SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA

IX CONGRESO NACIONAL

EFICIENCIA HIDRAULICA DE UN ROMPEOLAS RANURADO DE PARED DELGADA

JAVIER VASQUEZ ALVAREZ

RESUMEN

La eficiencia hidráulica de un rompeolas poroso depende de sus coeficientes de transmisión, reflexión y de disipación de energía. En el presente trabajo se han estudiado estos tres coeficientes para un caso sencillo de rompeolas poroso; una pared vertical delgada con una abertura sumergida. Del análisis dimensional se establece que la eficiencia hidráulica es función de tres parámetros: porosidad, esbeltez de la ola, y profundidad relativa. Ensayos en un modelo físico permitieron estudiar el efecto de estos tres parámetros, concluyéndose que el principal de ellos es la porosidad. La evidencia empírica permitió evaluar la aplicabilidad de modelos teóricos propuestos por otros autores y hacer una recomendación para evaluar la eficiencia hidráulica de este tipo de estructura.

Ingeniero Civil MSc (Eng)

Instituto Nacional de Hidráulica

1.- INTRODUCCION

El problema de abrigar un área con respecto a la energía del oleaje es frecuente en proyectos de Ingeniería Civil Marítima. Cuando no se cuenta con una protección natural, se recurre a estructuras artificiales conocidas como rompeolas. De acuerdo con su permeabilidad respecto al oleaje incidente, éstos pueden clasificarse como permeables e impermeables. En la fig.1 se presentan algunos ejemplos, y en particular el relacionado con este trabajo: el rompeolas de pared delgada, vertical y ranurada. El diseño de rompeolas, y en particular de este tipo, exige el conocimiento de su eficiencia hidráulica, es decir, su capacidad de transmitir, reflejar y disipar la energía del oleaje incidente, en función tanto del tipo de estructura como de las características del oleaje incidente. Con el objeto de estudiar el efecto de las distintas variables y verificar la aplicabilidad de las metodologías de análisis existentes, se ensayó, en un canal de olas, un rompeolas simplificado consistente en una pared vertical delgada con una abertura sumergida.

2.- DESCRIPCION DEL PROBLEMA

El análisis se centra en el aspecto hidráulico. Los problemas estructurales y sedimentológicos no se han considerado. El estudio de este tipo de rompeolas exige definir dos grupos de variables: configuración de la estructura y oleaje incidente. Definidas estas variables, la eficiencia hidráulica quedará determinada cuando dos de los siguentes coeficientes sean evaluados:

Coeficiente de Transmisión (Kt): Se define como el cuociente entre la altura del oleaje transmitido y la altura del oleaje incidente.

Coeficiente de Reflección (Kr): Se define como el cuociente entre la altura del oleaje reflejado y la altura del oleaje incidente.

Coeficiente de Disipación de Energía (Ke): Se define como el cuociente entre la energía disipada y la energía del oleaje incidente.

En la fig.2, se presenta un esquema del rompeolas en estudio con las variables de interés. En el lado abrigado, la transmisión genera un oleaje progresivo con igual distribución de frecuencia que el oleaje incidente pero de menor amplitud. El oleaje reflejado, de similares características que el transmitido pero viajando en sentido contrario, se encuentra con el oleaje incidente generándose un oleaje estacionario. La disipación de energía se debe principalmente a la turbulencia en la pantalla y a factores como el rompimiento de la ola y anulación de las velocidades orbitales.

3.- TEORIA DEL OLEAJE

La mecánica del oleaje se modela según la Teoría Lineal (TLO). Siguiendo la convención adoptada en la fig.2, se consideran los siguentes potenciales de velocidad:

$$\Phi i = g \frac{Hi}{2\sigma} \frac{\cosh(k(d+z))}{\cosh(kd)} \sin(kx-\sigma t)$$

$$\eta r = g \frac{Hr}{2\sigma} \frac{\cosh(k(d+z))}{\cosh(kd)} \sin(kx+\sigma t+\delta r)$$

$$\eta t = g \frac{Ht}{2\sigma} \frac{\cosh(k(d+z))}{\cosh(kd)} \sin(kx-\sigma t+\delta t)$$

$$\eta s = \eta i - \eta r$$

La ecuación de dispersión estará dada por:

$$\sigma^2 = g\ k \tanh(kd)$$

Las desnivelaciones de la superficie del agua, velocidades, aceleraciones, presiones, trayectorias orbitales estarán también dadas por la TLO.

4.- BALANCE DE ENERGIA

Según la TLO el valor medio de la densidad de energia del oleaje esta dado por:

$$E = \rho g \frac{H^2}{8} \qquad (1)$$

Por lo que la potencia media en un periodo de ola será:

$$P = Cg\ E$$

Cuando el tren de olas alcanza al rompeolas permeable se puede establecer el siguente balance de energia:

$$Pi = Pr + Pt + Pe$$

Asumiendo en la vecindad del rompeolas un fondo suave y que δr y δt son pequeños:

$$Cgi = Cgr = Cgt$$

con lo que se obtiene la ecuación del balance de energia que relaciona los tres coeficientes en estudio:

$$Ke = 1 - Kr^2 - Kt^2 \qquad (2)$$

5.- ANALISIS DIMENSIONAL

El análisis fisico permite establecer que los coeficientes que definen la eficiencia hidráulica dependen de las siguentes variables.

$$Kr, Kt, Ke = fn\ (Hi, T, d, h, g, \rho, \nu)$$

La agitación por oleaje y su interferencia con un rompeolas permeable puede asumirse como una condición completamente turbulenta con dominancia gravitacional. Se tiene entonces:

$$Kr, Ke, Kt = fn\ (Hi, T, d, h, g)$$

Con cinco variables y dos dimensiones se pueden generar, según el teorema de Buckingham, tres parámetros adimensionales. Por conveniencia se escogieron:

Porosidad : h/d

Profundidad relativa : d/Lo

Esbeltez de la ola : H/Lo

Finalmente:

$$Kr, Kt, Ke = fn\ (h/d\ ,\ d/Lo\ ,\ H/Lo)$$

6.- ENSAYOS EN LABORATORIO

Los ensayos se llevaron a cabo en un canal de olas

vidriado de 17 m de longitud y 0.30 x 0.30 m de sección. En un extremo del canal se instaló un generador de oleaje monocromático y en el otro una playa disipadora de oleaje. El rompeolas de pantalla ranurada fué instalado en un punto intermedio. Las desnivelaciones de la superficie de agua se midieron usando sondas resistivas. Se realizaron un total de 63 experiencias con las condiciones que a continuación se detallan.

$$0.065 \leq d/Lo \leq 0.356$$

$$0.007 \leq Hi/Lo \leq 0.066$$

$$0.13 \leq h/d \leq 0.90$$

En la fig.3 se presentan algunos resultados típicos.

7.- EFECTO DE LOS PARAMETROS

La porosidad es el parámetro que tiene una mayor incidencia (figs. 3a y 3b). Como era de esperar, los coeficientes Kr y Kt aumentan y disminuyen respectivamente al disminuir la porosidad y viceversa. El coeficiente de disipación no sigue la misma tendencia, alcanzando un máximo (≤ 50%) para distintas condiciones de porosidad y oleaje. En la fig. 3c puede apreciarse que la influencia de la esbeltez de la ola no puede despreciarse. Pese a la dispersión (la profundidad relativa no es constante) se observa que frente a un incremento de la esbeltez, los coeficientes de reflexión y transmisión aumentan y disminuyen respectivamente. Tendencias similares se observaron para el parámetro de la profundidad relativa (fig. 3d).

8.- RELACION ENTRE LOS COEFICIENTES Kr, Kt y Ke

En la fig.4 se han agrupado la totalidad de los valores obtenidos para distintas condiciones, lo que explica la dispersión observada. Junto a estos valores se han incluido las siguentes ecuaciones:

$Kr = 1 - Kt$ Sawaragi et al. (1970), Hattori (1972)

$Kr^2 = 1 - Kt^2$ Kakuno (1983)

Se observa que ésta última ecuación no presenta una buena correlación con los resultados de los ensayos. El balance de energía (ec.2) muestra que la expresión propuesta por Kakuno supone que no existe pérdida de energía. La evidencia empírica muestra que éste no es un supuesto realista. Correlacionando los valores de modelo, por mínimos cuadrados, se obtuvo la siguente expresión:

$$Kr = 1 - Kt^{1.61} \qquad (3)$$

ecuación que se incluye en la fig.4, y que permite, en conjunto con la ec.(2), establecer la funcionalidad entre Ke y Kr ó Kt.

9.- REVISION DE ALGUNAS METODOLOGIAS

Se verificaron las metodologías propuestas por: Sawaragi e Iwata (1970), Hattori (1972), Hartmann (1969), Hayashi et al (1968), Kakuno (1983) y Wiegel (1960 y 1961). Otras proposiciones pueden revisarse en las publicaciones por K. Hagiwara (1984), Terret et al (1968) y H. Kondo (1979).

La principal dificultad en establecer teóricamente una metodología radica en el tratamiento de la disipación de energía. Con excepción del trabajo de Wiegel, en general se ha recurrido a dos criterios: asumir que la pérdida de energía es proporcional a la altura de velocidad en la ec. de Bernoulli, ó suponer la validez de la ecuación linealizada de Morison. Ambos métodos tienen la dificultad de la calibración de los coeficientes de descarga a traves de las ranuras y los coeficientes de arrastre e inercia, respectivamente.

Se pudo, además, verificar que estos coeficientes no sólo dependen de las caracteristicas del rompeolas sino tambien de la esbeltez de la ola y la profundidad relativa. Se concluyó que su uso se limita a condiciones y estructuras similares a las usadas por los autores, no siendo posible su generalización.

10.- METODOS PROPUESTOS POR WIEGEL (1960, 1961)

En su excelente libro publicado en 1960, el autor desarrolló una expresión para el coeficiente de transmisión, a partir de la llamada Teoria de Transmisión de Potencia (TTP). Esta supone que la potencia transmitida a través de la ranura de una pantalla, es equivalente a la transmitida a través de ella cuando la pantalla no está presente. Asumiendo la TLO, la potencia media por periodo y unidad de frente de ola incidente está dada por:

$$Pi = 1/T \int_0^T \int_{-d}^{0} [\, p + \rho g z + 1/2\,(u^2+w^2)\,]\, u\, dz\, dt$$

$$Pi = \rho g\, C \frac{Hi^2}{16} \left(\frac{2kd + \sinh 2kd}{\sinh 2kd} \right)$$

En forma análoga, para una ranura de fondo con altura h, integrando entre -d y -d+h se obtiene:

$$Pt = \rho g\, C \frac{Hi^2}{16} \left(\frac{2kh + \sinh 2kh}{\sinh 2kd} \right)$$

Por otra parte, como la energía es proporcional al cuadrado de la altura del oleaje (ec.4.1):

$$Pi / Pt = (\, Hi / Ht\,)^2 \qquad \text{luego:} \qquad Kt = (Pi / Pt\,)^{1/2}$$

con lo que se obtiene la ecuación para el coeficiente de transmisión:

$$Kt = \left(\frac{2kh + \sinh 2kh}{2kd + \sinh 2kd} \right)^{1/2} \qquad (4)$$

Wiegel verificó esta fórmula con ensayos en modelo encontrando en general una buena concordancia y detectando también la disminución de Kt al aumentar la esbeltez de la ola. Posteriormente, en 1961, del estudio de un rompeolas en base a pilotes, el autor propuso la siguente fórmula, función solo de la porosidad.

$$Kt = (\, m\,)^{1/2} \qquad (5)$$

La principal ventaja de ambos métodos es la ausencia de coeficientes que requieran ser calibrados. Respecto a los coeficientes de reflexión y disipación de energía, Wiegel no hace referencia. En la fig. 5 se comparan ambos métodos con la evidencia empirica obtenida en el presente trabajo. Los

coeficientes de reflexión se han calculado por medio de la ec.(3). Se aprecia que para valores bajos de Hi/Lo la ec.(5) tiene una mejor correlación con los valores medidos en el modelo que la ec.(4). Para valores altos de Hi/Lo rige lo contrario.

11.- CONCLUSIONES

i) El análisis dimensional y la evidencia empírica muestran que la eficiencia hidráulica de este tipo de rompeolas depende de tres parámetros adimensionales; porosidad, esbeltez de la ola y profundidad relativa.

ii) En su gran mayoría, los métodos teóricos propuestos en la literatura pierden generalidad y aplicabilidad, al requerir de la calibración de sus parámetros en modelo.

iii) Para valores altos de esbeltez de ola, el método propuesto por Wiegel (1960) presentó una buena correlación con la evidencia empírica. Los valores bajos del mismo parámetro, fueron mejor representados por la fórmula de Wiegel (1961).

iv) Para estimar la eficiencia hidráulica de este tipo de rompeolas se propone, en espera de nuevos desarrollos, la siguente metodología:

$$Kr = 1 - Kt^{4.61}$$

$$Ke = 1 - Kt^2 - Kt^2$$

$$Kt = \begin{cases} (m)^{1/2} & Hi/Lo < 0.024 \\ \left(\dfrac{2kh + \sinh 2kh}{2kd + \sinh 2kd}\right)^{1/2} & Hi/Lo \geq 0.024 \end{cases}$$

v) El método puede extenderse para una distribución arbitraria de ranuras horizontales aplicando la TTP a cada ranura. Se establece

que en el presente estudio, no se ensayó este tipo de estructura.

vi) Los ensayos y teoría demuestran que la transmisión disminuye al aumentar la esbeltez de la ola, es decir, en términos de abrigo, este tipo de rompeolas es más eficiente en estados de mar de bajo período (T < 5 seg). Esta característica los hace particularmente adecuados para condiciones de fetch limitado con dominancia de viento local; bahías, estuarios o lagos.

vii) Pese a que la metodología planteada tiene una base teórico-empírica, en proyectos de envergadura su uso debe limitarse al análisis preliminar. En la optimización del diseño se recomienda recurrir a ensayos en modelo.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

GRUNE J.;KOHLHASE S. (1974). "Wave transmission through vertical slotted walls". 14th Coastal Eng. Conf. ASCE, Vol. III.

HAGIWARA K. (1984). "Analysis of upright structure for wave dissipation using integral equation". 19th Coastal Eng. Conf. ASCE, Vol. III.

HATTORI M. (1972). "Transmission of water waves through perforated wall". Coastal Eng. in Japan, Vol. XV.

HAYASHI T.; HATTORI M. ET AL. (1968). "Closely spaced pile breakwater as a protection structure against beach erosion". Coastal Eng. in Japan, Vol. XI.

KAKUNO S. (1983). "Reflection and transmission of waves through vertical slit-type structures". Proceedings of Coastal Structures '83, ASCE.

KONDO H. (1979). "Analysis of breakwater having two porous walls". Coastal Structures 79, ASCE, Vol. II.

SAWARAGI T.; IWATA K. (1970). "Effect of structural shape on wave run-up and wave damping". Coastal Eng. in Japan, Vol. XIII.

TERRET F.T.; OSORIO J.D.C.; LEAN G.H. (1968). "Model studies of a perforated breakwater". 11th Conf. of Coastal Eng. ASCE, Part 3.

VASQUEZ J. (1987). "Hydraulic performance of a slotted vertical wall breakwater". MSc (Eng) Thesis, University of Liverpool, U.K.

WIEGEL R.L. (1960). "Oceanographical Engineering", Chapter six.

WIEGEL R.L. (1961). "Closely spaced piles as a breakwater". Dock and Harbour Authority. September 1961.

NOTACION

C : Celeridad de la ola.
Cg: Celeridad del grupo de olas.
d : Profundidad.
E : Energía de la ola.
g : Aceleración de gravedad.
H : Altura de ola.
k : Número de ola ($2\pi/L$).
K : Coeficiente.
L : Longitud de ola.
Lo: Longitud de ola en aguas profundas ($gT/2\pi$).
n : Porosidad.
p : Presión.
P : Potencia de la ola.
T : Periodo de la ola.
t : Tiempo.
u : Velocidad orbital en la dirección x.
w : Velocidad orbital en la dirección z.
x : Coordenada horizontal.
z : Coordenada vertical.
δ : Desfase de ola.
ν : Viscocidad cinemática.
ρ : Masa específica del agua.
σ : Frecuencia angular ($2\pi/T$).
Φ : Potencial de velocidad.

Subíndices:

e : Disipación de energía.
i : Valor de ola incidente.
r : Valor de ola reflejada.
s : Valor de ola estacionaria.
t : Valor de ola transmitida.

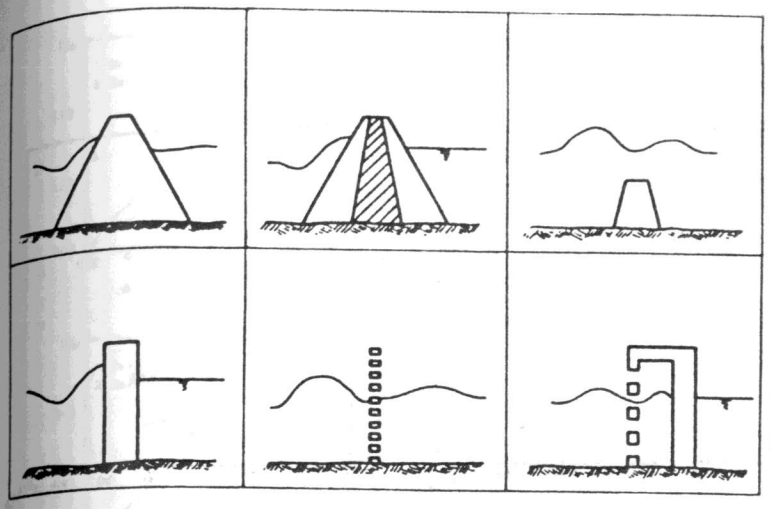

FIG. 1.- Tipos de rompeolas

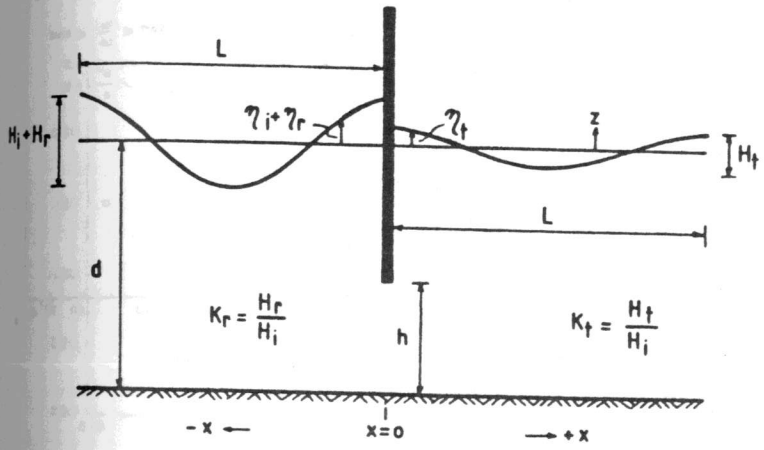

FIG. 2.- Pantalla con una ranura sumergida

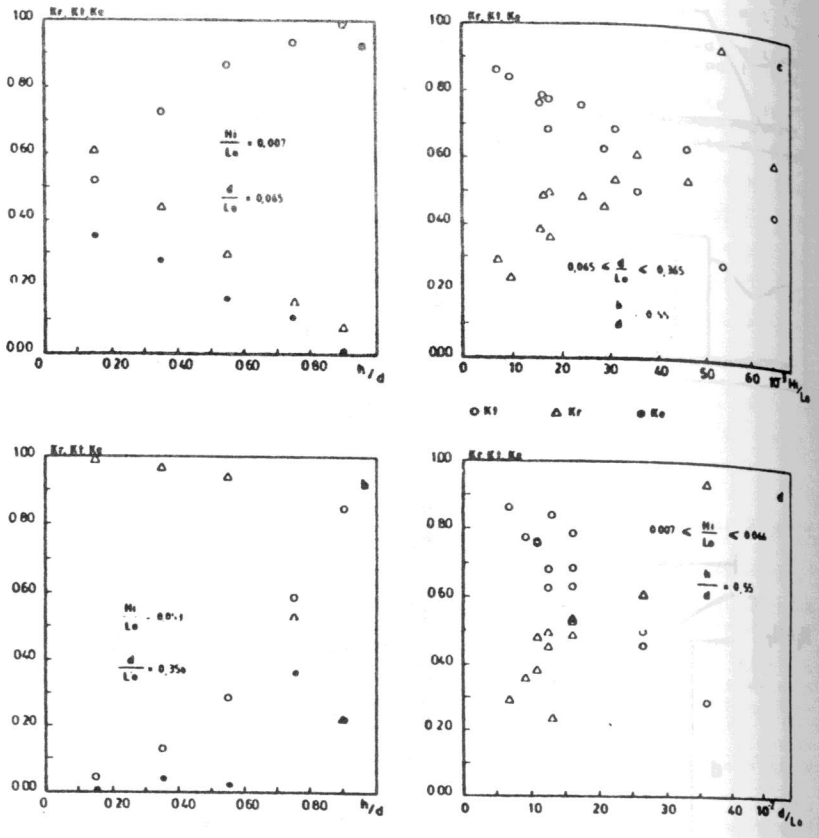

FIG. 3 - Valores típicos medidos en modelo

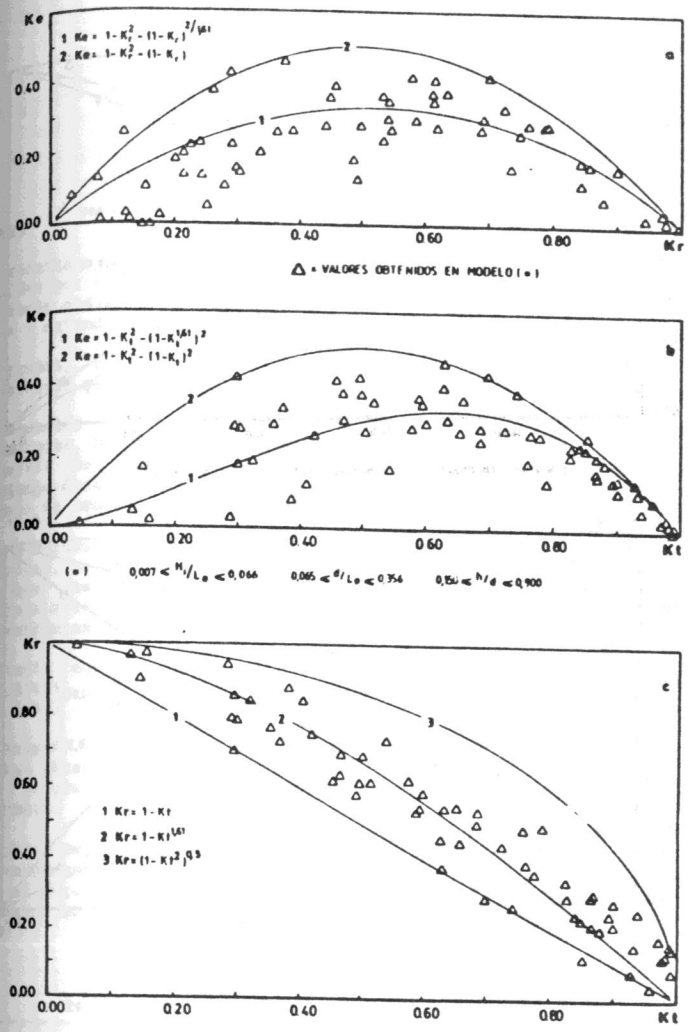

FIG. 4 - Relación entre los coeficientes Ke, Kr, y Kt

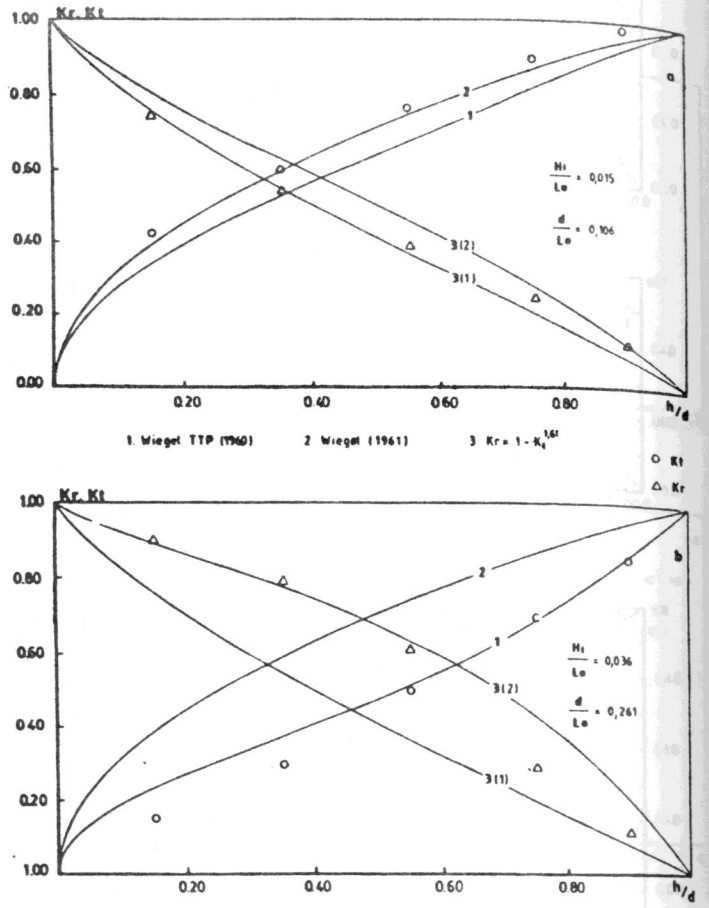

Fig. 5.- Modelos teóricos y resultados experimentales

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA

IX CONGRESO NACIONAL

PERFILES DE EQUILIBRIO EN LECHOS DE GRANULOMETRIA GRUESA Y EXTENDIDA EN REGIMEN TORRENCIAL

SOLANO VEGA VISCHI*

RESUMEN

Se presentan las ecuaciones que determinan los perfiles de equilibrio definidos por cotas iniciales y finales de cada tramo de un sector en equilibrio sedimentológico en régimen de torrente en lecho de granulometría gruesa y extendida.

Los tramos, caracterizados por su anchura, se suponen confinados lateralmente por paredes rígidas, de modo de mantener una planta constante.

Se demuestra que para un caudal y una secuencia de tramos de anchos determinados, hay una relación unívoca para cotas y pendientes en cada tramo. El perfil de equilibrio base del lecho se produce para los caudales de suficiente duración (crecidas de deshielo), de modo de dar tiempo a los procesos de acorazamiento.

Para crecidas de frecuencias muy bajas, y de corta duración (crecidas pluviales), se producen nuevos perfiles de equilibrio a cotas más altas o más bajas que las de equilibrio precedente, dependiendo que los tramos tengan tendencia a rellenarse o socavarse, según condiciones de tipo hidráulico que se ilustran en este trabajo.

El estudio aquí presentado, corresponde al caso conjugado en régimen de río (VEGA,1988), que ha recibido confirmación en mediciones en río Maipo. (VEGA,1989)

Los tramos cuyos anchos aumentan progresivamente hacia aguas abajo, se rellenan durante crecidas de baja frecuencia y corta duración, volviendo a su perfil original o a otro de cota mayor al escurrir nuevas crecidas de mayor frecuencia.

Los tramos cuyos anchos disminuyen progresivamente hacia aguas abajo, se socavan durante crecidas de muy baja frecuencia, y quedan a un nivel aún menor al escurrrir crecidas de mayor frecuencia. Este proceso termina al alcanzarse secciones en roca o estructuras permanentes aguas abajo.

* Ingeniero Civil- SOLANO VEGA Y ASOCS. INGENIEROS CONSULTORES