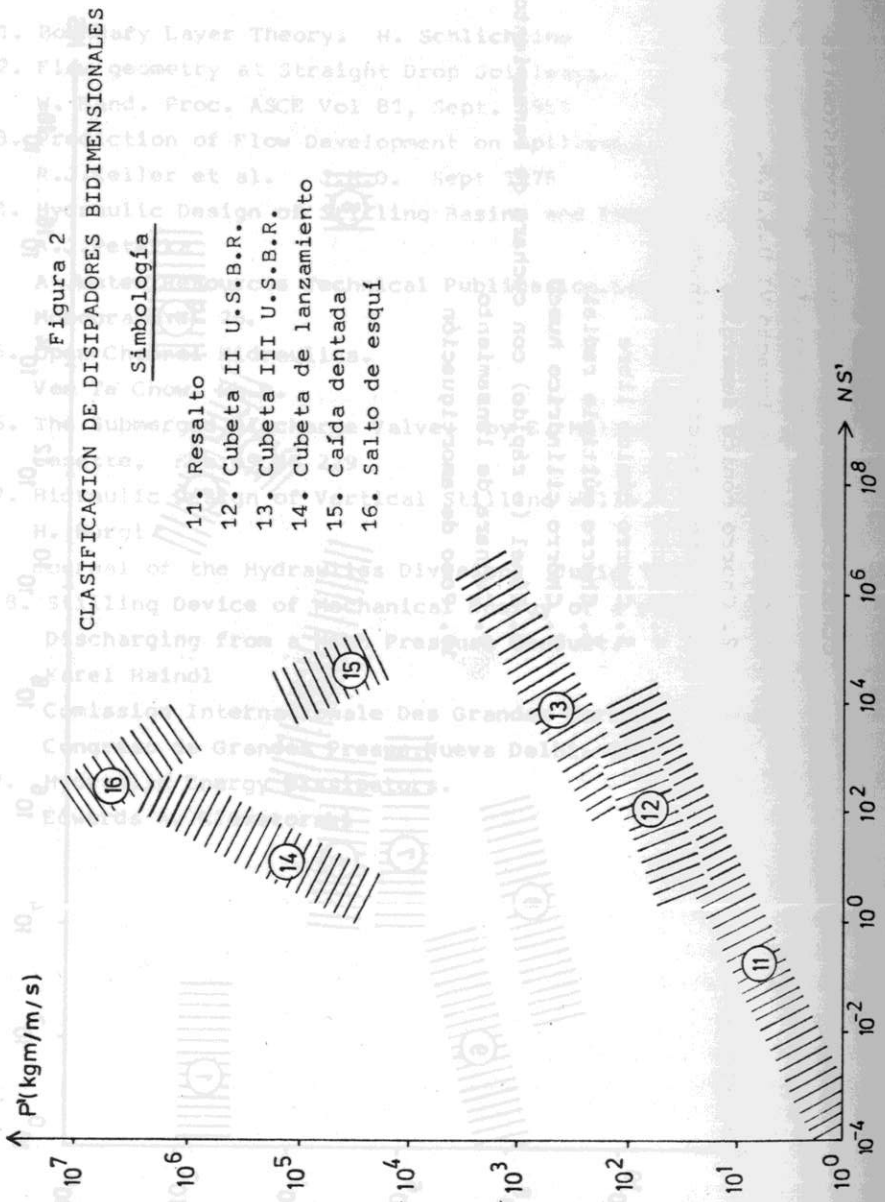

Figura 2

CLASIFICACION DE DISIPADORES BIDIMENSIONALES

Simbología

11. Resalto
12. Cubeta II U.S.B.R.
13. Cubeta III U.S.B.R.
14. Cubeta de lanzamiento
15. Caída dentada
16. Salto de esquí

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA

VI CONGRESO NACIONAL

SOCAVACION AGUAS ABAJO DE OBRAS DE EVACUACION

Alejandro López A. (1)

Aldo Tamburrino T. (2)

Harry King F. (3)

RESUMEN

Se presenta una revisión de fórmulas destinadas a estimar la socavación máxima aguas abajo de obras de evacuación del tipo vertederos con salto de esquí y barreras móviles de baja altura de carga. Además se incluyen resultados de mediciones de socavación realizadas en cuatro modelos de obras de este tipo. Se analizan estos resultados y se comparan con los estimados mediante las fórmulas que, a juicio de los autores, son las más convenientes de aplicar a los casos analizados. Estos ejemplos sirven para formular observaciones acerca de la aplicabilidad de las relaciones utilizadas.

(1) Ingeniero Civil. Profesor e Investigador. Centro de Recursos Hidráulicos. Departamento de Ingeniería Civil. U. de Chile.

(2) Egresado de Ingeniería Civil. Profesor Auxiliar e Investigador del Centro de Recursos Hidráulicos. Departamento de Ingeniería Civil. U. de Chile.

(3) Ingeniero Civil. Empresa Nacional de Electricidad, ENDESA.

1. Introducción

Evaluar la máxima socavación que se produce en el lecho de un río al pie de obras de evacuación de crecidas a causa del caudal evacuado, es un problema de gran importancia en el diseño de estas obras, a la vez que de difícil solución, debido a la complejidad del fenómeno, derivada del número de parámetros en él involucrados.

Para dar respuesta al problema planteado, se han propuesto numerosas expresiones de cálculo, las que han sido obtenidas basándose sea en análisis teóricos, sea en experiencias de laboratorio, producto de investigación básica o aplicada (modelos físicos), sea en observaciones y registros de obras en prototipo, por lo que es conveniente, al aplicarlas, tener antecedentes relativos al tipo de estructura para la cual éstas han sido deducidas y el rango de variación de los parámetros de mayor relevancia en el fenómeno.

Como esta información aparece dispersa en la literatura, y no siempre se explicita el rango y condiciones de aplicación de las distintas relaciones, se ha creído conveniente resumir en este trabajo los antecedentes que del tema se han recopilado en el Centro de Recursos Hidráulicos de la Universidad de Chile, como parte de una investigación en curso, relativa al estudio de la socavación al pie de un radier fijo. Se presenta también los resultados de mediciones de socavación efectuados en estudios en modelos reducidos de obras de evacuación del tipo vertederos con salto de esqui y barreras móviles de baja carga, comparándose éstos con los obtenidos al aplicar algunas de las fórmulas presentadas, formulándose finalmente algunas conclusiones derivadas de estos resultados.

2. Fórmulas para evaluar la socavación máxima aguas abajo de estructuras hidráulicas

La máxima profundidad de socavación "Y", la que generalmente se mide desde la superficie libre del escurrimiento en la zona de restitución, es una función de variables representativas del fluido, del flujo, del sedimento del lecho y de la obra de evacuación. Una relación funcional simplificada para describirla (Vernet, 1983) es:

$$Y = f_1 (\rho, \nu, D, \rho_s, q, H, g(S-1), h_r, \alpha) \qquad (1)$$

en donde: ρ y ν representan la densidad y viscosidad del fluido; D y ρ_s un diámetro representativo y la densidad del sedimento; H representa el desnivel entre la carga en el embalse, o la poza aguas arriba de una barrera, y el nivel de restitución; h_r es la profundidad del escurrimiento aguas abajo de la zona socavada; g(S-1), es el peso específico relativo sumergido del sedimento; g, es la aceleración de gravedad; S, es la densidad relativa del sedimento y α es el ángulo de lanzamiento de la estructura de evacuación (salto de esqui).

Aplicando análisis dimensional, despreciando los efectos viscosos y considerando constante la densidad relativa del sedimento, se puede llegar a una expresión del tipo

$$Y/H = f_2 \left(\frac{q}{\sqrt{gH^3}}, \frac{h_r}{H}, \frac{D}{h_r}, \alpha \right) \qquad (2)$$

La incidencia en el fenómeno de uno u otro de los parámetros que aparecen en la relación (2), queda reflejada en la estructura de las distintas fórmulas propuestas. Muchos autores consideran que la socavación máxima depende sólo del caudal q y del desnivel H, mientras que otros hacen intervenir, además de esas variables, un diámetro representativo del sedimento del lecho y el nivel de escurrimiento en la zona de restitución. Por otra parte no es posible expresar la profundidad de la socavación aguas abajo de obras de evacuación, por una relación única, ya que cada obra condiciona el fenómeno de manera distinta, como lo demostraron Schoklitsch y Veronese (Jaeger, 1954). Además de ésto, hay que tener presente el rango de validez de la fórmula e interpretar correctamente las variables que en ella intervienen.

A continuación se presentan las principales relaciones que se han determinado para evaluar la socavación máxima, dependiendo del tipo de estructura hidráulica. En esta revisión se ha incluído sólo expresiones relacionadas con disipadores de energía del tipo vertederos con salto de esquí y barreras móviles de baja carga. La mayoría de estas fórmulas están basadas en experiencias de laboratorio y las menos en observaciones y mediciones de prototipo complementadas con estudios en modelos.

Las variables que intervienen en las diferentes fórmulas se definen gráficamente en la figura en que se representa la obra que sirvió de base al estudio correspondiente.

En 1932 Schoklitsch, (Fig. 1), como resultado de experiencias de laboratorio propuso la expresión siguiente para el cálculo de la socavación máxima:

$$Y = S + h_d = 4{,}75 \frac{H^{0.2}\, q^{0.5}}{D_{90}^{0.32}} \qquad (3)$$

en la cual se expresan las variables en unidades métricas, siendo q el caudal por unidad de ancho y D_{90} el diámetro del sedimento para el cual el 90% es más fino. El rango experimental del diámetro varió entre 0,5 y 15 mm. Según Simons y Senturk, esta expresión da buenos resultados para diámetros D_{90} relativamente grandes, pero está restringida a valores del desnivel H relativamente bajos.

Veronese (1937) (Fig. 2) estudió la socavación que se produce cuando, además de tenerse el cambio de lecho fijo a móvil, este último puede ser considerado de ancho infinito. Obtuvo la relación:

$$Y = h + S = \frac{4{,}12}{D^{0.66}}\, Q^{0.422} \qquad (4)$$

En esta expresión, aparte del diámetro que se expresa en mm., las restantes variables se expresan en unidades MKS. Q representa el caudal total. El rango de las variables en la experimentación fue el siguiente: 0,9 cm $\leq$ h $\leq$ 6.2 cms; 4,9 cms $\leq$ b $\leq$ 32 cms; 0,28 lt/s $\leq$ Q $\leq$ 31,5 lt/s; 4 mm $\leq$ D $\leq$ 14,2 mm (sedimento uniforme).

Para la estructura de la Fig. 3, Veronese (1937), propuso la relación:

$$Y = S + h_d = 3{,}68 \frac{H^{0.225}\, q^{0.54}}{D^{0.42}} \qquad (5)$$

Los rangos experimentales fueron: 9.1 mm $\leq$ D $\leq$ 36,2 mm (D = diámetro medio); 1 lt/s/m $\leq$ q $\leq$ 82,8 lt/s/m; 2 cm $\leq$ S + h_d $\leq$ 37 cm; 0,7 m $\leq$ H $\leq$ 1,5 m; 0 $\leq$ S $\leq$ 22 cm. Veronese indica que para diámetros de sedimento inferiores a 5 mm, la socavación es independiente de las dimensiones de la arena, y se expresa por la relación:

$$Y = S + h_d = 1{,}90\, H^{0.225}\, Q^{0.54} \qquad (6)$$

Las relaciones 3,4,5 y 6 tienen el serio inconveniente de ser incompatibles con la ley de semejanza de Froude, condición indispensable para aplicarlas a prototipos, lo que debe tenerse en cuenta si se desea utilizarlas en algún caso particular.

Para una estructura similar a la de la Fig. 3, Castro y Pinilla (1962), propusieron la expresión siguiente, la que si es compatible con la semejanza de Froude.

$$\frac{S + H_v}{h_c} = 5{,}65 \sqrt{\frac{H_v}{h_c}} + \Delta - \frac{h_d}{h_c} \qquad (7)$$

h_c es la altura crítica del escurrimiento y Δ un término que depende del tamaño del grano. Los autores dan una relación gráfica para diámetros de sedimento comprendidos entre 2.6 y 16 mm. El rango de las experiencias fue: 2,66 mm $\leq$ D $\leq$ 15,6 mm; 30 cms $\leq$ H_v $\leq$ 100 cm; 50 lt/s/m $\leq$ q $\leq$ 125 lt/s/m.

Jaeger en 1939 analiza el caso mostrado en la Fig. 4 y propone la relación:

$$Y = S + h_d = 6\, H^{0.25}\, q^{0.5} \left(\frac{h_d}{D^{90}}\right)^{1/3} \qquad (8)$$

La cual se expresa en unidades MKS y es compatible con la ley de Froude.

Para la misma estructura mostrada en la Fig. 4, Eggenberger deduce en 1943 la expresión:

$$Y = S + h_d = C \frac{H^{0.5}\, q^{0.6}}{D_{90}^{0.4}} \qquad (9)$$

en donde D se expresa en mm y el resto de las variables en MKS. Esta fórmula también es compatible con la semejanza de Froude. C es una variable definida por la razón de caudales q_u/q_d (Fig. 4), cuya representación gráfica se encuentra en Jaeger (1954) y Simons y Senturk (1977). Este coeficiente tiene dos valores extremos que son 22,88 si q_d = 0 y 10,35 si q_u = 0.

Para el tipo de obra mostrado en la Fig. 5, Ivanissevich (1980) da la expresión:

$$S = 0{,}34\ (C_v \cdot q)^{0.75}\ \frac{H^{0.395}}{D_{90}^{0.5}} \qquad (10)$$

en la cual las variables están en unidades MKS. C_v es un coeficiente que toma en cuenta la resistencia que opone el aire y las paredes al escurrimiento, y que varía entre 0.80 y 1. Esta expresión es compatible con la ley de Froude y fue deducida a partir de mediciones en modelos.

Para el caso en que existe un resalto no ahogado en el lecho móvil (Fig. 5), existen las expresiones propuestas por Jaeger y Abecasis-Manzanares (Jaeger, 1954) y Valentin (1967). La enunciada por los primeros es:

$$S = 0{,}00475\ H \cdot q^{2/3} \qquad (11)$$

donde S y H se expresan en cm y q en lt/s/m. Las experiencias se realizaron con sedimentos de 2 mm de diámetro, para un rango de $20 \leqslant H \leqslant 30$ cms; $0{,}4 \leqslant h_2/H \leqslant 0{,}8$.

Valentín propone en cambio:

$$\log\left(\frac{S}{h_1}\right) = \frac{F_{r1} - 2{,}0}{4{,}7} - 0{,}55 \log\left(\frac{D^{90}}{h_1}\right) \qquad (12)$$

en donde h_1 y F_{r1} representan la altura y el número de Froude del torrente en el lecho móvil antes que éste se deforme. Las experiencias se realizaron para el siguiente rango: $2{,}28 \leqslant F_{r1} \leqslant 6{,}52$; $0{,}73$ mm $\leqslant D_{90} \leqslant 13{,}5$ mm; $11{,}8$ cm $\leqslant S \leqslant 34{,}19$ cm; $0{,}68$ cm $\leqslant h_1 \leqslant 9{,}30$ cm.

Para el disipador mostrado en Fig. 6, con el resalto sobre la cubeta disipadora, Ahmad (1953) ha propuesto la expresión:

$$S = A - T \quad (13), \quad \text{en donde } A = (K \cdot q)^{2/3} \qquad (14)$$

K representa la relación única deducida por Ahmad entre $(A^{3/2}/q)$ y el tiempo de experimentación. Su valor depende de la longitud l_s de la cubeta y varía entre 1,3 y 2,4. El primer valor se obtuvo para una cubeta de 39,0 m de longitud y el segundo para una cubeta de 30,5 m de longitud (valores de prototipo). Los ensayos correspondieron a modelos seccionales a escalas 1:40 de dos obras de evacuación.

Cuando la estructura de evacuación es un rápido que termina en un lanzador o salto de esquí (Fig. 7), Martins (1975) propone la ecuación:

$$Y = S + h_2 = \frac{3q^{0.6}\ Z^{0.1}}{g^{0.3}} \ (15) \quad \text{ó} \quad Y = 1{,}5\ q^{0.6}\ Z^{0.1} \ (16) \quad ; \quad g = 9{,}8\ (m/s^2)$$

Esta fórmula, que es compatible con la ley de Froude, fue obtenida de mediciones en 18 prototipos con lechos rocosos, las variables están comprendidas entre: $1{,}6\ m^2/s \leqslant q \leqslant 170\ m^2/s$; $1{,}8\ m \leqslant H \leqslant 53$ m; $2{,}4\ m \leqslant S \leqslant 55$ m.

Para el mismo caso de la Fig. 7, Ivanissevich (1980), propone las siguientes relaciones; también compatibles con la ley de Froude.

Lecho rocoso : $Y = S + h_2 = 2{,}98 \cdot \sqrt{C_v \cdot q} \cdot H^{0.25}$ (17)

Lecho granular: $Y = S + h_2 = 1{,}35 \cdot \sqrt{C_v \cdot q} \cdot \dfrac{H^{0.3145}}{D_{90}^{0.0645}}$ (18)

En estas ecuaciones las unidades están en MKS y C_v es el coeficiente definido anteriormente. Ambas fueron deducidas a partir de datos de modelos y prototipos. El rango de las variables varió entre: $0{,}006\ m^2/s \leqslant q \leqslant 155{,}6\ m^2/s$; $0{,}05\ m \leqslant H \leqslant 105$ m; $0{,}0064\ m \leqslant D_{90} \leqslant 4{,}2$ m.

Wu (1973), basándose en mediciones efectuadas en varias represas en Taiwán y en estudios en modelos, encontró, para el mismo caso de la Fig. 7, otra relación compatible con la ley de Froude. Esta es:

$$S = 1{,}18\ H^{0.235}\ q^{0.51} \qquad (19)$$

Las mediciones se efectuaron en ríos de fuerte pendiente con escurrimiento en régimen supercrítico, para un rango de: $25\ m^2/s \leqslant q \leqslant 113{,}6\ m^2/s$; $31\ m \leqslant H \leqslant 180$ m; $19\ m \leqslant S \leqslant 43$ m.

Chividini et al (1983), basándose en una recopilación de datos experimentales de diferentes autores y en sus propias experiencias en modelos de aliviaderos tipo salto de esquí, han deducido la fórmula:

$$\frac{Y}{H} = 2{,}5\left(\frac{q}{\sqrt{gH^3}}\right)^{0.5} \qquad (20)$$

Esta relación, que es compatible con la ley de Froude, es válida para sedimento no cohesivo con diámetro mayor a 1 cm y en condiciones tales que el coeficiente de pérdida de energía en el rápido de descarga esté com-

prendido entre 0,6 y 0,75.

Por último, entre las escasas expresiones que tienen en cuenta el ángulo de lanzamiento α del lanzador (Fig. 7), puede citarse la propuesta por Chee y Kung en 1974 (Vernet, 1983):

$$\frac{Y}{H} = 3{,}3\left(\frac{q}{\sqrt{gH^3}}\right)^{0.6} \cdot \left(\frac{H}{D_{90}}\right)^{0.1} \cdot \alpha^{0.1} \qquad (21)$$

En el punto 4 se determina con algunas de las fórmulas presentadas, las socavaciones que se producirían en obras proyectadas por ENDESA y se comparan estos resultados con los obtenidos en los modelos de dichas obras, experimentados en laboratorios.

3. Resultados de la Socavación Máxima Medida en Modelos.

Se presentan en este punto los resultados obtenidos en las experimentaciones llevadas a cabo en los modelos reducidos correspondientes a las siguientes obras: Bocatoma Maule de la Central Pehuenche, Barrera Polcura de la Central Antuco, Obra de Evacuación de la Central Colbún y Obra de Evacuación de la Presa Melado de la Central Pehuenche. En todas ellas el estudio de la socavación formó parte de una experimentación que abarcó otros aspectos hidráulicos y sedimentológicos relacionados con el proyecto de las obras. El estudio de la Bocatoma Maule se desarrolló en el Centro de Recursos Hidráulicos de la Universidad de Chile, el de Polcura en el Instituto Nacional de Hidráulica, el de Colbún en ENDESA y el de Melado en el Laboratorio de Hidráulica del Instituto Tecnológico de Giorgia, U.S.A.

En la Tabla N° 1 se presentan las características principales del prototipo, la escala del modelo y el tipo de obra de evacuación. Estas últimas se esquematizan en las Figs. 8 a, b y c.

Tabla N° 1. Características Principales de las Obras Ensayadas.

Proyecto	$Q_{Diseño}$ m^3/s	$D_{90\%}$ m	Desv. Estandar σ	Escala del Modelo λ	Obra de Evacuación
Bocatoma Maule	1500	0,43	4,05	1:65	5 compuertas de sector de 10,2 m. de ancho cada una, con cubeta sin disipación de energía
Barrera Polcura	2000	0,32	5,29	1:40	4 compuertas de sector de 13,2 m. de ancho cada una, con cubeta disipadora por resalto.
Vertedero Embalse Colbún	7500	0,27	2,69	1:100	Vertedero con salto de esqui. Ancho en la zona de despegue: 50 m. Angulo de salida α = 40°
Vertedero Embalse Melado	3620	0,27		1:60	Vertedero con salto de esqui. Ancho en la zona de despegue: 36.6 m. Angulo de salida α = 30°.

En la Tabla 2 se muestra la socavación máxima medida "S", el desnivel "H", el caudal unitario "q" y el tiempo de ensayo. Salvo esta última variable que se da en tiempo de modelo, todas las restantes se refieren a valores de prototipo. En el caso de la Bocatoma Maule se ha incluido los resultados correspondientes a algunas de las diversas formas de cubeta, ensayadas, las que se esquematizan en la Fig. 9. Las socavaciones medidas en Melado no son máximas por cuanto en la experiencia S9 se fijó el fondo a la cota 553, a la cual alcanzó la socavación observada y en la S10 ésta llegó al piso del modelo.

Tabla N° 2. Socavación Medida en Modelo.

Proyecto	Exp.	q m^2/s	H m	T min	S m	Obra disipadora	Observaciones
Bocatoma Maule	J6	29,5	4,11	90	7,3	Cubeta 5a	5 Compuertas en función
	J4	29,6	4,15	90	8,8	Cubeta 6	5 Compuertas en función
	KA12	29,5	5,82	270	8,7	Cubeta 5a	Compuerta central func.
	L3	15,0	3,99	270	7,1	Cubeta 5a	" " "
	L4	8,0	2,84	270	4,2	Cubeta 5a	" " "
	KA4	29,5	6,08	270	9,9	Cubeta 4c	" " "
	KA5	29,6	6,30	270	10,1	Cubeta 4e	" " "
	KA1a	29,3	5,49	230	9,4	Cubeta 4	" " "
	KA8	29,4	5,56	270	8,4	Cubeta 5	" " "
	KA9	29,8	5,29	270	8,2	Cubeta 6	" " "
	KA13	30,1	6,46	270	8,7	Cubeta 6c	" " "
	KB4	29,6	5,97	270	8,8	Cubeta D5	Compuerta desripiadora en función
	KB1	30,0	6,72	270	8,7	Cubeta D2	Compuerta desripiadora en función
	KB2	30,0	5,04	270	8,1	Cubeta D3	Compuerta desripiadora en función
	KC2	29,5	5,10	270	9,6	Cubeta 5a	Compuerta extrema en función
	KC1	29,5	6,09	270	9,4	Cubeta 5	Compuerta extrema en función
Barrera Polcura	A12	35,2	6,95	60	10,3	Cubeta disipadora	1 Compuerta en función
Colbún	4A	150,0	104,05	120	58,7	Salto de esquí	Las 4 compuertas funcionando
	4C	150,0	104,05	120	64,3		
Melado	S9	79,13	80,7	480	>12,0	Salto de esquí	Las 3 compuertas funcionando
	S10	170,2	77,0	480	>43,0	" " "	

Los datos incluídos en la Tabla 2 permiten hacer algunos comentarios sólo en el caso de la Bocatoma Maule. El resto de la información se considerará, junto con la anterior, en la comparación con los valores estimados mediante fórmulas.

Los resultados del estudio en el modelo de la Bocatoma Maule, muestran la influencia de la carga H en la magnitud de la socavación cuando el caudal q permanece constante, y que también la socavación depende de las variaciones del caudal.

En cuanto a la influencia de la operación de compuertas en los resultados, se observó que para un mismo caudal unitario q, la socavación es levemente mayor cuando este caudal se evacúa por solo una compuerta. Esto podría explicarse por el hecho de que cuando funcionan las 5 compuertas, pasando por cada una de ellas el mismo q anterior, hay aporte lateral de sedimento, proveniente de las riberas, al bulbo de socavación.

Por último, otro antecedente interesante es que al no haber disipación de energía dentro de la cubeta, la forma de ésta no incide en la magnitud de la socavación, y su diseño queda condicionado entonces por otros factores.

4. Estimación de la Socavación mediante fórmulas: Aplicación a los estudios anteriores.

Se presenta en este punto una comparación entre la socavación medida en los modelos presentados en el párrafo anterior y las estimaciones obtenidas al aplicar algunas de las fórmulas analizadas en el párrafo 2 a los correspondientes prototipos. En la elección de las fórmulas a aplicar se tuvo en consideración el tipo de obra, la compatibilidad de la fórmula con la semejanza de Froude, y los antecedentes disponibles referentes a la deducción de dicha fórmula. Es así como las relaciones 3, 4, 5 y 6 no se consideraron por no ser compatibles con la ley de Froude. Las fórmulas adoptadas para cada caso son:

- Barreras Móviles de baja altura de carga (Maule y Polcura): Wu (ec 19), Ivanissevich (ecs. 10 y 18), Ahmad (ec. 11), Eggenberger (ec. 9 con q_u=0) y Jaeger (ec. 8).

Al aplicar la fórmula de Ivanissevich en Bocatoma Maule se adoptó un coeficiente C_v=1,0 por no haber disipación de energía dentro de la cubeta, en cambio en Polcura, donde hay algo de disipación, se consideró C_v=0,8. Al aplicar la fórmula de Ahmad se adoptó en ambos casos un valor del coeficiente k de 2,4, por cuanto la longitud de las cubetas es menor que 30 m.

- Vertederos con salto de esquí (Colbún y Melado): W_u (ec. 19), Ivanissevich (ec. 18), Martins (ec. 15), Chividini et al (ec. 20) y Chee y Kung (ec. 21).

Al aplicar la fórmula de Ivanissevich se consideró, en ambos casos, pérdida de energía en el rápido, por lo que se consideró C_v=0,8.

Cabe hacer presente que las fórmulas de W_u y de Ivanissevich se aplicaron a los dos tipos de obras, por ser fórmulas basadas en datos de terreno recogidos en diferentes estructuras de evacuación.

En la Tabla N° 3 se presentan los resultados obtenidos con las relaciones anteriores, indicándose la socavación máxima S, que corresponde a la profundidad de la fosa de socavación, medida desde el nidel del lecho original. Los valores indicados para la Bocatoma Maule, corresponden sólo a los obtenidos con la cubeta del diseño definitivo.

5. Comparación de la Socavación Estimada con la Medida en Modelo.

Con el fin de tener un índice de comparación entre las socavaciones estimadas (Se) y la medida (Sm), en la Tabla 4 se presenta la relación Se/Sm, la que complementa la información de la Tabla 3.

A continuación se formulan observaciones, separadamente según el tipo de obra, derivadas de comparar los resultados estimados con los medidos:

TABLA N° 3

ESTIMACIONES DE LA SOCAVACION MAXIMA S(m)

	Exp.	ec.19	ec.10	ec.18	ec.15	ec.11	ec.9	ec.8	ec.20	ec.21	Smedida
Barreras Móviles											
Maule	J6	8,9	11,2	9,2	-	10,1	11,2	5,9	-	-	7,3
	KA12	9,7	12,7	12,2	-	10,0	15,5	6,0	-	-	8,7
	L3	6,3	6,6	8,2	-	6,6	8,9	2,7	-	-	7,1
	L4	4,3	3,7	5,3	-	4,0	5,1	1,7	-	-	4,2
	KB4	9,8	12,9	11,5	-	9,1	15,0	6,6	-	-	8,8
	KC2	9,4	12,1	10,7	-	9,9	13,5	6,2	-	-	9,6
Polcura	A12	8,8	15,2	12,0	-	11,1	20,9	8,8	-	-	10,3
Saltos de Esquí											
Colbún	4A	37,3	-	63,4	41,0	-	-	-	49,3	88,8	58,7
	4C	37,3	-	63,4	41,0	-	-	-	49,3	88,8	64,3
Melado	S9	12,5	-	21,1	11,5	-	-	-	16,7	23,3	>12(*)
	S10	35,0	-	59,2	41,5	-	-	-	46,6	84,4	>43(**)

(*) Experiencia con plataforma fija a la cota 553 m, la que se colocó para simular la resistencia que opone la roca a la erosión.

(**) Se removió la plataforma, colocándose hasta el piso del modelo, material erosionable (esta situación no representa la realidad del prototipo, al no considerar el enrocado).

TABLA N° 4

RELACION ENTRE LAS SOCAVACIONES ESTIMADAS Y LAS MEDIDAS EN MODELOS (Se/Sm)

	Exp.	ec.19	ec.10	ec.18	ec.15	ec.11	ec.9	ec.8	ec.20	ec.21
Barreras Móviles										
Maule	J6	1,22	1,53	1,26	-	1,38	1,53	0,81	-	-
	KA12	1,11	1,46	1,40	-	1,15	1,78	0,69	-	-
	L3	0,89	0,93	1,15	-	0,93	1,25	0,38	-	-
	L4	1,02	0,88	1,26	-	0,95	1,21	0,40	-	-
	KB4	1,11	1,47	1,31	-	1,03	1,70	0,75	-	-
	KC2	0,98	1,26	1,11	-	1,03	1,40	0,65	-	-
Polcura	A12	0,85	1,48	1,16	-	1,08	2,03	0,85	-	-
Saltos de Esquí(*)										
Colbún	4A	0,64	-	1,08	0,70	-	-	-	0,84	1,51
	4C	0,58	-	0,99	0,64	-	-	-	0,77	1,38

(*) En Melado no se calculó la relación Se/Sm porque la socavación medida no corresponde a la máxima.

A) Barreras Móviles:

a) Cuanto está en operación una sola compuerta (exp KA12, KB4, KC2, L3, L4 y A12) se encuentra que las ecuaciones de Wu (ec. 20) y de Ahmad (ec. 12) son las que dan los valores más próximos a los medidos en modelo. En promedio la relación entre los valores estimados y medidos con la relación de Wu es de 1,02 en el modelo de la Bocatoma Maule y 0,85 en Polcura, y con la de Ahmad es 1,02 en Maule y 1,08 en Polcura.

Las fórmulas de Ivanissevich y Eggenberger, especialmente esta última, dan valores muy altos comparados con los resultados experimentales; al contrario de la relación de Jaeger que entrega valores muy inferiores.

b) Al aplicar las fórmulas cuando están en funcionamiento todas las compuertas (exp. J6), se aprecia que aumenta la relación entre la socavación estimada y medida, lo cual puede atribuirse a que la socavación experimental disminuye por el aporte lateral de sedimento al bulbo de socavación.

c) Las fórmulas que tienen en cuenta el diámetro del sedimento son las que presentan mayor diferencia con los resultados experimentales, dos de ellas dan socavaciones por exceso (ec. 9 y 10) y una por defecto (ec. 8).

d) De las relaciones más concordantes con los resultados experimentales, la de Wu y la de Ahmad, la primera está basada principalemente en datos de terreno provenientes de diferentes tipos de obras de evacuación y de un modelo de un salto de esquí, lo cual le da cierta generalidad que avalaría la concordancia observada. En cuanto a la de Ahmad, ésta se basa en datos de modelos de disipadores del tipo de resalto, lo que le da cierta semejanza a los casos estudiados, y que explicaría la similitud entre las estimaciones y observaciones de socavación.

e) El coeficiente Cv de pérdida de energía de la fórmula de Ivanissevich, determinado a partir de los resultados experimentales en la Barrera de Polcura es de 0,37.

B) Vertederos con salto de esquí.

En cuanto a la comparación de los resultados experimentales y estimados en evacuadores tipo salto de esquí, a pesar de contar con sólo dos experiencias, es posible comentar los siguientes aspectos:

a) Las relaciones de Wu y de Martin dan valores muy inferiores a los medidos. Con respecto a esta última, comparaciones efectuadas por Chividini et al (Chividini 1983), con datos de diferentes prototipos y modelos, han conducido a similar conclusión.

b) La fórmula de Ivanissevich es la que mejor concuerda con las mediciones en modelo. Cabe hacer presente que Ivanissevich comparó su fórmula con resultados de mediciones en modelo y prototipo efectuados por otros autores, encontrando que su relación daba sistemáticamente valores mayores.

c) Al contrario de lo observado para las barreras móviles, las fórmulas que no consideran el sedimento del lecho (Wu, Martins y Chividini et al) dan valores inferiores a las que lo consideran. De ellas la más próxima al resultado experimental es la última, la que representa una variante de las otras.

d) Al comparar los valores de la socavación medida con los entregados por las fórmulas aplicadas, se ve que éstos siguen similar tendencia en ambos modelos.

e) La fórmula de Chee y Kung que tiene en cuenta el ángulo de lanzamiento, y de la cual no se dispuso de mayores antecedentes, da valores muy diferentes a todas las otras y a los medidos, sobreestimando en mucho la socavación.

Una observación general que debe tenerse presente en todo análisis de socavación aguas abajo de estructuras de evacuación, es el efecto en el fenómeno de las corrientes de retorno, las que se producen por la acción de la lámina vertiente sobre el colchón de agua y cuya magnitud e incidencia en el proceso de socavación dependerá de las características de la obra y de la configuración de la zona de restitución, entre otros factores. Esto obliga a considerar que en las fórmulas propuestas este efecto se encuentra implícito en ellas, representando los casos tenidos en cuenta en su deducción, pero que pueden no ser representativos de otros casos particulares. Esto puede explicar la diferencia encontrada entre estimaciones y observaciones presentadas en este trabajo.

6. Comentarios y Conclusiones Finales.

- Cuando no hay disipación de energía dentro de la cubeta, su forma prácticamente no tiene incidencia en la magnitud de la socavación, por lo cual su diseño puede quedar condicionado por otros factores.
- Para un mismo valor del caudal unitario, evacuado a través de las compuertas de una barrera móvil, la socavación es mayor cuando se opera una sola compuerta que cuando se operan todas simultáneamente.
- En el caso de barreras del tipo de las de Polcura y Maule, las fórmulas de Wu y Ahmad son las más aconsejables de utilizar para efectuar estimaciones preliminares de socavación.
- De acuerdo a este resultado, el diámetro del sedimento del lecho no tendría incidencia en el fenómeno, cuando se trata de barreras como las ya indicadas.
- En estructuras tipo salto de esquí, lo limitado de los antecedentes experimentales expuestos, no permiten establecer conclusiones muy claras. Sólo es posible indicar que las tendencias de las estimaciones son similares en ambos modelos.
- La fórmula más concordante con las mediciones en Colbún es la Ivanissevich, no indicando esto que sea la única aceptable, ya que hay evidencia en la literatura que sus resultados tienden a exagerar la magnitud de la socavación.
- Es conveniente, al efectuar estimaciones preliminares de la socavación producida aguas abajo de estructuras de evacuación, considerar las fórmulas cuya deducción se fundamenta en situaciones parecidas o asimilables a las del estudio en cuestión.
- Por último es necesario tener presente que el efecto de las corrientes de retorno en la socavación, sólo puede ser determinado a través de estudios en modelo.

7. Referencias Bibliográficas.

- Ahmad, N. (1953). "Mechanisms of Erosion Below Hydraulic Works". Proceedings International Hydraulics Convention, Minnesota, U.S.A.
- Castro, N y Pinilla, L. (1962). "Socavación al pié de la napa libre de una barrera de Vertedero". Memoria para optar al título de Ing. Civil. U. de Chile.
- Chividini, M., Lopardo, R., Vernet, G. y Angelaccio, C. (1983). "Evaluación de la Socavación máxima aguas abajo de Aliviaderos en salto de esquí". X Congreso Nacional de Aguas, Córdoba, Argentina.
- Ivanissevich, L. (1980). "Fórmulas para Calcular o Límite da Erosao em Leitos Rochosos ou Granulares". XIII Seminario Nacional de Grandes Barragens, Río de Janeiro, Brasil.
- Jaeger, C. (1954). "Hydraulique Technique". Editorial Dunod - Francia.
- Martins, R. (1975). Scouring of Rocky Riverbeds by free-jet spillways" Water Power and Dam Construction.
- Simons, D. y Senturk, F. (1977). "Sediment Transport Technology". Water Resources Publications. Fort Collins, Colorado, U.S.A.
- Valentin, F. (1967). "Considerations Concerning Scour in the case of flow under gates". XII Congreso de la IAHR, Vol. 3, Fort Collins, U.S.A.
- Vernet, G. (1983). "Erosión Local a Pie de Presa". Curso Latinoamericano sobre Comportamiento Hidráulico de Grandes Presas. Buenos Aires, Argentina.
- Veronese, A. (1937). "Erosión di Fondo a Valli di uno Scarico". Annali dei Lavori Publicci - Italia.
- Wu, Ch. (1973) "Scour at Downstream End of Dams in Taiwan". International Symposium on River Mechanics. Bangkok, Tailandia.

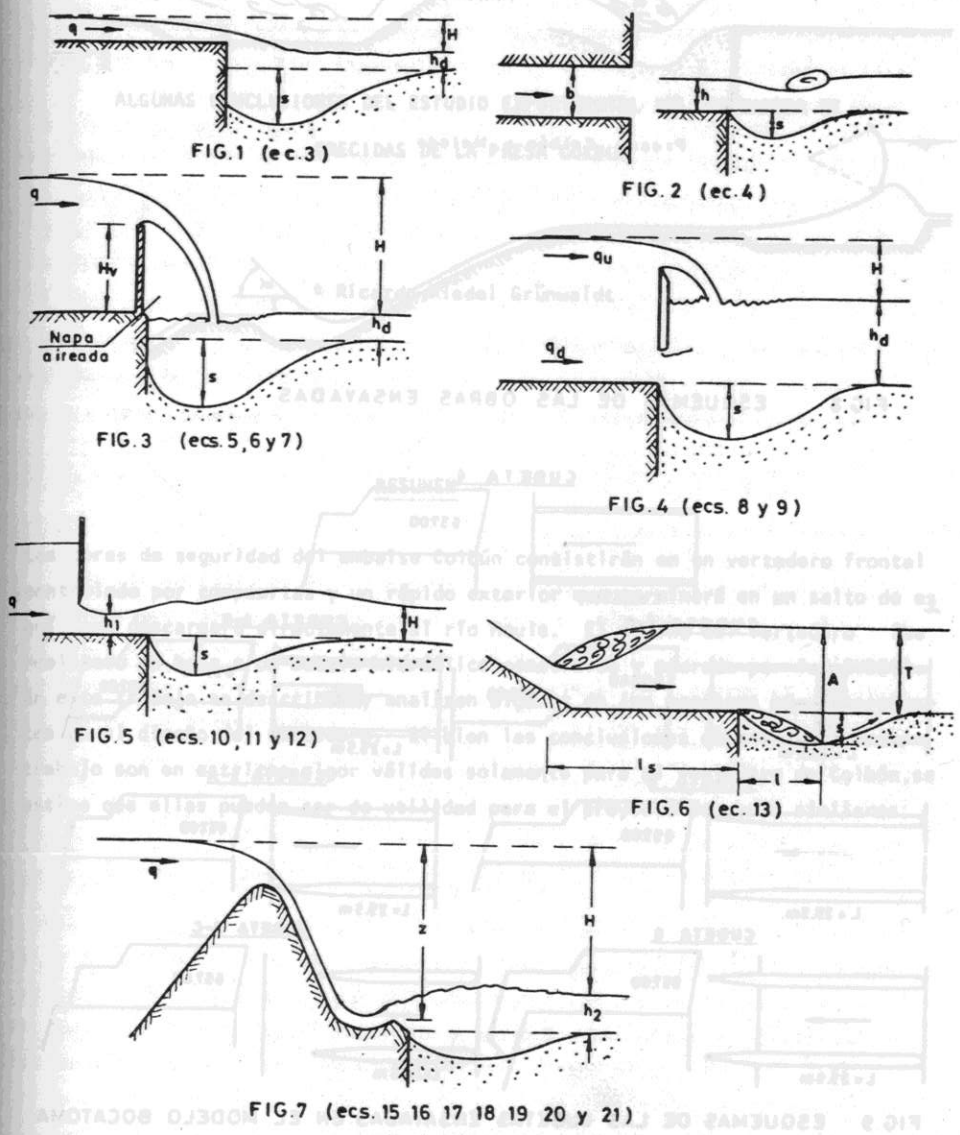

FIG.1 (ec.3)

FIG.2 (ec.4)

FIG.3 (ecs.5,6 y 7)

FIG.4 (ecs. 8 y 9)

FIG.5 (ecs. 10, 11 y 12)

FIG.6 (ec. 13)

FIG.7 (ecs. 15 16 17 18 19 20 y 21)

FIGURAS 1 A 7 ESQUEMAS DE LAS OBRAS Y DEFINICION DE LAS VARIABLES

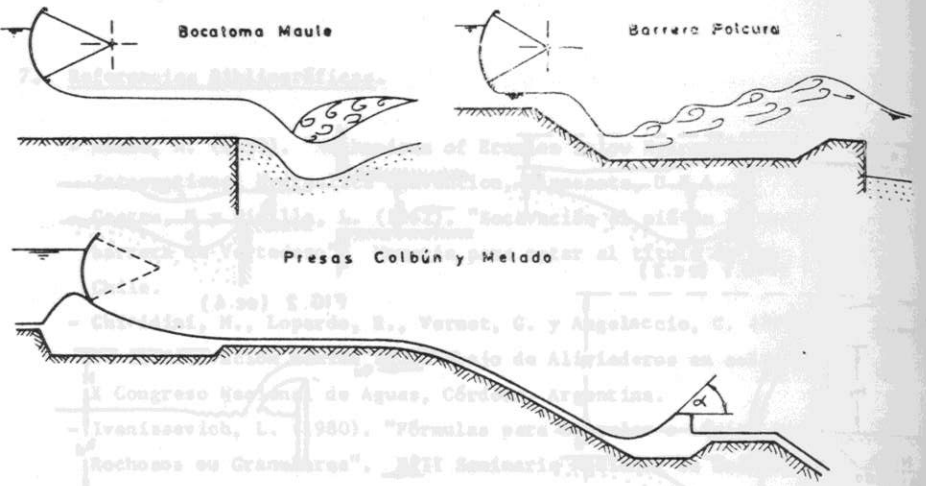

FIG.8 ESQUEMAS DE LAS OBRAS ENSAYADAS

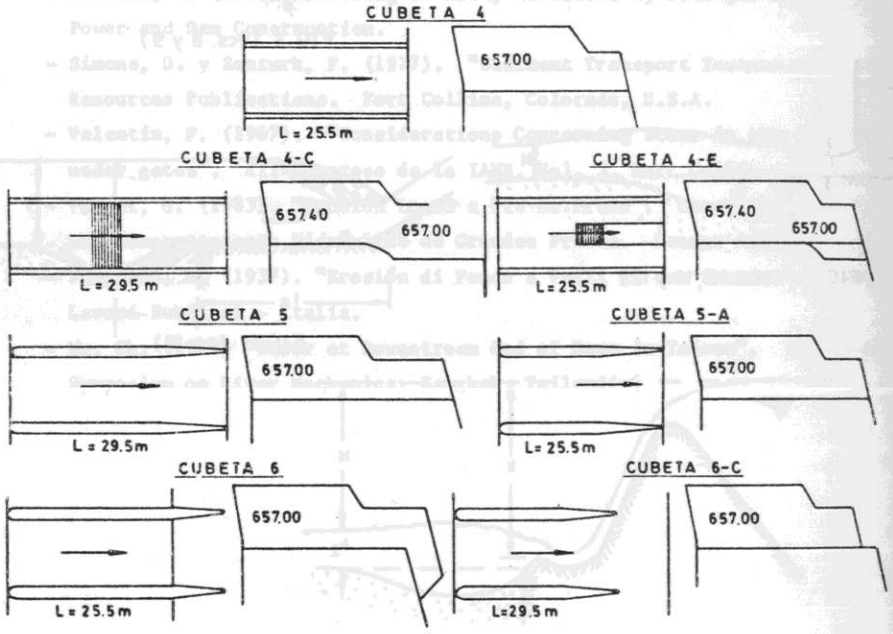

FIG.9 ESQUEMAS DE LAS CUBETAS ENSAYADAS EN EL MODELO BOCATOMA MAULE

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA

VI CONGRESO NACIONAL

ALGUNAS CONCLUSIONES DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL EVACUADOR DE CRECIDAS DE LA PRESA COLBUN

* Ricardo Riedel Grünwaldt

RESUMEN

Las obras de seguridad del embalse Colbún consistirán en un vertedero frontal controlado por compuertas y un rápido exterior que terminará en un salto de esquí, que descargará directamente al río Maule. El diseño del vertedero fue realizado en base a un modelo hidráulico construído y operado por la ENDESA. En este trabajo se describen y analizan algunos de los aspectos más interesantes en el diseño del vertedero. Si bien las conclusiones obtenidas en este trabajo son en estricto rigor válidas solamente para el vertedero de Colbún, se estima que ellas pueden ser de utilidad para el proyecto de obras similares.

* Ingeniero Civil EMPRESA NACIONAL DE ELECTRICIDAD S.A.
Profesor Centrales de Generación - U.Católica de Chile