



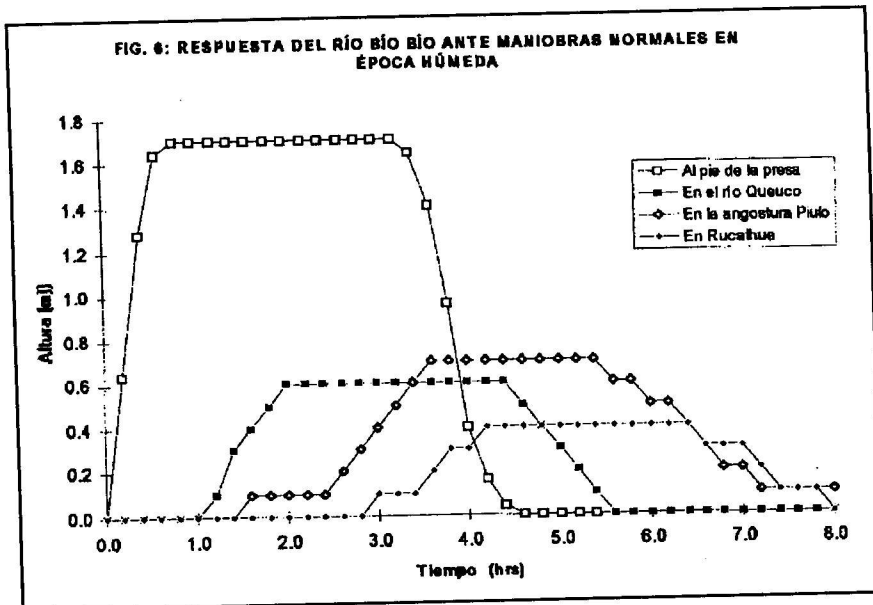
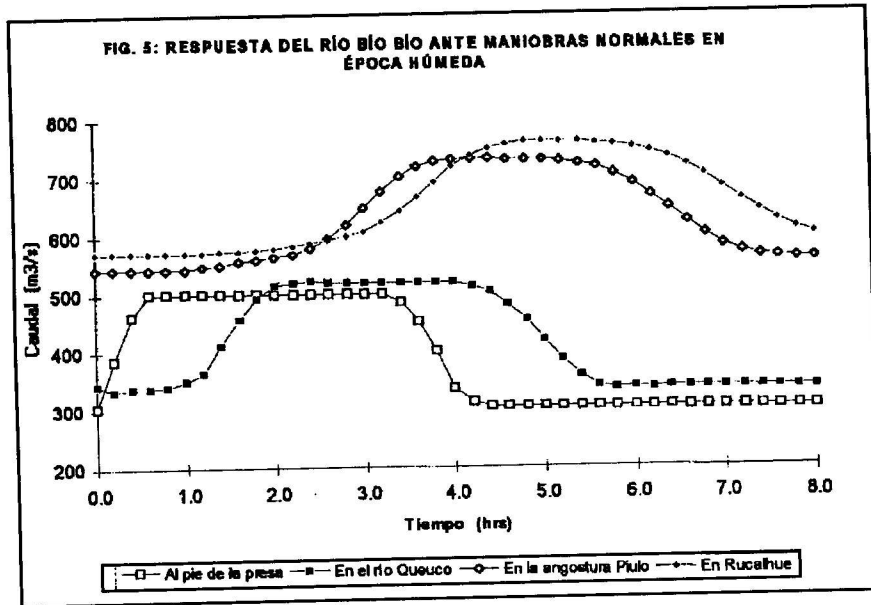
**FLUJO LIBRE EN UNA CANALIZACION CON
OBSTACULOS REPETIDOS.**

SERGIO RADRIGAN V. (1)

RESUMEN

Se describe y analiza el efecto que produce sobre un flujo abierto en un canal una serie de obstáculos conocidos o estimados y que se puede suponer repartidos de una manera sensiblemente uniforme. Se concluye con el cálculo de un canal equivalente sin obstáculos, con una rugosidad equivalente, que replica el flujo del canal con obstáculos..

(1) Ingeniero Civil. Consultor privado, Director de Hidrelec Ltda. Profesor Titular de la Universidad de Chile.



1. INTRODUCCION.

Un problema que se ha presentado con alguna frecuencia es la estimación de un flujo libre en una canalización en que existen obstáculos de forma conocida y que se puede suponer repetidos o repartidos de una manera más o menos uniforme.

A manera de ejemplos, describiremos tres casos:

- El cálculo hidráulico de una canalización provisional de madera que se construyó para desviar las aguas en la modificación del canal A-H del sistema de aguas servidas del gran Santiago. Esta canalización provisional estaba constituida por módulos de madera prefabricados, transportables, que conformaban una canaleta rectangular de madera, de 3 x 3 m² de sección. Por razones estructurales y de transporte, estas canaletas llevaban dos pares de diagonales atiesadoras, que, una vez montadas, quedaban sumergidas en el agua y constituían obstáculos uniformemente repartidos.

- Otro caso se presentó en el río Maullín, para un proyecto de puente vial. En la zona de estudio, poco aguas abajo del nacimiento del río Maullín, éste presenta un gran bosque de arrayanes, que se puede conceptualizar como un cauce en que había una gran cantidad de troncos de árboles con una cierta densidad de repartición.

- Un tercer ejemplo lo constituyó el cálculo del eje hidráulico derivado de una crecida de rotura de presa en el proyecto de Tranaquepe, en Concepción. La crecida fluía por una valle relativamente plano cubierto de arbustos de regular tamaño, que se podían conceptualizar uniformemente distribuidos y en que cada arbusto podía asimilarse a un obstáculo discreto de forma típica promedio.

De los ejemplos anteriores se puede deducir que, en general, podrían presentarse dos tipos de problemas básicos de flujo a través de un cauce con obstáculos: uno en que hay obstáculos artificiales, de forma y distribución conocida y otro, en que hay obstáculos naturales, a los cuales se les puede atribuir una forma típica promedio y una cierta distribución media.

Estos y otros problemas nos han llevado a plantear el del cálculo de un flujo en una canalización con obstáculos de forma conocida o estimada y regularmente repartidos.

2. DEFINICIONES.

Supongamos la existencia de un flujo libre en un cauce de sección uniforme, en el cual se encuentran repartidos obstáculos discretos iguales y de una manera uniforme. En otras palabras, existen N obstáculos fijos por cada LA m de ancho y por cada LB m de perfil longitudinal (fig.1).

La densidad de obstáculos se define como:

$$DO = \frac{N}{LA \times LB} \quad (1)$$

N obstáculos por LA m de ancho y LB m de longitud.

Además se define (fig. 2):

PF = pendiente longitudinal del fondo, que supondremos constante

PH = pendiente longitudinal de la superficie media del agua (eje hidráulico medio)

PB = pendiente longitudinal media de energía o de Bernoulli.

Si se observa la fig 2 se aprecia que, al contrario de la que sucede en un canal sin obstáculos, los parámetros del flujo, sean su altura H, su velocidad V, su sección S, u otros, son esencialmente variables, pero se puede establecer valores medios o típicos que se repiten cada cierto módulo LM. Estos valores medios son los que se conviene definir en este fenómeno.

Llamaremos flujo uniforme aquel cuyos parámetros medios son constantes a lo largo del canal. En particular:

$$PB = PH = PF$$

Su equivalente en un canal sin obstáculos sería el flujo normal.

El propósito básico de esta contribución es asimilar el flujo de una canalización con obstáculos discretos uniformes a un flujo equivalente de una canalización sin obstáculos, definible por la rugosidad de Manning o de Nikuradse (equivalente de arena).

3. OBSTACULO DISCRETO O SINGULAR.

Supondremos que cada obstáculo discreto o singular tiene una forma conocida y que se le puede asignar un coeficiente de arrastre típico CA.

Supondremos, además, que la configuración o distribución en planta de los obstáculos (fig.1) es conocida y que es posible calcular o estimar el coeficiente de interferencia mutua CM entre los obstáculos singulares. Se sabe que si la distancia entre los obstáculos aumenta, el coeficiente de interferencia mutua tiende a 1.

El flujo medio ejerce sobre el obstáculo singular una fuerza de arrastre:

$$FA = CM \times CA \times SA \times \frac{V^2}{2g} \times GL \quad [kp] \quad (2)$$

En que SA es la superficie de arrastre [m²]

V es la velocidad media en la sección [m/s]

GL es el peso específico del líquido [kp/m³]

CM x CA es el coeficiente de arrastre con interferencia mutua, que depende de la forma del cuerpo y de un número de Reynolds de arrastre típico.

$$CM \times CA = F(\text{Re } A) \quad (3)$$

Para precisar, definamos un obstáculo singular constituido por un cilindro de largo LO, de ancho AO (fig.3)

En este caso $SA = AO \times LO$ [m²] (4)

y el número de Reynolds de arrastre se define como

$$\text{Re } A = \frac{AO \times V}{\text{VISC}} \times f(LO / AO, \text{forma}) \quad (5)$$

en que VISC es la viscosidad cinemática del líquido [m²/s] y la función f(LO/AO, forma) es una función adimensional de forma geométrica.

Desde un punto de vista computacional conviene distinguir dos tipos de obstáculos singulares:

- Obstáculos siempre sumergidos. En este caso el largo LO es una característica fija, independiente de las condiciones del flujo.

- Obstáculos emergentes. En este caso la longitud de la parte sumergida (activa) vale:

$$LO = \frac{H}{\text{sen}(a)} \quad [\text{m}] \quad (6)$$

en que «a» es el ángulo que forma el eje del obstáculo con la horizontal y H es la altura del flujo sobre el fondo.

LO depende en este caso de la altura del flujo.

4. OBSTACULOS UNIFORMEMENTE REPARTIDOS

Más arriba se definió la densidad de los obstáculos como:

$$DO = \frac{N}{LA \times LB} \quad (7)$$

La fuerza de arrastre que producen estos N obstáculos es:

$$FA \text{ total} = N \times FA \quad (8)$$

y la fuerza de arrastre total por unidad de longitud del canal será:

$$FAU = \frac{FA \text{ total}}{LB} = \frac{N}{LB} \times FA \quad [\text{kp/m}] \quad (8)$$

$$= DO \times LA \times FA \quad [\text{kp/m}] \quad (9)$$

$$= DO \times LA \times CM \times CA \times SA \times \frac{V^2}{2g} \times GL \quad [\text{Kp/m}] \quad (10)$$

5. RELACION FUNDAMENTAL ENTRE TENSION CORTANTE PERIMETRAL Y PENDIENTE LONGITUDINAL DE FONDO.

Supongamos un canal sin obstáculos de flujo uniforme (normal) de sección S, altura H, velocidad media V = Q/S, con una pendiente PB = PH = PF, como se dijo más arriba.

La fuerza vertical por unidad de longitud de canal será

$$W = \frac{\text{peso}}{L} = \frac{L \times S \times GL}{L} = S \times GL \quad [\text{kp}]. \quad (11)$$

y la fuerza cortante perimetral por unidad de longitud será

$$FTR = W \times \text{sen}(b) \quad [\text{kp}] \quad (12)$$

en que sen(b) = PF es la pendiente de fondo.

Resumiendo

$$FTR = S \times GL \times PF \quad [\text{kp/m}] \quad (13)$$

Como se sabe esta fuerza cortante longitudinal se crea exclusivamente por la existencia de una rugosidad perimetral que se puede expresar a través de la fórmula de Manning:

$$V = \frac{RH^{2/3} \sqrt{PF}}{RM} \quad [\text{m/s}] \quad (14)$$

En que V es la velocidad del flujo
RH es el radio hidráulico $RH = S/PM$
RM es la rugosidad de Manning

Si se elimina la pendiente de fondo PF de las expresiones resulta:

$$PF = \frac{V^2 \times RM^2}{RH^{4/3}} \quad (15)$$

$$FTR = \frac{S \times GL \times V^2 \times RM^2}{RH^{4/3}} \quad [\text{kp/m}] \quad (16)$$

Esta es la fuerza cortante perimetral que el flujo ejerce sobre las paredes del canal que tienen una rugosidad RM.

6. EQUIVALENCIA ENTRE UN CANAL CON OBSTACULOS Y UNO SIN OBSTACULOS.

Establezcamos la equivalencia entre un canal con obstáculos y uno sin obstáculos que escurran uniformemente con los mismos parámetros hidráulicos (igual velocidad media V, igual altura de agua media H, igual pendiente de fondo, etc.) pero con distinta rugosidad de paredes (rugosidad equivalente).

En primer lugar, calcularemos la fuerza cortante longitudinal total que ejerce el flujo en el canal con obstáculos:

$$FT = FAU + FTR \quad [\text{kp/m}] \quad (17)$$

$$= DO \times LA \times CM \times CA \times SA \times \frac{V^2}{2g} \times GL + \frac{S \times GL \times V^2 \times RM^2}{RH^{4/3}} \quad [\text{kp/m}] \quad (18)$$

En segundo lugar, la fuerza cortante longitudinal total que ejercería un flujo igual en un canal sin obstáculos sería:

$$FTRe = \frac{S \times GL \times V^2 \times RMe^2}{RH^{4/3}} \quad [\text{kp/m}] \quad (19)$$

En que RMe sería la rugosidad de Manning equivalente del canal sin obstáculos.

La suposición básica de que el segundo canal sin obstáculos equivalente reemplaza al primero (con obstáculos) es que

$$FT = FTRe \quad [\text{kp/m}] \quad (20)$$

$$V^2 \times GL \left(\frac{DO \times LA \times CM \times CA \times SA}{2g} + \frac{S \times RM^2}{RH^{4/3}} \right) = V^2 \times GL \times \frac{S \times RMe^2}{RH^{4/3}} \quad [\text{kp}] \quad (21)$$

Finalmente

$$RMe^2 = RM^2 + \frac{DO \times LA \times CM \times CA \times SA}{2g} \times \frac{RH^{4/3}}{S} \quad (22)$$

que es la expresión buscada.

7. APLICACIONES Y CONSIDERACIONES ADICIONALES.

Para ilustrar la importancia y cuantía de las magnitudes involucradas se ha desarrollado dos ejemplos numéricos (notamos que la nomenclatura utilizada difiere de la expuesta en este artículo):

El primero se refiere a la canaleta provisional de madera para desviar el canal A-H, mencionada al comienzo: Había dos diagonales atiesadoras en cruz, colocadas cada 3 m de longitud de canaleta, que formaban un ángulo de 45° con la horizontal y cuyos diámetros de arrastre se estimaron en 2 cm (incluyendo basura). Los atiesadores eran obstáculos de carácter emergente. La rugosidad de Manning de las paredes se estimó en 0,012. El cálculo adjunto da para el canal equivalente una rugosidad de Manning 0,02.

El segundo se refiere al río Maullín cuyo cauce se asimiló a un canal trapecial de 30 m de ancho con taludes laterales 1/1. Al fondo se le asignó una rugosidad de Manning 0,03. El cauce estaba lleno de obstáculos emergentes, constituidos por árboles, con troncos de diámetros estimados en 0,15 m y

con una densidad promedio de 7,5 árboles por metro lineal de cauce. Además había tocones de árboles (obstáculos sumergidos) de 0,5 m de diámetro con una densidad media de uno por metro lineal de cauce. El cálculo adjunto da para el canal equivalente una rugosidad de Manning 0,113.

De estos ejemplos se deduce la enorme importancia cuantitativa que pueden significar los obstáculos en la rugosidad equivalente y, por tanto, en la estimación de la altura del agua.

De una manera general, sería posible extender al canal con obstáculos consideraciones hidráulicas semejantes a las de los canales sin obstáculos (ejes hidráulicos variados, conceptos de crisis, de flujos sub y supercríticos, etc), haciendo la salvedad de que estos conceptos se aplican a condiciones medias entre módulos de obstáculos típicos. Sin embargo, creemos que la complejidad del fenómeno haría necesario validarlo mediante experiencias.

St Input	Name	Output	Unit	Comment
				HIDRELEC 'CAN. TRAP. U/O'
				CANALTRAPECIALUNIFORME/OBSTACULO (49 var; 30 ec; 19 ent)
360	grd	obl		grados del ángulo completo
				LIQUIDO; 2var
1000	GL		kp/m ³	peso específico del líquido
.0000012	VISC		m ² /s	viscosidad cinemática (1.2e-6 a 12°)
				OBSTACULO SUMERG.(NO SOBRESALE); 9 var
1.2	CAS	:		coef. de arrastre
.5	AAS	m		ancho de arrastre obstáculo lineal (= long de Reynolds de arrastre)
1	CMS	:		coef. de interferencia mutua
.5	LAS	m		largo de arrastre obstaculo lineal
	ReAS	263666	:	número de Reynolds de arrastre
	SAS	.25	m ²	superficie de arrastre
	FAS	6.12	kp	fuerza de arrastre
1	DAS		:/m	cantidad de obstáculos sum/long canal
	FASU	6.12	kp/m	fuerza de arrastre obst sumer/long OBSTACULO EMERGENTE (SOBRESALE); 9 var
1.2	CAM	:		coef de arrastre
.15	AAM	m		ancho de arrastre obstáculo lineal (= long de Reynolds de arrastre)
1	CMM	:		coef. de interferencia mutua

90	anh			ángulo eje obstáculo con horizontal
	ReAM	79100	:	número de Reynolds de arrastre
	SAM	.685	m ²	superficie de arrastre
	FAM	16.8	kp	fuerza de arrastre
7.5	DAM		:/m	cantidad obstáculos emerg/long canal
	FAMU	126.0	kp/m	fuerza arrastre obst emera/long canal FORMA CANAL TRAPECIAL: 5 var
30	AB		m	ancho basal
	at1	45	°	ángulo talud (horz/vert) izquierdo
	at2	45	°	ángulo talud (horz/vert) derecho
1	TL1		:	talud izquierdo (horz/vert)
1	TL2		:	talud derecho (horz/vert)
				CANAL TRAPECIAL UNIFORME; 15 var
100	Q		m ³ /s	caudal
.03	RM		(m,s)	rugosidad de Manning perimetral
	RN	224.5	mm	rugosidad Nikuradse perimetral
.001	PL		:	pendiente longitudinal
	H	4.57	mm	altura flujo (tnt)*****
	S	158	m ²	sección
	V	.632	m/s	velocidad
	B	4.59	m	Bernoulli
	PM	42.9	m	perímetro mojado
	RH	3.68	m	radio hidráulico
	AH	39.1	m	ancho superficial
	TT	2.72	kp/m ²	tensión cortante perimetral media
	FT	10	kp/m	fuerza cortante perim/long canal
	HG	2.38	m	altura centroide mojado
	MT	351.7	m ³	momenta
				CANAL TRAPECIAL EQUIVALENTE; 4 var
	RME	.113	(m,s)	rugos Manning equivalente
	RNE	11004	m/m	rugosidad Nikuradse equivalente
	FTE	142	kp/m	fza. hidraul.longitud. total/long
	FAU	132	kp/m	fuerza de arrastre total/long

St Input	Name	Output	Unit	Comment
				HIDRELEC 'CAN. TRAP. U/O'
				CANAL TRAPEZIAL UNIFORME/ OBSTACULO
				(49 var; 30 ec; 19 ent)
360	grd		obl	grados del ángulo completo
				LIQUIDO; 2var
1000	GL		kp/m ³	peso específico del líquido
.0000012	VISC		m ² /s	viscosidad cinemática (1.2e-6 a 12°)
				OBSTACULO SUMERG.(NO SOBRESALE); 9 var
0	CAS		:	coef. de arrastre
0	AAS		m	ancho de arrastre obstáculo lineal (= long de Reynolds de arrastre)
1	CMS		:	coef. de interferencia mutua
0	LAS		m	largo de arrastre obstáculo lineal
	ReAS	0	:	número de Reynolds de arrastre
	SAS	0	m ²	superficie de arrastre
	FAS	0	kp	fuerza de arrastre
0	DAS		:/m	cantidad de obstáculos sum/long canal
				OBSTACULO EMERGENTE (SOBRESALE); 9 var
1.2	CAM		:	coef de arrastre
.02	AAM		m	ancho de arrastre obstáculo lineal (= long de Reynolds de arrastre)
1	CMM		:	: coef. de interferencia mutua
45	anh		°	ángulo eje obstáculo con horizontal
	ReAM	47835	:	número de Reynolds de arrastre
	SAM	.0394	m ²	superficie de arrastre
	FAM	19.88	kp	fuerza de arrastre
.6667	DAM		:/m	cantidad obstáculos emerg/long canal
	FAMU	13.2	kp/m	fuerza arrastre obst emera/long canal
				FORMA CANAL TRAPEZIAL: 5 var
3	AB		m	ancho basal
	at1	0	°	ángulo talud (horz/vert) izquierdo
	at2	0	°	ángulo talud (horz/vert) derecho
0	TL1		:	talud izquierdo (horz/vert)
0	TL2		:	talud derecho (horz/vert)

12	Q		m ³ /s	CANAL TRAPEZIAL UNIFORME; 15 var
.012	RM		(m,s)	caudal
	RN	.362	mm	rugosidad de Manning perimetral
.001	PL		:	rugosidad Nikuradse perimetral
	H	1.39	m	pendiente longitudinal
	S	4.18	m ²	altura flujo (tnt)*****
	V	2.87	m/s	sección
	B	1.81	m	velocidad
	PM	5.78	m	Bernoulli
	RH	.722	m	perímetro mojado
	AH	3	m	radio hidráulico
	TT	10.5	kp/m ²	ancho superficial
	FT	7.65	kp/m	tensión cortante perimetral media
	HG	.696	m	fuerza cortante perim/long canal
	MT	6.42	m ³	altura centroide mojado
				momenta
				CANAL TRAPEZIAL EQUIVALENTE; 4 var
	RME	.0198	(m,s)	rugos Manning equivalente
	RNE	19	m/m	rugosidad Nikuradse equivalente
	FTE	20	kp/m	fza. hidraul.longitud. total/long canal
	FAU	13.2	kp/m	fuerza de arrastre total/long de canal

BIBLIOGRAFIA

- 1) Coeficientes de resistencia de obstáculos:
Engineering Hydraulics. Hunter Rouse. Cap. 1 H
Fluid Mechanics. Streeter. Tabla 4-1
Fluid Dynamics and Heat Transfer. Knudsen y Katz. Tabla 10-12
Internal Flow Systems. D.S. Miller. Cap. 14

FIGURA 1

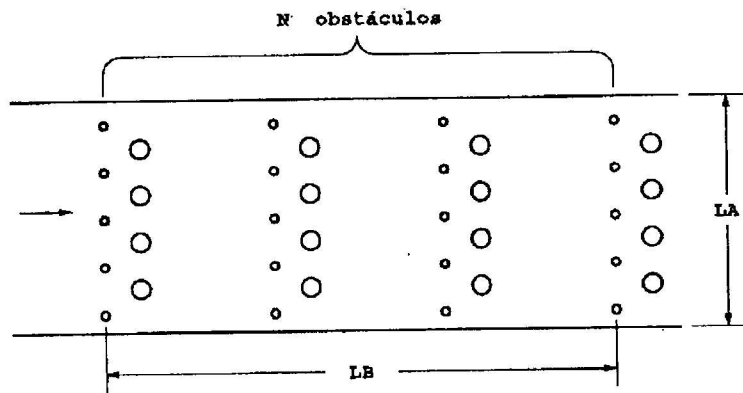


FIGURA 2

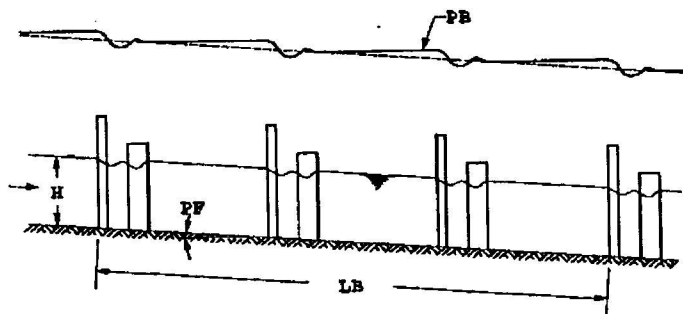


FIGURA 3a

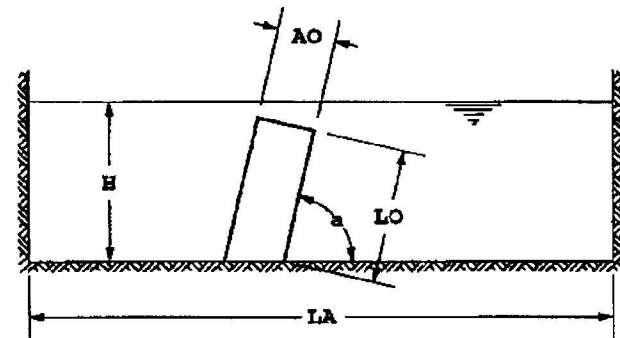
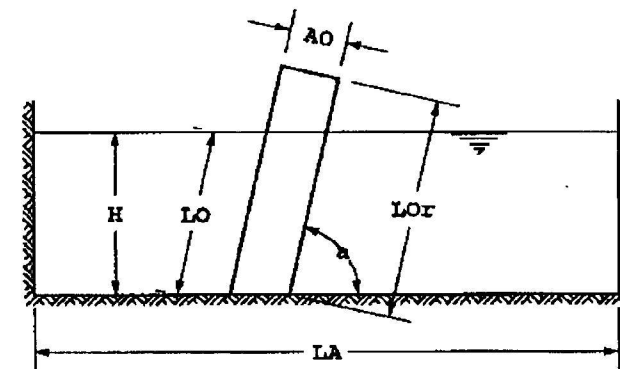
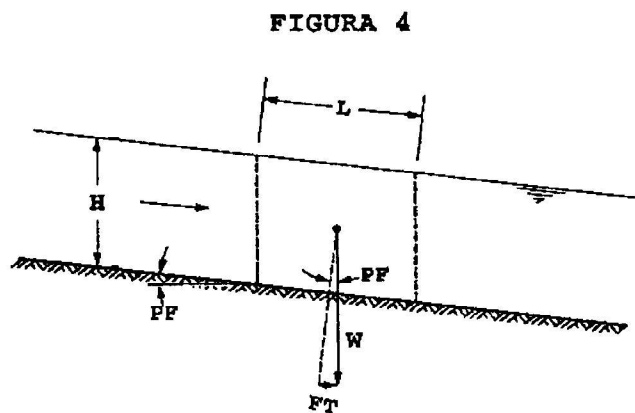


FIGURA 3b





**SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA
XII CONGRESO CHILENO**



Sociedad Chilena
de Ingeniería Hidráulica



Instituto Nacional
de Hidráulica - Chile

3

**ESTRUCTURAS TURBULENTAS DE FLUJOS EN CANALES
ABIERTOS CON NUMEROS DE REYNOLDS BAJOS.
PARTE I: VISUALIZACION**

**ALDO TAMBURRINO T. (1)
JUAN ESPINOZA M. (2)**

RESUMEN

En este trabajo se presentan algunos resultados de experiencias de visualización del flujo en canales con superficie libre con números de Reynolds entre 2005 y 7685. Las estructuras visualizadas corresponden, en general a las descritas en la literatura, siendo el vórtice de herradura la estructura primaria. Sin embargo, en esta investigación se observó una alta frecuencia de estructuras asimétricas, que aquí se interpretan como el resultado del debilitamiento de una de las piernas del vórtice herradura.

Finalmente, aunque se visualizó a menudo el fenómeno de barrido, no se observó el de estallido, que en la literatura aparece como un fenómeno violento, responsable de la generación de gran parte de la turbulencia.

(1) Ingeniero Civil, Ph.D., Profesor Asistente, Dpto. de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

(2) Memorista, Dpto. de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.