varió entre 8484 y 89684. En la Tabla 1 se muestra un resumen con las condiciones experimentales usadas.

3. RESULTADOS

Los resultados obtenidos muestran que el esfuerzo de corte superficial induce una circulación de dos celdas en el estanque, la que es mucho más fuerte en la capa de mezcla y es muy débil en la inferior, llegando a ser casi despreciable en algunos casos (Figura 1). Existe una fuerte corriente en la capa superior, en la dirección del esfuerzo de corte superficial, la que abarca aproximadamente el 5% superior de la altura total. Bajo esta corriente, existe otra de retorno que decae a medida que se acerca a la interfaz de densidad. La velocidad máxima de la corriente de retorno u_r , permanece relativamente constante durante el tiempo de experimentación. La razón u_r/u_s decrece a medida que el Ri_s aumenta.

En la sección central del estanque, x_2 , la velocidad rms longitudinal tiene un máximo cercano a la superficie, cuyo valor es del orden de un 10% de la velocidad superficial, y posee un segundo máximo, cuyo valor es aproximadamente la mitad del anterior, ubicado en la zona donde la corriente de retorno tiene sus máximos gradientes de velocidad (Fig. 2). Bajo este punto, la velocidad rms longitudinal decae hasta llegar a ser prácticamente nula. En esta misma sección, la velocidad rms vertical tiende a cero en la zona cercana a la superficie libre, y alcanza un máximo de alrededor de un 2% de la velocidad superficial en la misma ubicación donde la velocidad rms longitudinal tiene su segundo máximo (Fig. 3). En la sección x_1 la situación es similar, aunque los máximos de las velocidades rms vertical y longitudinal asociados al máximo de la corriente de retorno son menores. Su valor es del orden de la mitad del observado en x_2 . Lo anterior muestra que la intensidad de turbulencia del flujo decrece considerablemente en la dirección viento arriba. Sin embargo, los gradientes verticales de densidad en esta región tienden a decrecer más rápidamente que en la zona central, lo que es causado principalmente por la advección asociada al *upwelling*, y al "modo dos" de respuesta de la estratificación de densidad (Niño et al., 2001).

La energía cinética turbulenta (k) presenta un máximo cercano a la superficie y un segundo máximo en la región donde el gradiente de velocidad de la corriente de retorno es mayor (Fig. 4). Lo anterior indica que k está siendo producida en el interior del flujo, por lo que la energía disponible para la mezcla en la interfaz de densidad no proviene exclusivamente de la energía cinética entregada por el esfuerzo de corte superficial. El segundo máximo de k , k_2 , permanece relativamente constante en el tiempo para las distintas experiencias.

El esfuerzo de corte total, τ , fue determinado como la suma de los esfuerzos viscosos, estimados a partir de las mediciones de los gradientes verticales de velocidad, y los esfuerzos de Reynolds, estimados de la correlación entre las fluctuaciones vertical y longitudinal de la velocidad en distintos lugares del flujo. Al inicio de las experiencias, el esfuerzo de corte adimensional τ/τ_s , donde τ_s denota el esfuerzo de corte superficial, es máximo e igual a 1 en la superficie. Decrece a medida que decrece la altura, cambiando de signo, y alcanza un máximo negativo en la región del máximo gradiente de velocidad, justo sobre la interfaz de densidad. El valor absoluto de este máximo negativo tiende a decrecer en el tiempo y, en algunos casos, el esfuerzo de corte que actúa en la interfaz de densidad desaparece (Fig. 5). Los valores estimados para la velocidad de corte superficial, u_* , obtenidos del esfuerzo de corte, son proporcionales a la velocidad del flujo superficial. La razón u_s/u_* varía entre 13.36 y 30.45, permaneciendo prácticamente constante al variar el número de Richardson de corte, R_{τ} , definido como $R_{\tau} = (\Delta\rho g D_0)/(\rho_0 u_*^2)$. Sin embargo, dicha razón se describe de manera bastante acertada mediante una relación que es

inversamente proporcional al número de Wedderburn, definido como $W = R_f \cdot D_0/L$:

$$\frac{u_s}{u_*} = \alpha W^{-\beta} \quad (1)$$

donde $\alpha = 24.755$ y $\beta = 0.146$. Luego, como el comportamiento de u_s/u_* es independiente de Ri_* , pero sí depende de W , entonces es una función exclusiva del adimensional D_0/L .

Hopfinger (1987) define la eficiencia de mezcla como $R_f = PE/KE$, donde PE representa la tasa de incremento de energía potencial debido a la mezcla en la interfaz de densidad, y KE la razón a la cual k es entregada a la interfaz de densidad. Hopfinger define entonces:

$$PE = (1/2) g \Delta \rho u_e D^2 \quad (2)$$

donde u_e denota a la velocidad de incorporación, o la razón a la cual la interfaz de densidad se profundiza en el tiempo debido a la mezcla, y D es el espesor de la capa de mezcla. La velocidad de incorporación fue estimada de las mediciones de salinidad, a través del análisis de la variación temporal de los perfiles verticales de salinidad. En este artículo, KE se ha estimado de una manera ligeramente distinta a la sugerida por Hopfinger, utilizando los parámetros de la turbulencia medidos en las experiencias realizadas. De esta forma,

$$KE = \rho_0 k V_{rms} D \quad (3)$$

Donde V_{rms} es la componente vertical de la velocidad rms del flujo en la interfaz de densidad. Los valores de R_f inicialmente son nulos debido a que la mezcla demora un tiempo T_m para comenzar a desarrollarse (Niño et al., 2001). El valor máximo de R_f es de alrededor del 50% y ocurre al poco tiempo de iniciada la mezcla (Fig. 6). Luego, R_f decae a medida que la mezcla procede en régimen permanente en el tiempo.

4. CONCLUSIONES

La técnica experimental desarrollada fue usada de manera satisfactoria para el estudio de los campos de velocidad, procesos de mezcla, y estructura de la turbulencia del flujo inducido por un esfuerzo de corte en un volumen de agua con una estratificación a dos capas. Los resultados experimentales muestran que el esfuerzo de corte superficial induce una inclinación de la interfaz de densidad y genera mezcla en la base de la capa superficial, lo cual induce una circulación de dos celdas dentro del estanque, que está restringida principalmente a la capa superficial, mientras que la región del fondo permanece prácticamente sin movimiento. La velocidad rms longitudinal es máxima en la zona cercana a la superficie libre, y posee un segundo máximo coincidente con la ubicación donde los gradientes verticales de la velocidad de la corriente de retorno son máximos. La velocidad rms vertical tiende a cero en la zona cercana a la superficie libre, y posee un máximo en la misma ubicación del segundo máximo de la velocidad rms longitudinal.

La energía cinética turbulenta del flujo en la capa superior es máxima en la zona cercana a la superficie libre, y posee un segundo máximo en la misma ubicación donde el gradiente de velocidad de la corriente de retorno es máximo. El esfuerzo de corte total, compuesto por los esfuerzos viscosos y los esfuerzos de Reynolds, es máximo cercano a la superficie libre y es negativo en la zona de la corriente de retorno. Inicialmente, posee un máximo negativo en la zona de la interfaz de densidad, y luego decrece hacia el fondo del estanque. A medida que la mezcla avanza en el tiempo, el esfuerzo de corte en la interfaz de densidad llega a ser despreciable. La eficiencia de mezcla en la interfaz de densidad es máxima al inicio del proceso de mezcla y luego decae a medida que el proceso de mezcla avanza en el tiempo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el financiamiento otorgado por FONDECYT a través de los Proyectos N° 1981180 y 1010483 y el apoyo del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile.

REFERENCIAS

- Hodges, B.R., J. Imberger, A. Saggio, y K.B. Winters. 2000. "Modeling basin-scale internal waves in a stratified lake". *Limnology and Oceanography*, 45(7), pp. 1603-1620.
- Hopfinger, E.J. 1987. "Turbulence in stratified fluids: A review". *Journal of Geophysical Research*, Vol. 92, No. 5, pp. 5287-5303.
- Kato, H. y O.M. Phillips. 1969. "On the penetration of a turbulent layer into stratified fluid". *Journal of Fluid Mechanics*, 37, pp. 643-655.
- Monismith, S.G. 1986. "An experimental study of the upwelling response of stratified reservoirs to surface shear stress". *Journal of Fluid Mechanics*, 171, pp. 407-439.
- Niño, Y., R. Caballero y L. Reyes. 2001. "Mixing and interface dynamics in a two-layer stratified fluid due to surface shear stress". Enviado para revisión al *Journal of Hydraulic Research*.
- Stevens, C. y J. Imberger, J. 1996. "The initial response of a stratified lake to a surface shear stress". *Journal of Fluid Mechanics*, 312, pp. 39-66.

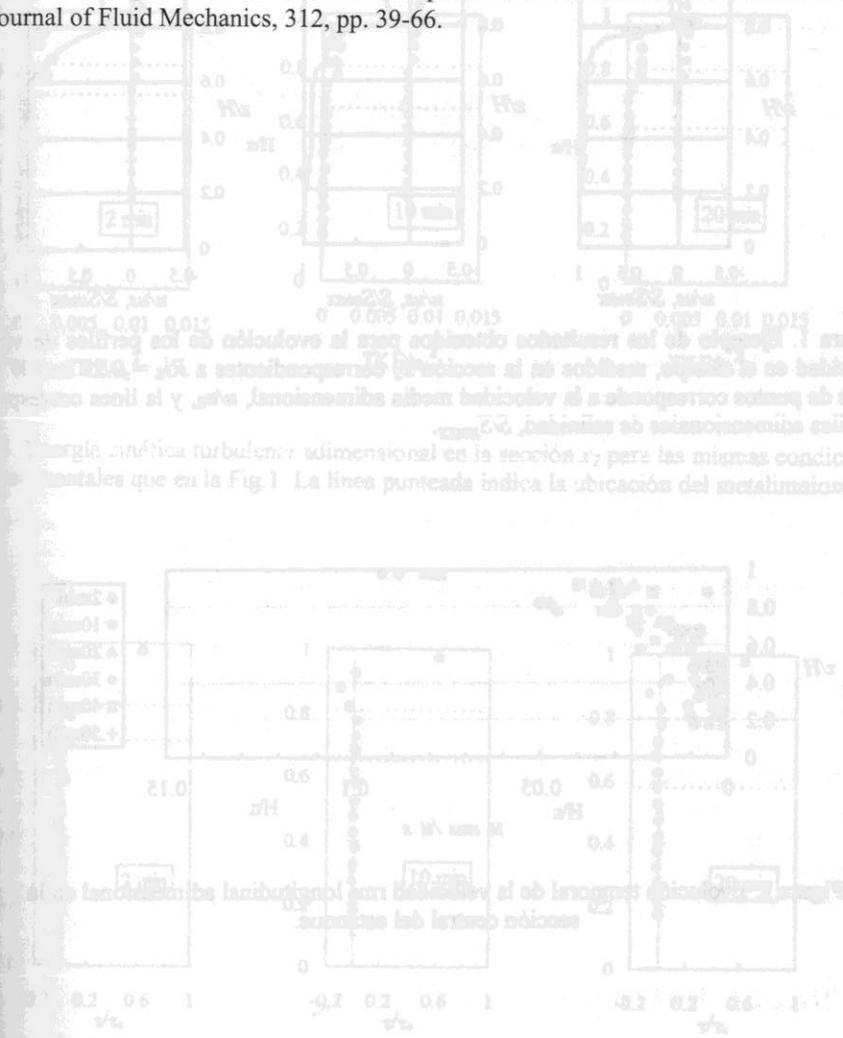


Figura 1. Evolución de los perfiles de velocidad y del esfuerzo de corte total adimensional en la sección x-y, para las mismas condiciones experimentales que en la Fig. 1. Las líneas punteadas indican la ubicación del metalimnion.

Tabla 1. Condiciones experimentales.

Experiencia	u_s [cm/s]	H [cm]	D_0 [cm]	D_0/L	L/H	T [°C]	Re_s	Ri_s	W
1	19.01	20	5	0.028	9	10.5	29538	0.29	3.2
2	28.80	20	5	0.028	9	10.3	44575	0.13	1.4
3	40.32	20	6	0.033	9	13	65990	0.08	1.0
4	5.93	30	5.4	0.030	6	17	15920	3.23	38.8
5	28.80	30	5.5	0.031	6	22	89684	0.14	1.7
6	8.64	12	4	0.022	15	13	8484	1.13	10.0
7	28.80	12	3.7	0.021	15	17	30912	0.09	0.8
8	19.01	12	4	0.022	15	19	22008	0.23	2.1

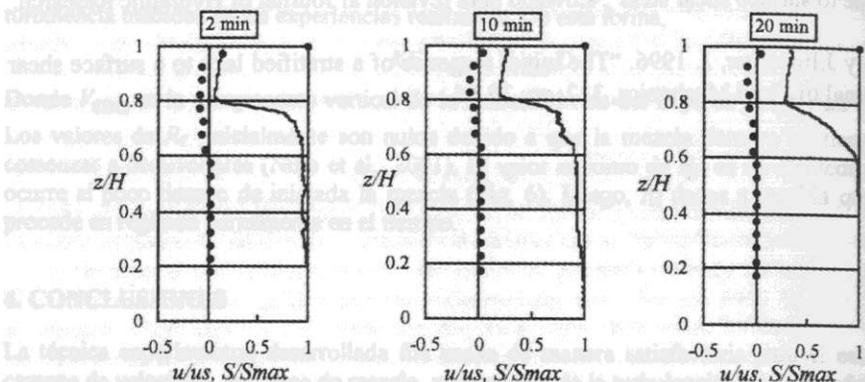


Figura 1. Ejemplo de los resultados obtenidos para la evolución de los perfiles de velocidad y salinidad en el tiempo, medidos en la sección x_2 correspondientes a $Ri_s = 0.29$ and $W = 3.2$. La serie de puntos corresponde a la velocidad media adimensional, u/u_s , y la línea corresponde a los perfiles adimensionales de salinidad, S/S_{max} .

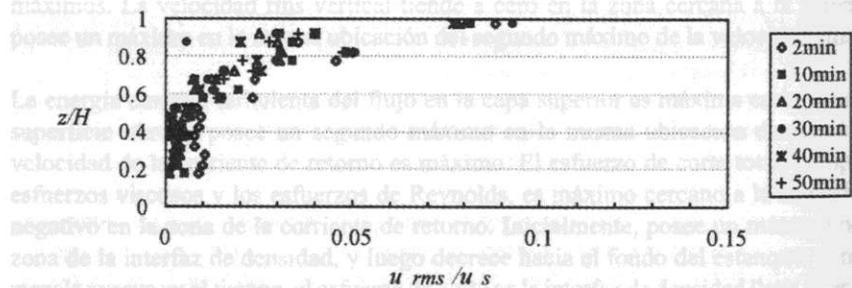


Figura 2. Evolución temporal de la velocidad rms longitudinal adimensional en la sección central del estanque.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el financiamiento otorgado por FONDECYT a través de los proyectos N° 1981180 y 1616483 y el apoyo del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile.

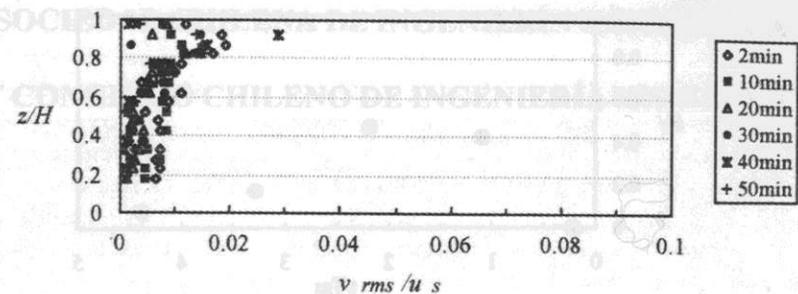


Figura 3. Evolución temporal de la velocidad rms vertical adimensional en la sección central del estanque.

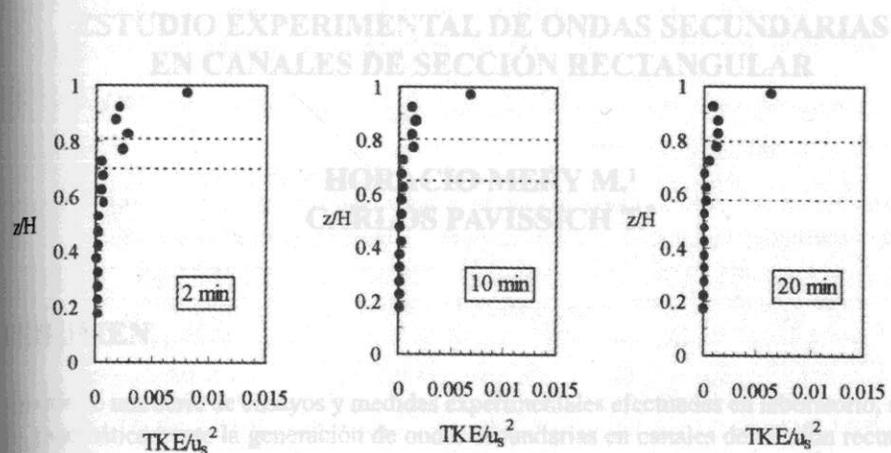


Figura 4. Energía cinética turbulenta adimensional en la sección x_2 para las mismas condiciones experimentales que en la Fig. 1. La línea punteada indica la ubicación del metalimnion.

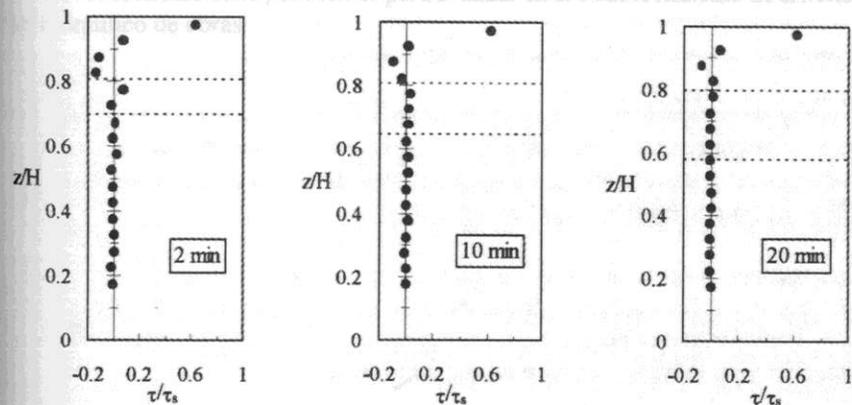


Figura 5. Esfuerzo de corte total adimensional en la sección x_2 para las mismas condiciones experimentales que la Fig. 1. Las líneas punteadas indican la ubicación del metalimnion.

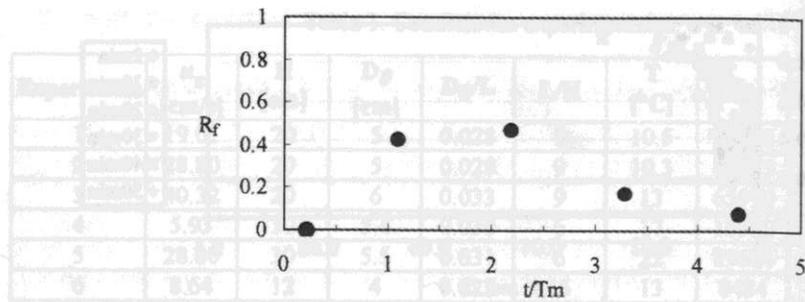


Figura 6. Ejemplo de la evolución temporal de la eficiencia de mezcla durante la experiencia de la Fig. 1. En este caso particular T_m es 9 min.

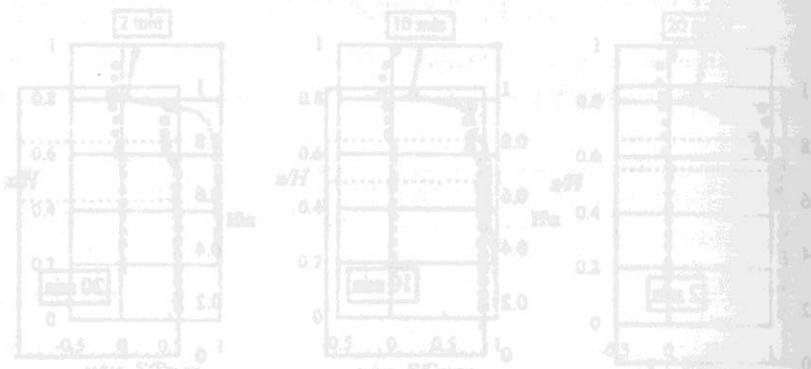


Figura 1. Ejemplo de los resultados obtenidos para la evolución de la velocidad longitudinal en el tiempo, medidos en la sección correspondiente a A_1 . La línea punteada indica la velocidad media dimensional, v_m , y la línea sólida indica la velocidad de mezcla.

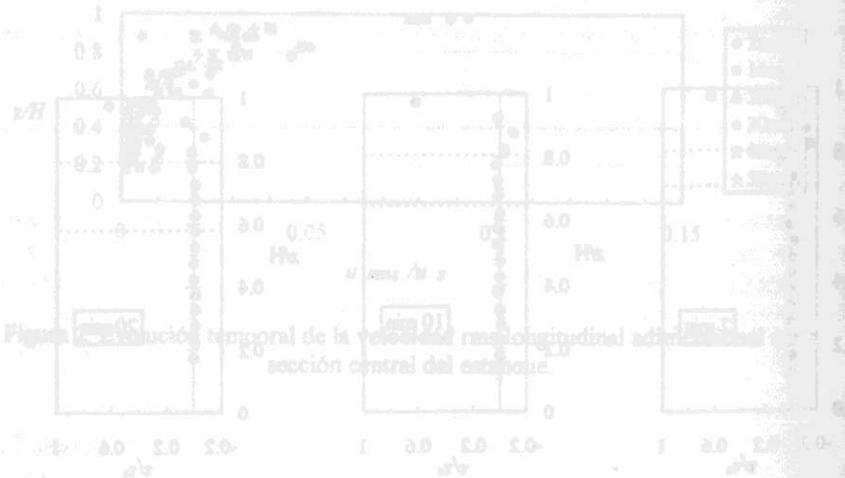


Figura 2. Evolución temporal de la velocidad longitudinal en la sección central del estribo.

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE ONDAS SECUNDARIAS EN CANALES DE SECCIÓN RECTANGULAR

HORACIO MERY M.¹
CARLOS PAVISSICH T.²

RESUMEN

A partir de una serie de ensayos y medidas experimentales efectuadas en laboratorio, se estudia sistemáticamente la generación de ondas secundarias en canales de sección rectangular, producto del accionamiento de maniobras de aguas abajo, analizando los factores y condiciones que inciden en su formación y maximización. Se describe inicialmente la metodología experimental empleada, y luego se muestra el seguimiento del fenómeno transitorio visualizado en un diagrama (t, h). Posteriormente, se analizan las amplitudes y longitudes de onda obtenidas en función de las condiciones iniciales y de operación, expresándolas en términos de los parámetros definidos por Favre (1935). Finalmente, se comparan y discuten los resultados de ambas investigaciones, confirmando las conclusiones emitidas por este investigador, y proponiendo las recomendaciones pertinentes para avanzar en el establecimiento de criterios para el diseño hidráulico de obras.

¹ Profesor Titular U. de Chile. Asesor de la Dirección de Obras Hidráulicas, M.O.P.

² Investigador, egresado Ing. Civil U. de Chile. Ingeniero de Proyectos M.N. Ingenieros Ltda.