

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA

IX CONGRESO NACIONAL

FLUJO TRANSITORIO EN EL SISTEMA TUNEL-PIQUE

CONECTADO A UN LAGO

HORACIO MERY MERY (1)

ALBERTO SEPULVEDA VERA (2)

RESUMEN

La conexión de una bocatoma profunda a un lago se efectúa destrozando con explosivos el tapón rocoso final, técnica llamada DISPARO o TIRO NORUEGO.

En el caso de la central hidroeléctrica Canutillar de la ENDESA, obra actualmente en construcción, la conexión de la bocatoma al lago Chapo se realizará por el método denominado TIRO NORUEGO HUMEDO ABIERTO, el cual considera agua en el pique y una burbuja de aire junto al tapón rocoso.

A partir de la ecuación de EULER para un tubo de corriente, a la que se han agregado los términos de pérdidas de carga friccionales y singulares, se obtuvo un conjunto de ecuaciones que permiten calcular el movimiento ascendente del agua que se produce como consecuencia de la voladura del tapón de roca de la entrada. El agua sube por el pique y la caverna de maniobras, hasta alcanzar un nivel máximo y después baja, produciéndose una oscilación amortiguada.

Los resultados obtenidos mediante las referidas ecuaciones se compararon con algunas medidas de presión realizadas en un modelo hidráulico a escala 1:25.

-
- (1) Ingeniero Civil. Jefe Sección Obras Hidráulicas de la ENDESA.
(2) Ingeniero Civil. División Estudios Hidráulicos de la ENDESA.

1.- INTRODUCCION.

La conexión de una bocatoma profunda a un lago se realiza tronando con explosivos al tapón rocoso final, técnica denominada "TIRO, DISPARO o METODO NORUEGO".

Existen fundamentalmente dos tipos de métodos para llevar a cabo la voladura del tapón de roca que separa al lago del túnel de aducción, a saber:

- Métodos secos:
 - a) Método seco abierto (Figura 1)
 - b) Método seco cerrado (Figura 2)
- Métodos húmedos:
 - c) Método húmedo abierto (Figura 3)
 - d) Método húmedo cerrado.

En el trabajo de SEPULVEDA y VARAS (1987) se describen en detalle estos métodos y las condiciones que se deben cumplir para efectuarlos.

En otro trabajo presentado por los mismos autores (1987) se detalla la aplicación de los métodos seco abierto y húmedo abierto a la futura interconexión del túnel de aducción de la central Canutillar al lago Chabo.

La ENDESA ha realizado cuatro tiros noruegos, todos en el Lago Laja, entre los años 1962 y 1970, efectuados mediante el método seco abierto. El último de ellos correspondió a la conexión de la aducción de la central El Toro (Maturana, 1971).

El diseño de las bocatomas profundas de las centrales El Toro y Canutillar se efectuaron con el auxilio de modelos hidráulicos a escala reducida, o sea, mediante modelación física.

En el tiro noruego hay involucrados 2 problemas:

- a) El arrastre del material producto de la destrucción del tapón de roca, problema que solamente puede ser analizado en un modelo físico.

b) El fenómeno del régimen transitorio de la masa de agua que ingresa al túnel y pique, lo que genera oscilaciones de ella. Este fenómeno, reproducible en un modelo físico, puede ser estudiado en forma analítica.

En el presente trabajo se efectuará la modelación matemática del fenómeno transitorio a que se refiere en b), en vista a determinar la cota máxima que alcanzará el agua después de la voladura del tapón rocoso.

2.- PRINCIPIOS FUNDAMENTALES.

Los esquemas de aplicación se muestran en figuras 4, 5 y 6:

- Lago cuyo nivel de aguas "Ho" no varía durante el transcurso del fenómeno.
- Túnel horizontal de longitud "Lt", sección transversal "At" y coeficiente de rugosidad de Manning "Nt".
- Pique vertical de altura (o longitud) "Lp", sección transversal "Ap" y coeficiente de rugosidad de Manning "Np".
- Caverna de maniobras (o caverna superior) de altura "Lc" y sección transversal "Ac".

Llamaremos:

- a) FASE 1: el frente de agua se mueve en el túnel horizontal (Fig. Nº 4)
- b) FASE 2: el frente de agua se mueve en el pique vertical (Fig. Nº 5)
- c) FASE 3: el frente de agua se mueve en la caverna de maniobras (Fig. Nº 6)

En el análisis que sigue se efectuará una aproximación unidimensional para un fluido incomprensible.

2.1. PRINCIPIO DE CONSERVACION DE LA MASA O ECUACION DE CONTINUIDAD.

Este principio se escribe como:

$$Q = AU = At Ut = Ap Up = Ac Uc \quad (2.1.1)$$

$$o \quad Up = (At / Ap) Ut \quad (2.1.2)$$

$$y \quad Uc = (At / Ac) Ut \quad (2.1.3)$$

donde:

Q = Caudal

A = Sección transversal del flujo

U = Velocidad media del flujo

Diferenciando (2.1.1) se obtiene:

$$A_t dU_t = A_p dU_p = A_c dU_c \quad (2.1.4)$$

Por otra parte, considerando la definición de "U" y que se toman valores medios en el intervalo " Δt ", podemos escribir que:

$$\Delta x/\Delta t = Ut + 0,5 \Delta Ut = (Q + 0,5 \Delta Q)/At \quad (2.1.5)$$

$$\Delta y/\Delta t = Up + 0,5 \Delta Up = (Q + 0,5 \Delta Q)/Ap \quad (2.1.6)$$

$$\Delta z/\Delta t = Uc + 0,5 \Delta Uc = (Q + 0,5 \Delta Q)/Ac \quad (2.1.7)$$

2.2. PERDIDAS DE CARGA.

2.2.1. Pérdidas friccionales.

En este caso se puede escribir:

$$\Delta Bf = J \Delta s = (UN/R^{2/3})^2 \Delta s = (QN/A)^2 / R^{4/3} \Delta s \quad (2.2.1)$$

donde R = radio hidráulico de la sección; escribamos:

$$\Delta Bf = C_f N^2 Q^2 L = K_f Q^2 N^2 \quad (2.2.2)$$

donde:

$$C_f = 1/(A R^{2/3})^2 \quad (2.2.3)$$

$$y \quad K_f = C_f L \quad (2.2.4)$$

2.2.2. Pérdidas singulares.

Las expresaremos como:

$$\Delta B_s = k_s U^2 / 2g = K_s Q^2 \quad (2.2.5)$$

donde: k = coeficiente adimensional de pérdida de carga singular

K = coeficiente dimensional = $k/(2g \Lambda^2)$

Se tiene:

k_e = pérdida de entrada

k_c = pérdida en curva o codo

k_d = pérdida en difusor

k_l = otras pérdidas singulares

3. ECUACION GENERAL DEL FLUJO.

3.

Para un tubo de corriente, en un fluido incomprensible se puede demostrar (STREETER, 1966) que:

$$(1/\rho)(\partial p/\partial s) + g(\partial z/\partial s) + U(\partial U/\partial s) + \partial U/\partial t + \tau_w/(\rho R) = 0 \quad (3.1)$$

donde:

ρ = densidad del fluido

p = presión en la sección considerada

s = elemento de arco a lo largo del tubo de corriente

z = coordenada vertical

g = aceleración de gravedad

U = velocidad media en la sección considerada

t = variable tiempo

τ_w = fatiga friccional en la superficie del tubo de corriente

R = radio hidráulico equivalente de la sección A

El último término de (3.1) representa las pérdidas friccionales, las que se pueden escribir como:

$$\tau_w/(\rho R) = \lambda U^2 / R = gJ = g (UN/R^{2/3})^2 \quad (3.2)$$

donde:

λ = factor de fricción

J = pérdida de carga por unidad de longitud

N = coeficiente de rugosidad de Manning

Por comodidad las pérdidas singulares y friccionales se explicitarán más adelante en la ecuación Integral.

Escribamos (3.1) de otra forma:

$$(1/\delta) (\partial p/\partial s) ds + (\partial z/\partial s) ds + (1/2g) (\partial U^2/\partial s) ds + (1/g) (\partial U/\partial t) ds + dB = 0 \quad (3.3)$$

luego, integrando entre las secciones 1 y 2 resulta:

$$(1/\delta) (p_2 - p_1) + (z_2 - z_1) + (1/2g) (U_2^2 - U_1^2) + (1/g) \int_1^2 (\partial U/\partial t) ds + \sum \Delta B = 0 \quad (3.4)$$

$$\text{pero } B = p/\delta + z + U^2/2g \quad \text{y} \quad Q = UA \quad \text{luego}$$

$$B_2 - B_1 + (1/g) (\Delta Q/\Delta t) \sum (\Delta s/A) + \sum \Delta B_f + \sum \Delta B_s = 0 \quad (3.5)$$

El término $\partial Q/\partial t = \Delta Q/\Delta t$ es constante a lo largo del tubo de corriente, así como Q.

Las ecuaciones (3.4) y (3.5) definen el movimiento del líquido entre dos secciones cualesquiera del flujo y no tienen ninguna limitante más que la incompresibilidad del fluido.

4.- TIRO NORUEGO HUMEDO ABIERTO.

Aplicamos la ecuación (3.5) al movimiento del agua que se produce al destruir el tapón rocoso que conecta el túnel al lago. El agua ascenderá por el pique e inundará la caverna de maniobras.

4.1. FASE 2.

Se ha llamado FASE 2 al movimiento del frente de agua en el pique, desde una posición cualquiera hasta alcanzar el radier de la caverna superior. En la Figura 5 se esquematiza el fenómeno. Es importante destacar que la ecuación (3.5) no exige horizontalidad del túnel ni verticalidad del pique, ya que es una ecuación deducida sin limitaciones de sección y de inclinación.

Podemos escribir entonces:

$$B_1 = H_0 \quad (4.1.1)$$

$$B_2 = y + \Delta y/2 + (Q + \Delta Q/2)^2 / (2g A_p^2) \quad (4.1.2)$$

$$\sum \Delta s/A = L_t/A_e t + (y + \Delta y/2)/A_p \quad (4.1.3)$$

$$\sum \Delta B_f = (Q + \Delta Q/2)^2 (K_{ft} N_t^2 + C_p N_p^2 (y + \Delta y/2)) \quad (4.1.4)$$

$$\sum \Delta B_s = K_{st} (Q + \Delta Q/2)^2 \quad (4.1.5)$$

donde:

$$K_{ft} = \sum L_{it} C_{it} \quad (4.1.6)$$

$$K_{st} = K_e + K_c + K_d + K_o \quad (4.1.7)$$

Reemplacemos (4.1.1) a (4.1.5) en (3.5). Escribiendo:

$$T_1 = 1/(2g A_p^2) + K_{st} + K_{ft} N_t^2 \quad (4.1.8)$$

resulta:

$$(1/g) (\Delta Q/\Delta t) (L_t/A_e t + (y + \Delta y/2)/A_p) = H_{ap} \quad (4.1.9)$$

donde:

$$H_{ap} = H_0 - y - \Delta y/2 - (Q + \Delta Q/2)^2 (T_1 + C_p N_p^2 (y + \Delta y/2)) \quad (4.1.10)$$

Como:

$$1/\Delta t = (Q + \Delta Q/2)/(A_p \Delta y) \quad (2.1.6)$$

se tiene:

$$(\Delta Q/\Delta y) (Q + \Delta Q/2) (L_t/A_e t + (y + \Delta y/2)/A_p) = g A_p H_{ap} \quad (4.1.11)$$

obteniéndose finalmente:

$$\Delta Q = g A_p H_{ap} \Delta y / ((Q + \Delta Q/2)(L_t/A_e t + (y + \Delta y/2)/A_p)) \quad (4.1.12)$$

ecuación que permite calcular el movimiento del agua en el pique.

4.2. FASE 3.

Se ha llamado FASE 3 al movimiento del frente de agua en la caverna de maniobras hasta alcanzar el nivel máximo y empezar a bajar la cota del agua.

En la Figura 6 se muestran las definiciones usadas.

Podemos escribir por consiguiente:

$$B_1 = H_0 \quad (4.2.1)$$

$$B_2 = L_p + z + \Delta z/2 \quad (4.2.2)$$

(se desprecia la altura de velocidad y las pérdidas friccionales en la caverna)

$$\sum \Delta s/A = L_t/A_e t + L_p/A_p + (z + \Delta z/2)/A_c \quad (4.2.3)$$

$$\sum \Delta B_f = (Q + \Delta Q/2)^2 (K_{ft} N_t^2 + K_{fp} N_p^2) \quad (4.2.4)$$

$$\sum \Delta B_s = (K_{st} + K_s) (Q + \Delta Q/2)^2 \quad (4.2.5)$$

donde:

$$K_{fp} = L_p C_p \quad (4.2.6)$$

Reemplacemos (4.2.1) a (4.2.5) en (3.5). Escribiendo:

$$K = K_{st} + K_s + K_{ft} H t^2 + K_{fp} N p^2 \quad (4.2.7)$$

$$E = L t / A_{et} + L_p / A_p \quad (4.2.8)$$

$$y \quad H_{ac} = H_o - L_p \cdot (z + \Delta z / 2) - K (Q + \Delta Q / 2)^2 \quad (4.2.9)$$

resulta:

$$H_{ac} = (1/g)(\Delta Q / \Delta t) (E + (z + \Delta z / 2) / A_c) \quad (4.2.10)$$

como:

$$1/\Delta t = (Q + \Delta Q / 2) / (A_c \Delta z) \quad (2.1.7)$$

se tiene:

$$(\Delta Q / \Delta z) (Q + \Delta Q / 2) (E + (z + \Delta z / 2) / A_c) = g A_c H_{ac} \quad (4.2.11)$$

con lo cual se obtiene finalmente:

$$\Delta Q = g A_c H_{ac} \Delta z / ((Q + \Delta Q / 2) (E + (z + \Delta z / 2) / A_c)) \quad (4.2.12)$$

ecuación que representa el flujo del agua en la caverna superior.

4.3. CONDICION INICIAL.

El inicio del movimiento del agua equivale a abrir bruscamente una compuerta ubicada en la entrada del túnel, conectando el lago, de altura de agua "H_o", con el pique con agua a una altura "H₁".

En el instante "t = 0" se tiene:

$$Q = 0 \quad (4.3.1)$$

$$y = H_1 \quad (4.3.2)$$

Con esto la ecuación (4.1.10) queda:

$$H_{apo} = H_o - H_1 - \Delta y / 2 - (\Delta Q_o)^2 (T_1 + C_p N p^2 (H_1 + \Delta y / 2)) / 4 \quad (4.3.3)$$

y la ecuación (4.1.12) se reduce a :

$$(\Delta Q_o)^2 (L t / A_{et} + (H_1 + \Delta y / 2) / A_p) = 2g A_p \Delta y H_{apo} \quad (4.3.4)$$

Eliminando H_{apo} entre estas dos ecuaciones y despejando "ΔQ_o" se obtiene finalmente:

$$\Delta Q_o = A_p (2g(H_o - H_1 - \Delta y / 2) / E_o)^{1/2} \quad (4.3.5)$$

donde:

$$E_o = L t A_p / (A_e \Delta y) + (H_1 + \Delta y / 2) / \Delta y + g A_p^2 T_o / 2 \quad (4.3.6)$$

$$T_o = T_1 + C_p N p^2 (H_1 + \Delta y / 2) \quad (4.3.7)$$

Las ecuaciones (4.3.1), (4.3.2) y (4.3.5) permiten inicializar el cálculo del movimiento del agua con la ecuación (4.1.12).

5.- EJEMPLO DE APLICACION.

Se aprovecharán los ensayos transitorios realizados en el modelo de la bocatoma de la central Canutillar (VARAS, 1987) para comparar sus resultados con los determinados con las ecuaciones (4.1.12), (4.2.12) y (4.3.5). El cálculo se efectuó con un computador PC-XT y un programa en lenguaje BASIC.

5.1. DATOS.

La Figura No. 3 corresponde al tiro noruego de la bocatoma de la central Canutillar. Debido a la diversidad de secciones en el túnel, entre el lago y el pique se deberá calcular un área equivalente "A_{et}" y un coeficiente equivalente "K_{ft}", definidos según ecuaciones (5.1) y (5.2).

En el cuadro siguiente se resumen las características geométricas de las obras ("n" indica dimensión nominal):

OBRA	Dn(m ²)	Kft	CUADRO N° 1			
			L(m)	An(m ²)	Ae(m ²)	Subíndice
TUNEL I	4,80	0,1698	119,6	18,09	23,43	t
TUNEL II	5,80	0,0928	120,6	25,62	29,90	t
PIQUE	7,38	-	37,5	42,73	42,73	p
CAVERNA	13,73		8,5	148,50	148,50	c

$$\text{Para el túnel: } L t / A_{et} = \sum L_i / A_i \quad (5.1)$$

$$y \quad K_{ft} = \sum L_i / (A_i R_i^{2/3})^2 \quad (5.2)$$

Las condiciones iniciales son, para el lago Chapo a la cota 243 :
H_o = 31,00 m y H₁ = 20,00 m.

5.2.- CALCULOS.

Se efectuaron cálculos para 4 series diferentes de coeficientes (0, 1, 2 y 3 según Cuadro N° 2) y para 2 túneles diferentes (I y II según Cuadro N° 1).

CUADRO N°2: Coeficientes de pérdida de carga.

SERIE	ke	kc	kd	ko	ks	Nt	Np
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000	0,000
1	0,50	0,22	0,10	10,39	1,00	0,012	0,012
2	1,00	0,25	0,15	10,39	1,00	0,018	0,014
3	2,00	0,00	0,10	10,39	1,00	0,018	0,016

La serie (0) corresponde al caso en que no existen pérdidas de cargas, ni friccionales ni singulares. La serie (1) corresponde al caso de coeficientes mínimos y la serie (2) corresponde al caso de coeficientes máximos para el modelo (según MILLER, 1984). La serie (3) corresponde al caso de coeficientes para el prototipo.

Además se efectuaron cálculos con valores superiores de "N" que prácticamente no modifican los resultados.

En la TABLA N° 1 se resumen los cálculos realizados. La notación usada es la siguiente: I-f.j

- "I" (o "II") indica el tipo de túnel (ver Cuadro N° 1 de 5.1)
- "i" indica la serie de coeficientes usados
- "j" indica los niveles de agua iniciales

El valor " $Z_0 = H_0 + \Delta H - L_p$ " es el mayor nivel a que puede subir el agua si no hay aumento de sección en la caverna y si además se desprecian todas las pérdidas de carga.

La existencia de una burbuja de aire junto al tapón de roca tiene dos efectos en el flujo transitorio, los cuales no se han considerado en los cálculos. Ellos son :

- 1) La longitud inicial real de agua en el túnel es menor que la empleada en los cálculos, pues la burbuja de aire tiene un volumen de 300 m³, a la presión dada por la columna de agua en el pique.
- 2) En los instantes iniciales se produce una pérdida de carga adicional en la zona de entrada del túnel, al ser presionada la burbuja por el flujo de agua que irrumpe violentamente. La burbuja se deforma, se alarga y se achata contra la clave del túnel, escurriendo finalmente hacia el lago.

6.- CONCLUSIONES.

En cuanto a las medidas en el modelo hidráulico debe considerarse lo siguiente:

- a) El modelo no tenía por objeto determinar exactamente el nivel máximo que alcanzaba el agua en el pique después de la voladura del tapón rocoso, sino que su objetivo era diseñar la forma de la taza destinada a atrapar el máximo de rocas producto de la explosión.
- b) Los valores de "Zm" se obtuvieron de un registro de presiones efectuados en el radier del túnel bajo el pique (punto P de la Figura N° 3).

El tiempo calculado y el tiempo medido en el modelo, para la cota máxima del nivel de agua, son muy concordantes.

Para el túnel "I" el agua sube menos en el modelo que para los valores calculados.

Para el túnel "II" la situación es inversa, en el modelo el agua sube más que para los niveles calculados, pero en el caso II-1.4 el nivel medido ($Z_m = -0,2$ m) es más alto que el valor teórico sin pérdidas de carga ($Z_0 = -0,5$ m), lo cual indica que las medidas de presión en el modelo no son confiables para compararlas con los valores calculados.

Las ecuaciones obtenidas, sin otras restricciones que la unidimensionalidad del flujo y la incompresibilidad del fluido, permiten calcular con buena precisión la cota máxima a que subirá el agua, después de la

voladura del tapón de roca de la entrada. Los resultados del modelo no son buenos, pero en el caso del túnel I (diseño elegido para la bocatoma de la central Canutillar, actualmente en construcción) los valores calculados dan valores por el lado de la seguridad. En todo caso no debe olvidarse que en el prototipo el nivel de agua subirá un poco más, por efecto de la explosión misma.

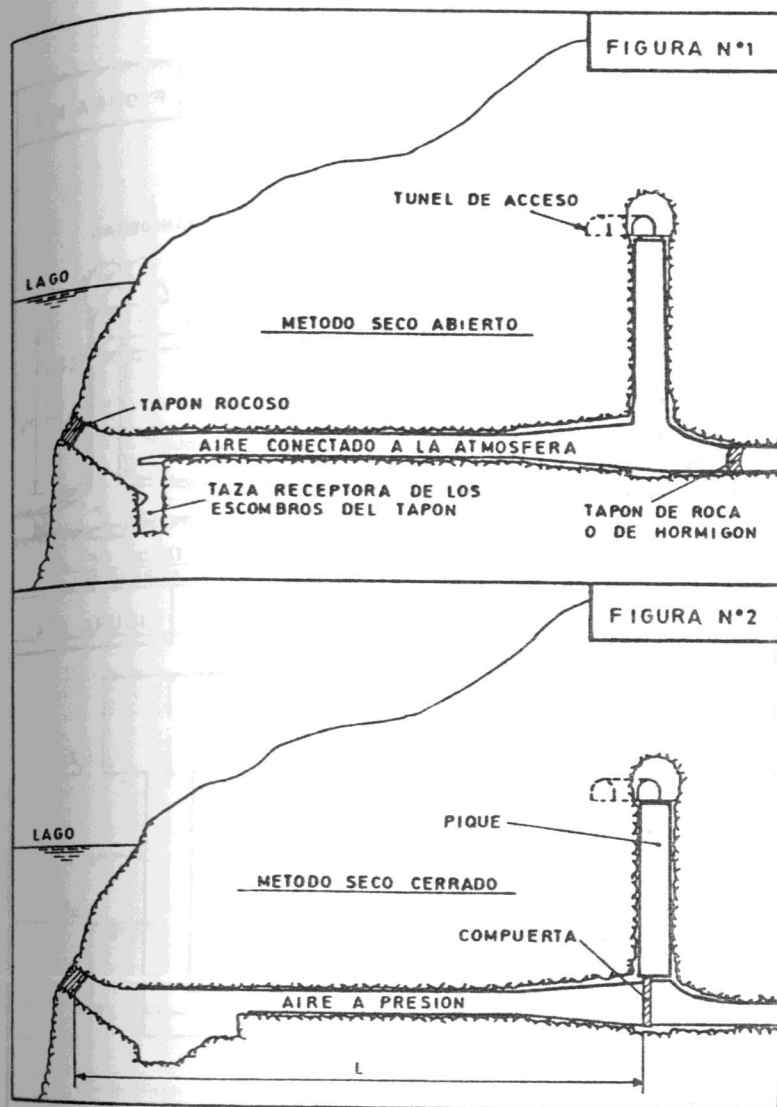
BIBLIOGRAFIA

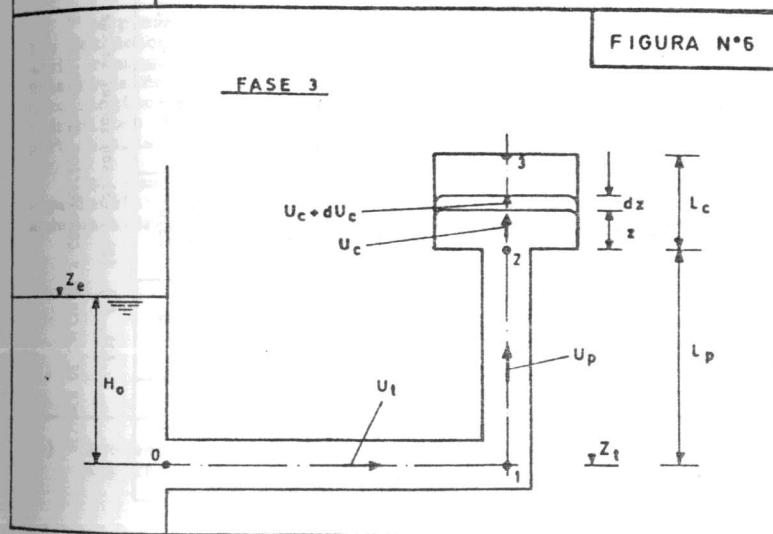
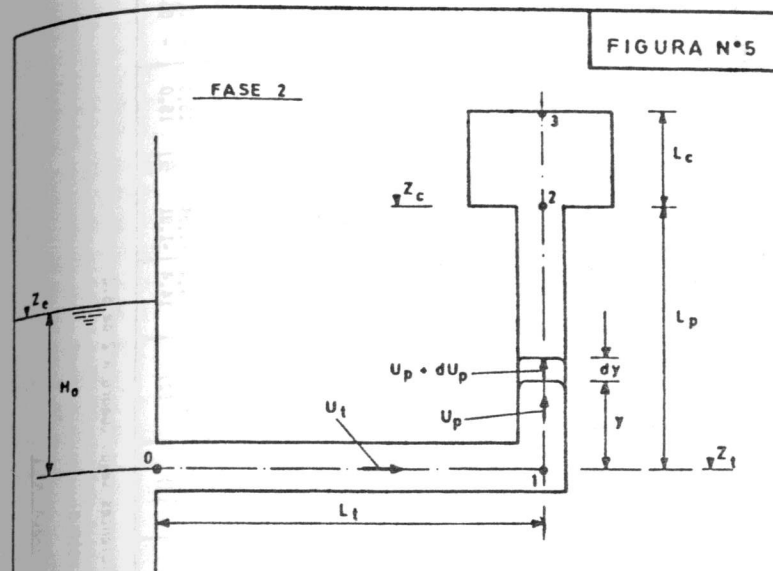
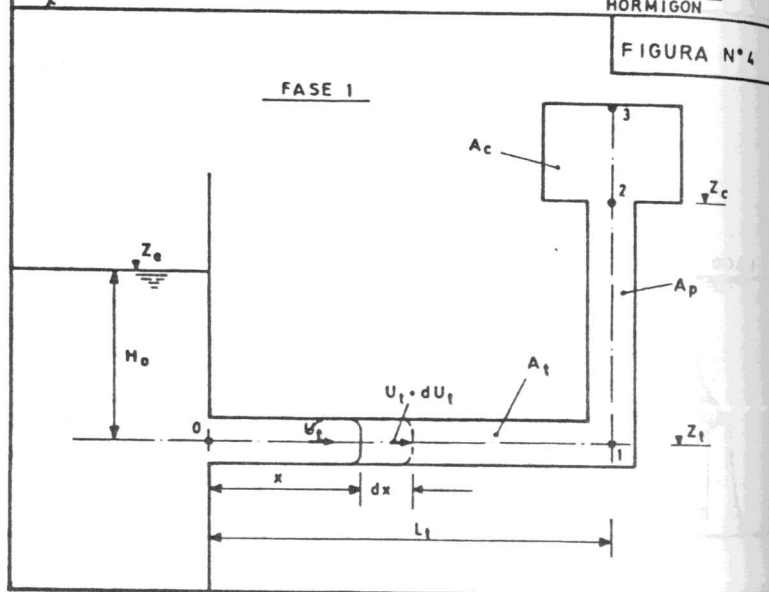
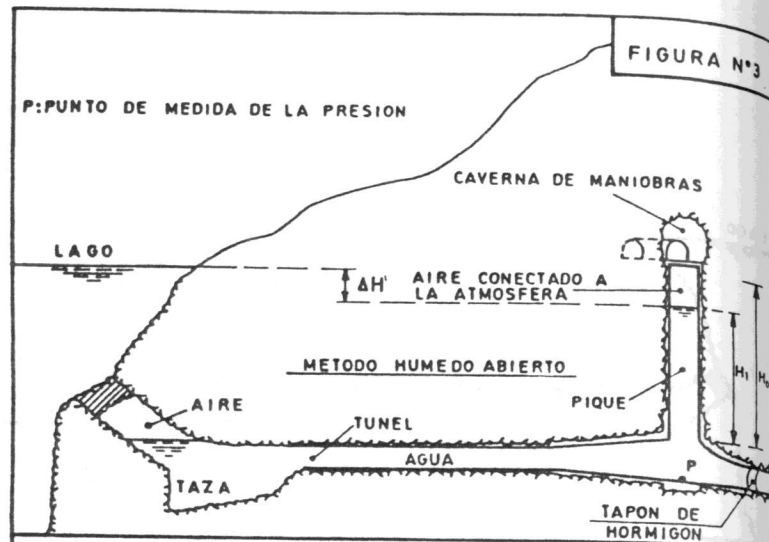
1. Maturana, C. (1971): "Conexión de bocatomas profundas a un lago mediante disparos bajo agua". Primer Coloquio Nacional de la Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica, Santiago, 33 páginas.
2. Miller, D.S. (1984): "Internal flow systems". BRHA-Fluid Engineering. Series. 4
3. Sepúlveda, A. y Varas, E. (1987): "Métodos de conexión de una bocatoma profunda a un lago". VIII Congreso Nacional de Ingeniería Hidráulica - S.Ch.I.H. y Universidad de Santiago, Vol. 1, p. 315 a 330.
4. Streeter, V.: "Fluid mechanics" Mc Graw-Hill Company-Intern. Student Edition Fourth Edition (1966), p. 585 (ec. 12.1.15)
5. Varas, E. y Sepúlveda, A. (1987): "Modelo hidráulico de la bocatoma profunda de la Central Canutillar". VIII Congreso Nacional de Ingeniería Hidráulica - S.Ch.I.H. y Universidad de Santiago, VOL. 1, p.267 a 281
6. Varas, E. (1987): "Informe final del estudio en modelo de la bocatoma de la central Canutillar". Depto. Ingen. Hidráulica - Universidad Católica de Chile.

NOMENCLATURA

SÍMBOLO	UNIDAD	SIGNIFICADO
A	m ²	sección transversal del flujo
A _{et}	m ²	definido en ecuación (5.1)
B	m	Bernoulli
B	-	subíndice que se refiere a la caverna o a curvas
c	m ^{-16/3}	definido en ecuación (2.2.3)
C	-	subíndice que se refiere al difusor
d	-	símbolo de diferencial
d	m	diámetro equivalente de la sección A
D	-	subíndice que significa equivalente o se refiere a la
e	-	entrada al túnel
E	m ⁻¹	definido en ecuación (4.2.8)
Eo	-	definido en ecuación (4.3.6)
f	-	subíndice que indica fricción
g	m/s ²	aceleración de gravedad
H _o	m	altura de agua en el lago
H ₁	m	altura de agua en el pique
H _{ac}	m	definido en ecuación (4.2.9)
H _{ap}	m	definido en ecuación (4.1.10)
H _{ap}	m	definido en ecuación (4.3.3)
i	-	subíndice general
J	-	pérdida de carga friccional unitaria
k	-	coeficiente adimensional de pérdida de carga singular
K	s ² /m ⁵	coeficiente dimensional de pérdida de carga singular
K _f	m ^{-19/3}	definido en ecuación (2.2.4)
K _{st}	s ² /m ⁵	definido en ecuación (4.1.7)
L	m	longitud (túnel, pique o caverna)
m	-	subíndice que indica cota máxima de agua
N	s/m ^{1/3}	coeficiente de rugosidad de Manning
p	kg/m ²	presión
p	-	subíndice que se refiere al pique
Q	m ³ /s	caudal instantáneo
R	m	radio hidráulico de la sección A
s	m	longitud a lo largo de una línea de corriente
s	-	subíndice que se refiere a pérdida singular
t	s	variable tiempo

t	-	subíndice que se refiere al túnel
To	s ² /m ⁵	definido en ecuación (4.3.7)
T1	s ² /m ⁵	definido en ecuación (4.1.8)
U	m/s	velocidad media en la sección A
v	m/s	vector velocidad
x	m	coordenada horizontal (en el túnel)
y	m	coordenada vertical en el pique
z	m	coordenada vertical en la caverna
ΔB_f	m	pérdida de carga friccional
ΔB_s	m	pérdida de carga singular
γ	kg/m ³	peso específico del fluido
ρ	kgs/m ⁴	densidad o masa específica del fluido
Σ	-	símbolo de sumatoria
ΔV	[V]	indica incremento finito de la variable V
λ	-	factor adimensional de fricción
$\frac{\lambda}{\sigma_0}$	kg/m ²	fatiga de cizalle en la pared del conducto





CASO	$\Delta H = H_0 - H_L$				$Z_0 = H_0 + \Delta H - L_p$				CALCULO		MODELO	
	H_0 (m)	H_L (m)	ΔH (m)	Z_0 (m)	k_f	N_f	t_m (s)	Z_m (m)	t_m (s)	Z_m (m)		
I-	31,0	20,0	11,0	4,5	(0)	(0)	17,1	1,56	-	-	-	
	30,0	19,0	11,0	3,5	(0)	(0)	16,6	1,15	-	-	-	
	29,0	18,0	11,0	2,5	(0)	(0)	16,2	0,79	-	-	-	
	31,0	20,0	11,0	4,5	(1)	(1)	16,2	0,25	16,0	0,6	0,6	
	31,0	20,0	11,0	4,5	(2)	(2)	16,2	0,28	16,0	0,6	0,6	
	31,0	20,0	11,0	4,5	(3)	(3)	16,2	0,29	-	-	-	
	29,0	18,0	11,0	2,5	(1)	(1)	16,0	-	18,0	3,7	3,7	
	29,0	18,0	11,0	2,5	(2)	(2)	16,0	-	18,0	3,7	3,7	
	29,0	18,0	11,0	2,5	(3)	(3)	16,0	-	18,0	3,7	3,7	
	30,0	19,0	11,0	3,5	(3)	(3)	16,0	-	16,0	-	-	
	30,0	19,0	11,0	3,5	(3)	(3)	16,0	-	16,0	-	-	
	31,0	20,0	11,0	4,5	(0)	(0)	15,4	1,56	-	-	-	
II-	30,0	19,0	11,0	3,5	(0)	(0)	15,0	1,15	-	-	-	
	31,0	23,0	8,0	1,5	(0)	(0)	14,6	0,47	-	-	-	
	31,0	25,0	6,0	-	(0)	(0)	14,3	-0,50	-	-	-	
	31,0	20,0	11,0	4,5	(1)	(1)	14,7	0,31	14,3	0,6	0,6	
	31,0	20,0	11,0	4,5	(2)	(2)	14,6	0,22	14,3	0,6	0,6	
	31,0	23,0	8,0	1,5	(1)	(1)	14,4	-0,49	14,5	0,4	0,4	
	31,0	23,0	8,0	1,5	(2)	(2)	14,4	-0,68	14,5	0,4	0,4	
	31,0	25,0	6,0	-	(1)	(1)	14,4	-1,64	15,0	0,2	0,2	
	31,0	25,0	6,0	-	(2)	(2)	14,4	-1,81	15,0	0,2	0,2	

(0), (1), (2) y (3) son series de coeficientes según Cuadro N°2 de 5.2

RESUMEN DE CALCULOS Y COMPARACION CON MEDIDAS EN MODELO

TABLA N° I

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA

IX CONGRESO NACIONAL

MODELOS HIDRAULICOS CON FONDO MOVIL DE OBRAS

INSERTAS EN CAUCES CORDILLERANOS

Yarko Niño C. (1)
Alejandro López A. (1)

RESUMEN

Se presenta una revisión de las condiciones de semejanza y de las metodologías de calibración de modelos hidráulicos de fondo móvil representativos de obras insertas en cauces cordilleranos. Esta revisión permite esbozar una serie de recomendaciones de tipo metodológico para lograr una adecuada modelación de los procesos hidráulicos y sedimentológicos asociados a las condiciones particulares que definen los cauces de montaña.

Se complementa el trabajo con una breve descripción de la experiencia recogida por los autores en la calibración de dos modelos hidráulicos de bocatomas ubicadas en cauces cordilleranos.

(1) Profesor e investigador. Centro de Recursos Hidráulicos, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.