

En la bibliografía técnica disponible es difícil encontrar alguna referencia en lo que respecta a la influencia del ángulo de incidencia de la corriente líquida sobre el tamaño del enrocado de protección de un talud.

El autor presentó al III Coloquio de la Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica un estudio (1) comparativo de las fórmulas relativas al cálculo del tamaño del enrocado que protege un talud sometido a un flujo tangencial.

Con motivo del proyecto de la Protección del Patio de Alta Tensión de la Central Antuco, la Empresa Nacional de Electricidad (ENDESA) contrató al Instituto Nacional de Hidráulica un modelo que permitiera visualizar la bondad de las relaciones usadas para el cálculo del tamaño de los enrocados de protección. En la experimentación realizada se abordó el caso en que la corriente incide en un cierto ángulo sobre el talud.

En el presente trabajo se pretende solamente mostrar los resultados de la experimentación, que aunque limitados, pueden dar a los proyectistas ciertas luces respecto al problema.

2. FÓRMULA PARA UNA CORRIENTE QUE ACTUA TANGENCIALMENTE SOBRE EL ENROCADO

En el trabajo de la referencia (1) se propuso usar la que se llamó fórmula de Lopardo - Estellé para determinar el tamaño del enrocado de protección de un talud. Esta relación:

$$F_G = 1,3 \left(\frac{h}{d} \right)^{1/6} \sqrt[4]{1 - \frac{\sin^2 \theta}{\sin^2 \phi}}$$

es válida para un escurrimiento con turbulencia normal y cuyo flujo es tangencial al talud de protección. La condición del enrocado así calculado será la que corresponde a una inestabilidad neta y no a la situación de ruptu

ra. Además es necesario tener en cuenta que se ha considerado un factor de seguridad de manera de dejar todas las experiencias por el lado de la seguridad con respecto a los valores definidos por la fórmula.

Revisando los trabajos originales de Estellé (2) y Ramette (3) se puede ver que las experiencias se realizaron con los siguientes valores de h/d

$$\text{Estellé : } 17 < \frac{h}{d} < 67$$

$$\text{Ramette : } 9 < \frac{h}{d} < 20$$

esto significa que la fórmula propuesta sería, en estricto rigor, solamente válida para h/d comprendidos entre 9 y 67.

3. INFLUENCIA DEL ANGULO DE INCIDENCIA

3.1 ESTUDIO EN MODELO

3.1.1 Descripción del modelo

Para implementar el modelo se aprovechó la Mesa de Arena que el Instituto Nacional de Hidráulica tiene en su Laboratorio de Peñaflor.

Como puede observarse en el esquema, que se incluye en la Figura N°1, la instalación experimental definitiva consistió en:

- Sistema de alimentación. Compuesto de un conjunto de motobombas que suministraban un caudal de hasta 150 lt/seg. El caudal se controlaba con un vertedero aforador rectangular de pared delgada que entregaba a una zona de tranquilización.
- Canal de aproximación: El agua se conducía hacia la zona protegida mediante un canal rectangular revestido (ancho basal 1,0 m).

2.78 Zona protegida. Inmediatamente aguas abajo del canal de aproximación se encontraba la zona protegida. Esta parte tenía la posibilidad de variar su ángulo (en planta), con respecto al canal de aproximación, entre 0° y 60°.

- Canal de entrega. El agua se devolvía al sistema de alimentación mediante un canal rectangular que entregaban a la sentina, cerrando el circuito hidráulico.

3.1.2 Características de la protección

El anteproyecto de la protección permitió definirla con las siguientes características:

	ZONA 1 (1)	ZONA 2 (2)
Material	enrocado de cantera	enrocado de cantera
Peso crítico	1.000 kg	500 kg
Diámetro equivalente	0,90 m	0,70 m
Espesor enrocados	2 capas	2 capas
Talud	3/1 (H/V)	3/1 (H/V)
Filtro: diámetro	0,35 ÷ 0,45 m	0,20 ÷ 0,35 m
espesor	0,60 m	0,45 m

Para reproducir en el modelo estas características se eligió una escala 1:40, de lo que resultó un material de protección con las siguientes características:

- piedras chancadas con un peso específico igual a 2.580 kg/m³ y con los siguientes diámetros característicos

	(1)	(2)
d 50 (cm)	2,47	1,62
d m (cm)	2,50	1,65
d 90 (cm)	2,78	1,84

este material cumplía la condición de forma tal que la relación entre la dimensión mayor y la menor fuese inferior a 3. 2.79

el ángulo de reposo bajo agua varía entre 28° y 32° (Ramette midió en sus experiencias un ángulo igual a 33°).

el material del filtro se reprodujo también a escala geométrica (1:40) y se pintó de color rojo para facilitar su visualización.

En la Figura H°2 se muestra un detalle del corte transversal por la zona protegida.

3.1.3 Método experimental

Para una mayor facilidad se dividieron las experiencias en dos tipos, cualitativas y cuantitativas.

Experiencias cualitativas. Para una determinada protección y para un cierto ángulo de incidencia (0°, 15°, 30°, y 60°) se aumentaba paulatinamente el caudal. Cada cierto intervalo se controlaba caudal y altura de escurrimiento. De esta manera se determinaban las características del escurrimiento que provocaban la destrucción de la protección y la zona donde ella se producía.

Experiencias cuantitativas. Primeramente se procedía a efectuar mediciones sistemáticas en condiciones del escurrimiento alejadas de la ruptura, luego se efectuaba la experiencia de ruptura con una altura del escurrimiento aproximadamente 1 cm menor que la que había provocado anteriormente la falla.

En ambas condiciones se procedía a medir lo siguiente:

- eje hidráulico por el eje y por ambos costados.
- medida de distribución de velocidades (con tubo de Pitot) sobre el enroca do en la sección donde se había detectado la falla (4 verticales).

Se definió como condición de ruptura cuando en algún punto de la protección se detectaba desplazamiento de ambas capas del enrocado y la consecuente aparición del filtro.

Una vez medidas las características del escurrimiento para la experiencia inmediatamente antes de la ruptura, se procedía a aumentar el caudal hasta provocar la falla. De esta manera se verificaba lo determinado en la experiencia cualitativa.

3.2 ANALISIS DE LOS DATOS EXPERIMENTALES

Se realizaron en total 8 experiencias en las cuales se logró la ruptura de la protección.

Puesto que en condiciones estrictamente de ruptura no es posible medir las características del escurrimiento, para el análisis de los resultados se ha considerado como condición de ruptura aquella en que la altura de agua en la sección de ruptura es aproximadamente 1 cm menor que la medida para la condición de falla.

Con el objeto de tener una idea de la influencia del ángulo de incidencia, se ha dibujado el gráfico de la Figura N°3; en él se muestran las relaciones de Lopardo-Estellé y de Stevens y Simons ($S = 1,0$ y $S = 0,6$) y los puntos obtenidos de las experiencias.

A la ruptura conviene recordar que según Stevens y Simons, se define el factor de seguridad S , de la partícula, contra la rotación como: la razón de los momentos que impiden la salida de ella del talud, contra los momentos que tratan de sacarla.

Cabe hacer notar que:

- a medida que aumenta el ángulo de incidencia del escurrimiento, el fenómeno se hace más complejo y por lo tanto, más difícil de ser representado

por condiciones medias del escurrimiento.

- para calcular el número de Froude del grano (F_G) se ha considerado la velocidad media de la zona con enrocados y no la velocidad media total.

4. CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta las limitaciones que plantea el hecho de pretender obtener conclusiones generales de un estudio particular y parcial, se piensa que en todo caso es interesante poder mostrar, de acuerdo con la Figura N°3:

- que la velocidad de ruptura, para taludes con flujo tangencial ($\alpha = 0$), es del orden de 1,5 veces la velocidad obtenida con la fórmula de Lopardo-Estellé para h/d semejantes a 5.
- que el ángulo de incidencia tiene un efecto desfavorable sobre las protecciones de taludes con enrocados.

5. NOTACIONES

d = diámetro de partículas uniforme

d_m = diámetro medio del material

d_{50} = diámetro 50%

F_G = número de Froude de la partícula

$$F_G = \frac{V}{\sqrt{\frac{Y_S - Y}{Y} g d}}$$

g = aceleración de gravedad

h = profundidad del escurrimiento

S = factor de seguridad

V = velocidad media del escurrimiento

2.82 α = ángulo de incidencia del escurrimiento

ϕ = ángulo de reposo del material

θ = ángulo del talud con respecto a la horizontal

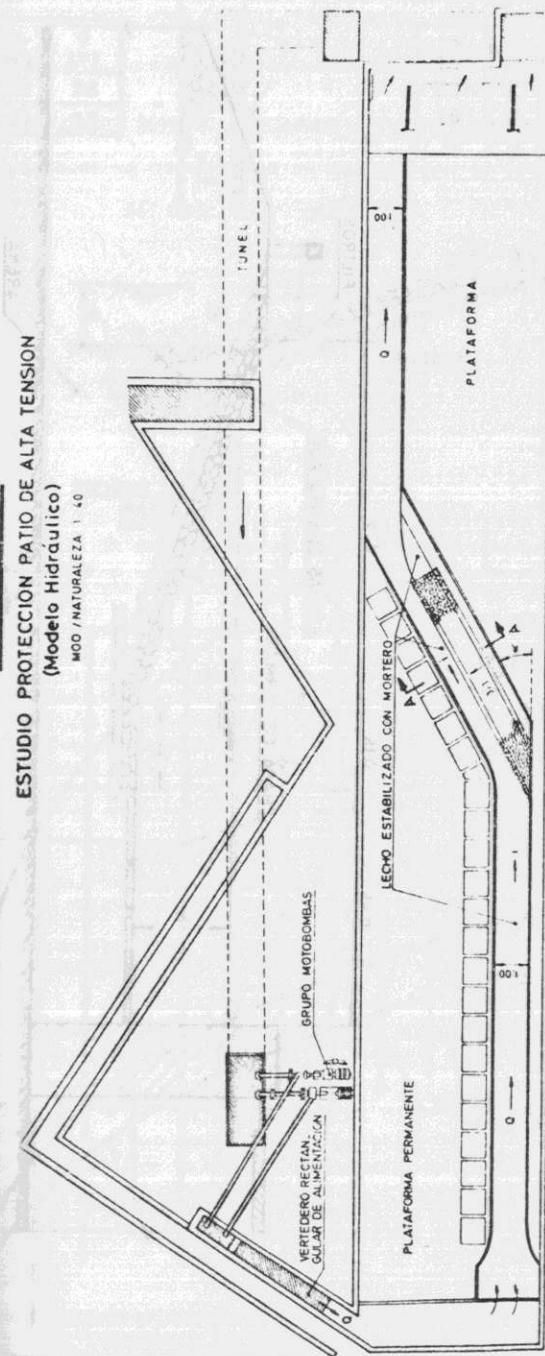
γ = peso específico del fluido

γ_s = peso específico de las partículas

6. REFERENCIAS

1. "Protección de Taludes con Enrocados" - Lincoln Alvarado - III Coloquio Nacional de Ingeniería Hidráulica - Santiago 1977.
2. "Protección de Taludes con Enrocados" Luis Estellé - VII Congreso Latinoamericano de Hidráulica - Santiago 1976.
3. "Protection de Talud au Moyen d'Enrochements" - M. Rametté ! Electricité de France, Bulletin du C.R.E.C. N°3, 1963.

CENTRAL ANTUCO
ESTUDIO PROTECCION PATIO DE ALTA TENSION
(Modelo Hidráulico)
MOD / NATURALIZA 1 40



CORTE FIGURA N° 1

CORTE A-A
ESC. 1:40

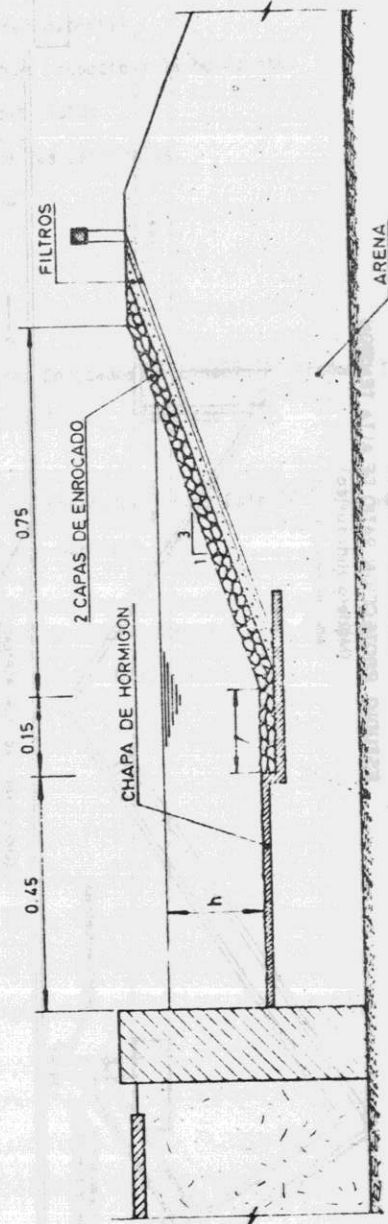
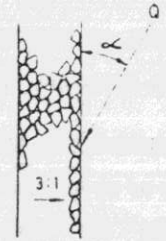


FIGURA N° 2
ZONA CONSOLIDADA
CON BARNIZ MARINO

	d_{50} (cm)	ϕ (°)
1	1.62	28
2	2.47	32



α	1	2
60°	○	●
30°	□	■
15°	△	▲
0°	▽	▼

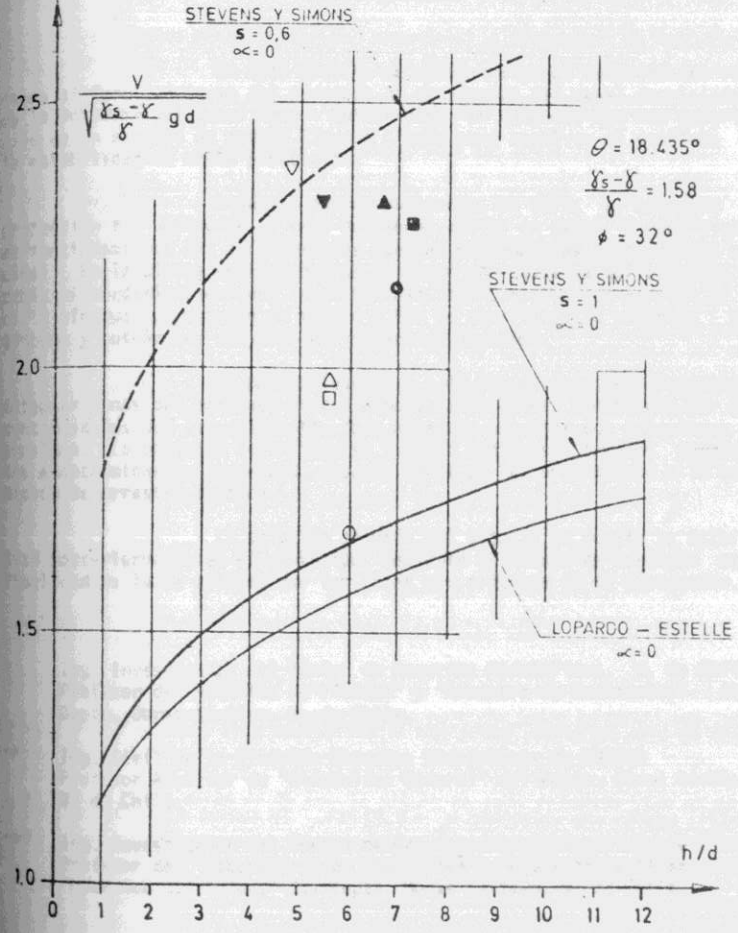
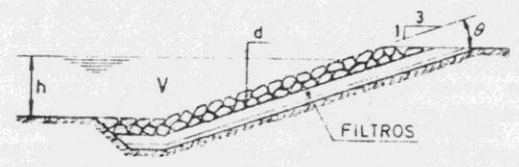


FIGURA N° 3