

Análisis comparativo de modelos 1D para el cálculo de la línea de saturación en presas de escollera sometidas a flujo a través del propio cuerpo de la presa

JUAN CARLOS LÓPEZ VERDEJO (*), MIGUEL ÁNGEL TOLEDO (**) Y CRISTÓBAL MATEOS (***)

RESUMEN El flujo de agua a través de presas de escollera ha sido analizado usando modelos unidimensionales con el objeto de obtener la línea de saturación. Para ello se han utilizado varias fórmulas de resistencia no lineal dadas por distintos autores. Las desviaciones de estas líneas de su valor medio oscilan en un rango entre +9% y -5%. Por otra parte las líneas de saturación obtenidas experimentalmente están un 10 a 15% por encima de esta línea teórica media, lo cual puede ser debido, entre otros factores, a la precisión en la medida de la porosidad, que es un parámetro muy sensible, o al efecto pared. Se están realizando nuevos ensayos con el objeto de obtener unas conclusiones definitivas y adecuadamente fundamentadas.

COMPARATIVE ANALYSIS OF 1D MODELS FOR COMPUTING THE PHREATIC LINE IN A ROCKFILL DAM SUBJECTED TO THROUGHFLOW

ABSTRACT *The flow of water through a rockfill dam model has been analysed using a 1D model in order to obtain the phreatic line according to various resistance formulae given by various authors. The deviations of these lines from their mean value range between +9% and -5%. On the other hand, measured phreatic lines are 10-15% above this mean theoretical line, which could be due, among other factors, to the measurement of porosity as a sensitive parameter, or to the wall effect. More tests are being performed in order to obtain clear conclusions.*

Palabras clave: Sobrevuerto, Filtración, Escollera.

1. INTRODUCCIÓN

El presente artículo describe parte de la investigación llevada a cabo en el Laboratorio de Hidráulica del Departamento de Hidráulica y Energética de la E.T.S. de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Madrid. El principal objetivo de esta investigación es comparar los resultados de los diferentes modelos 1D para el cálculo de la línea de saturación de una presa de escollera sometida a flujo a través del propio cuerpo de presa. Estos modelos están basados en la aplicación de la hidráulica de canales abiertos. Las fórmulas que han sido analizadas son las siguientes: S.Ergun (1952) [1], J.K. Wilkins (1956) [2], J.A. McCorquodale et al., (1978) [3], D. Stephenson (1979) [4], Martins (1990) [5], 1991 [6], y Gent (1991) [7]. Estas líneas de saturación teóricas han sido comparadas con los resultados obtenidos experimentalmente en laboratorio.

(*) Ingeniero de Caminos, Candidato a T.D.

(**) Profesor de Ingeniería Hidráulica. Universidad Politécnica de Madrid.

(***) Dr. Ingeniero de Caminos. CEDEX.

2. MATERIALES Y METODOLOGÍA

2.1. INSTALACIONES

Los ensayos fueron llevados a cabo en el Laboratorio de Hidráulica de la ETS de Ingenieros de Caminos de la UPM. El canal usado es de vidrio y tiene 30 cm de anchura y 40 centímetros de altura, con alimentación desde un depósito de nivel constante y con sistema de recirculación del agua.

2.2. SISTEMA DE MEDIDAS

El caudal se ha medido mediante un vertedero de pared delgada instalado al comienzo de cada canal. Los niveles aguas arriba y aguas abajo se midieron mediante un limnómetro y con una cinta métrica sobre la pared de vidrio del canal. Sobre esta pared transparente se dibujó a lo largo del cuerpo de presa una malla de 2x2 cm para observar y medir la línea de saturación, incluyendo los puntos inicial y final en los taludes.

Se ha utilizado una cámara de vídeo digital para registrar los acontecimientos más notables durante la ejecución de los ensayos.

2.3. PROCEDIMIENTO DE LOS ENSAYOS

El modelo reducido de presa fue construido con 30 cm de altura y 10 cm de anchura de coronación. Los taludes fueron

ANÁLISIS COMPARATIVO DE MODELOS 1D PARA EL CÁLCULO DE LA LINEA DE SATURACIÓN EN PRESAS DE ESCOLLERA SOMETIDAS A FLUJO A TRAVÉS DEL PROPIO CUERPO DE LA PRESA

de 1V:1.5H aguas arriba y de 1V:2H aguas abajo. El material fue colocado en capas sin compactar. Se aseguró que el talud de aguas abajo presentara una superficie suave y nivelada. Para evitar que el material se moviera, se dispuso una malla de acero sobre el talud de aguas abajo.

Las pruebas fueron llevadas a cabo por escalones de caudal, con incrementos de 0.5 l/s. Cuando se estabilizaba el nivel de aguas arriba, se procedía a realizar las medidas sobre la malla dibujada sobre el cristal. El origen de coordenadas se situó en el pie de aguas arriba del talud.

2.4. MATERIALES.

Las características del medio poroso obtenidas experimentalmente fueron (para notación ver el próximo apartado):

- n = 0.39
- d = 0.81 cm
- R = 0.12 cm
- Cu = 1.8
- C = 0.56 (partículas angulares)
- K = 4 (escollera)

3. RESULTADOS

Antes de describir los resultados de las pruebas, exponemos las fórmulas e hipótesis utilizadas. En la Tabla 1 se muestran las relaciones entre *i* (gradiente hidráulico) y *V* (velocidad de filtración) dadas por varios autores. Los parámetros incluidos son:

- n : Porosidad
- $\nu = 10^{-6} \frac{m^2}{s}$: Viscosidad cinemática
- d : Diámetro característico, que coincide con D_{50} . (m)

$R = \frac{27.7 \cdot e}{\frac{\gamma_{part}}{\gamma_w} \cdot A_{ms}}$: Radio hidráulico medio en pulgadas, donde

$e = \frac{n}{1-n}$ es el índice de huecos,

$\gamma_{part} = 2.65 \frac{t}{m^3}$: es el peso específico de los materiales, y

$A_{ms} \left(\frac{in^2}{lb} \right)$ es la superficie específica, obtenida usando la relación con D_{50} establecida por Wilkins.

Cu : Coeficiente de uniformidad.

C : Coeficiente dado por Martins. Para estos ensayos se ha tomado igual a 0.56, que se corresponde con las partículas angulares. (Para partículas redondeadas, C=0.75).

K : Coeficiente dado por Stephenson. Para escollera, K=4.

V : Velocidad media de filtración (m/s).

g : Aceleración de la gravedad (m/s²).

Se admite que el gradiente hidráulico en el punto de emergencia del talud de aguas abajo es igual a la pendiente del talud, de acuerdo con Parkin [8] las fórmulas de resistencia son:

$V = \tan \theta \cdot a^{\frac{1}{N}}$	(Power relationship)
$\tan \theta = r \cdot V + s \cdot V^2$	(Quadratic relationship)

Donde:

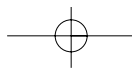
V : Velocidad de filtración media (m/s).

a : Coeficiente de la fórmula exponencial $i = a \cdot V^N$

r,s : Coeficientes de la fórmula cuadrática.

Author Auteur	Equatio Expression
Ergun (1952)	$i = 150 \frac{(1-n)^2 \nu}{gn^3 d^2} V + 1.75 \frac{(1-n)}{dgn^3} V^2$
McCorquodale et al., (1978)	$i = \frac{70\nu}{gnR^2} V + \frac{0.81}{gn^{1/2}R} V^2$
Wilkins (1956)	$i = \frac{0.0465V^{1.85}}{R^{0.925}n^{1.85}}$
Martins (1990, 1991)	$i = \frac{V^2(1-n)}{dgn^3} \cdot \left(\frac{C_u}{C} \right)^{0.26}$
Gent (1991)	$i = 1207.06 \frac{(1-n)^2 \nu}{gn^3 d^2} V + 1.209 \frac{(1-n)}{dgn^3} V^2$
Stephenson (1979)	$i = \frac{800\nu}{d^2 gn} V + \frac{k}{dgn^2} V^2$

TABLA 1. Fórmulas de resistencia no lineal.



ANÁLISIS COMPARATIVO DE MODELOS 1D PARA EL CÁLCULO DE LA LÍNEA DE SATURACIÓN EN PRESAS DE ESCOLLERA SOMETIDAS A FLUJO A TRAVÉS DEL PROPIO CUERPO DE LA PRESA

N : Exponente de la fórmula exponencial.
 θ : Ángulo del talud con respecto a la horizontal.

Basado en la hidráulica de canales abiertos, la línea de saturación puede ser obtenida por iteración resolviendo la siguiente ecuación:

$$y_1 + \frac{V_{V1}^2}{2g} - h = y_2 + \frac{V_{V2}^2}{2g}$$

Donde:

y₁, y₂: Calado en las secciones 1 y 2

V_v : Velocidad en los huecos : V_v=V/n

h : Pérdida de carga entre las secciones 1 y 2.

x : Distancia entre las secciones 1 y 2.

El valor de h se toma como h=x.i_m, donde i_m=(i₁+i₂)/2 es el gradiente medio.

Las Fig. 1 a 4 muestran los resultados de los ensayos, la primera con el caudal más bajo (0.54 l/s) y la última, la Fig. 4, con el caudal más alto (1.19 l/s). En estas figuras la línea medida es la indicada como M, y la media teórica es la indicada como T. Todas las medidas se expresan en cm.

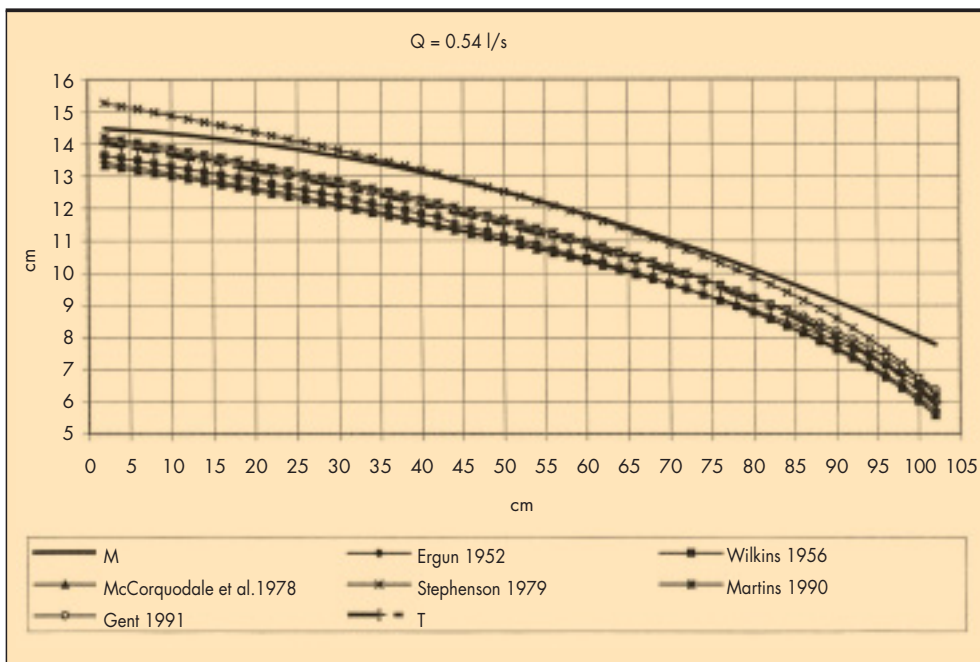


FIGURA 1.

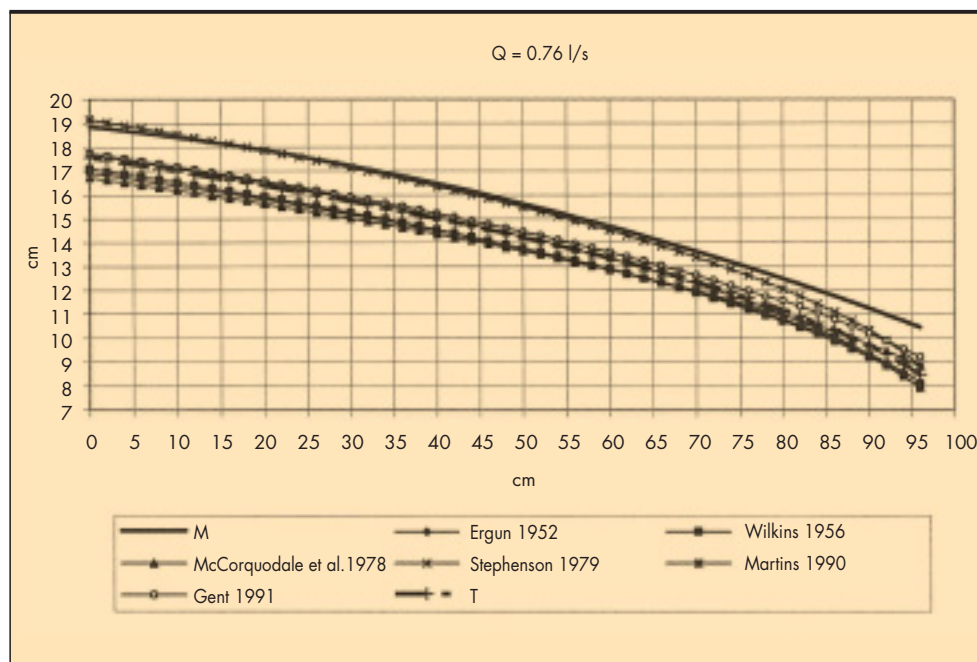
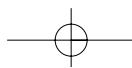
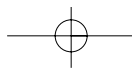


FIGURA 2.





ANÁLISIS COMPARATIVO DE MODELOS 1D PARA EL CÁLCULO DE LA LINEA DE SATURACIÓN EN PRESAS DE ESCOLLERA SOMETIDAS A FLUJO A TRAVÉS DEL PROPIO CUERPO DE LA PRESA

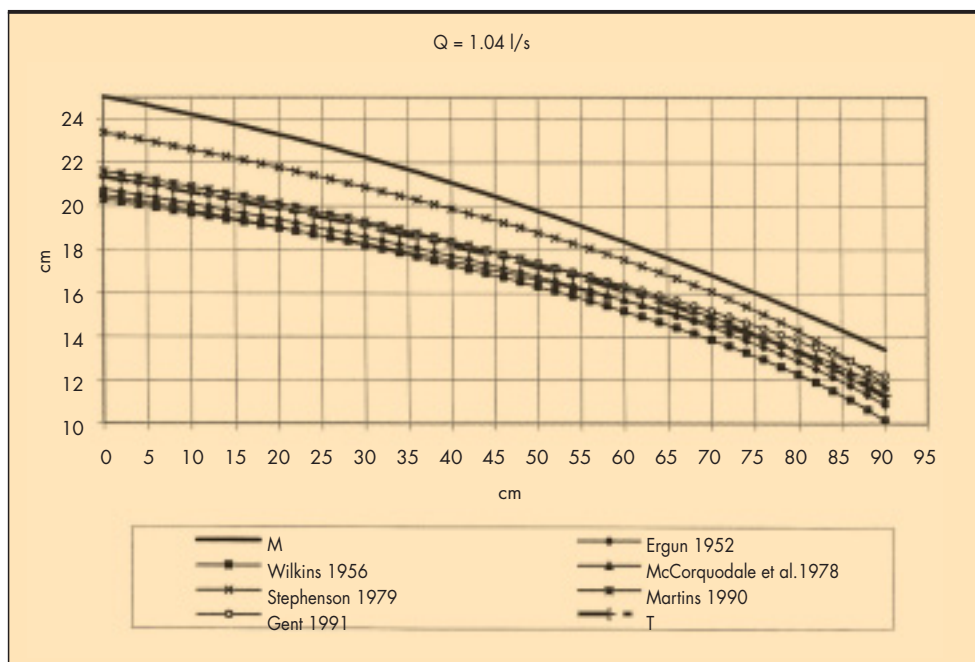


FIGURA 3.

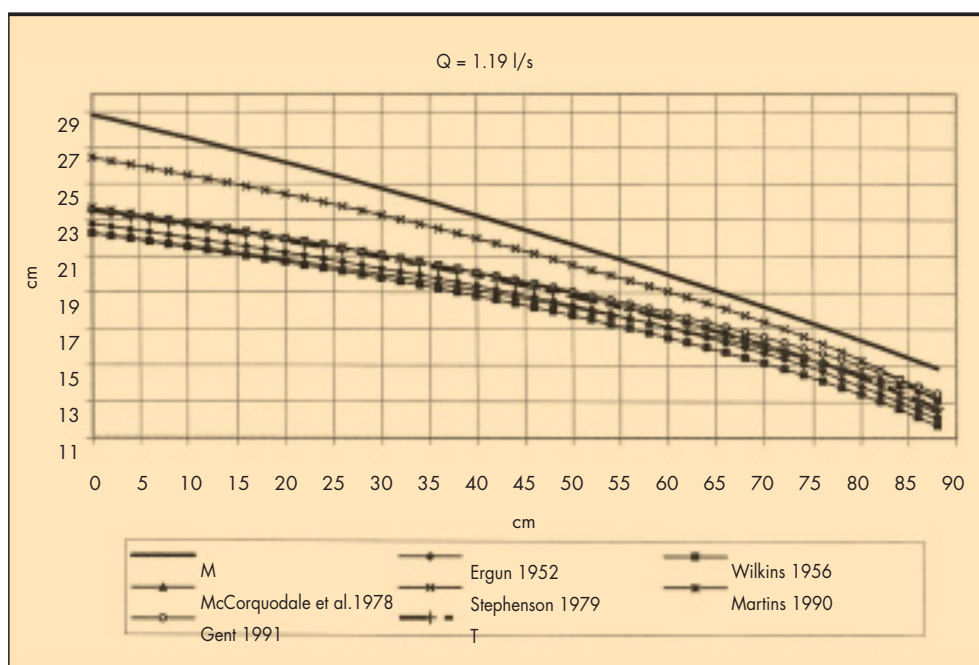
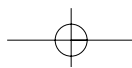


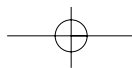
FIGURA 4.

4. CONCLUSIONES

A partir de los principios de la hidráulica de canales abiertos y utilizando la hipótesis de Parkin para el cálculo del punto de emergencia al talud de aguas abajo, se han obtenido las líneas de saturación correspondient a cada fórmula de resistencia no lineal de la Tabla 1. En las Fig. 1 a 4 pueden verse las posiciones relativas de las líneas teóricas, la media de las mismas, y la obtenida experimentalmente mediante ensayo en laboratorio. Las líneas más bajas, muy próximas entre sí, son las dadas por Ergun (1952), Wilkins (1956) y McCorquodale (1978). La línea más alta es siempre la de Stephenson. Las líneas de

saturación proporcionadas por Martins (1990) y Gent (1991) quedan bastante próximas, situándose en una zona intermedia. Con las pruebas realizadas hasta ahora (D_{50} aproximadamente 1 cm, granulometría uniforme y piedra machacada), las líneas medidas se acercan más a la línea teórica dada por Stephenson, especialmente para caudales bajos (Fig. 1 y 2). Para caudales elevados (Fig. 3 y 4), las líneas de saturación obtenidas experimentalmente se sitúan por encima de la de Stephenson. Estas variaciones podrían tener su origen, entre otros factores, en la precisión de la medida de la porosidad y en el efecto pared, aspectos que deben ser investigados en pró-




ANÁLISIS COMPARATIVO DE MODELOS 1D PARA EL CÁLCULO DE LA LÍNEA DE SATURACIÓN EN PRESAS DE ESCOLLERA SOMETIDAS A FLUJO A TRAVÉS DEL PROPIO CUERPO DE LA PRESA

Q (l/s)	Ergun	Wilkins	McCorquodale	Stephenson	Martins	Gent	Measured
0.54	-4.0%	-3.4%	-3.5%	8.4%	1.2%	1.3%	9.9%
0.76	-3.5%	-3.5%	-3.3%	8.4%	-0.5%	2.2%	10.7%
1.04	-2.7%	-5.6%	-2.7%	8.7%	0.8%	1.6%	15.8%
1.19	-3.0%	-5.8%	-2.8%	9.6%	0.4%	1.7%	16.9%

TABLA 2. Desviaciones de las líneas teórica y medida respecto del valor teórico medio.

ximos ensayos. Las variaciones pueden ser debidas además a la adopción de la hipótesis de Parkin. Un análisis de sensibilidad de los diferentes parámetros revela la importancia del valor de la porosidad. Por ejemplo: un valor de $n=0.35$ en vez de $n=0.39$, que fue obtenido experimentalmente, hace que la curva medida se aproxime a las líneas teóricas.

La Tabla 2 muestra las desviaciones de las líneas teóricas y medida en laboratorio frente al valor teórico medio.

Se deberá realizar un número mayor de ensayos para obtener las conclusiones finales.

5. AGRADECIMIENTOS

Este proyecto de investigación está financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia de España dentro del Plan Nacional I+D (Referencia BIA-2003-09631-C02-02).

Los autores quieren también agradecer a la Sra. Concepción García Viñuela, Directora de la biblioteca de la ETS de Ingenieros de Caminos de la UPM, así como a sus colaboradores, el valioso apoyo recibido.

6. BIBLIOGRAFÍA

[1] LI, GARGA, V.K.; DAVIES, M.H., "Relationships for Non-Darcy flow in rockfill". J. Hydr. Engrg., ASCE, 124, 206-212, (1998).

[2] WILDINS, J.K., "Flow of water through rockfill and its application to the design of dams". Proc., 2nd Australia-New Zealand Conf. On Soil Mech. And Foundation Engrg., Auckland, New Zealand, 144-149, (1956).

[3] MCCORQUODALE, J.A.; HANNOURA, A.A.; NASSER M.S.; "Hydraulic conductivity of rockfill". J. Hydr. Res.; Delft, The Netherlands, 16 (2), 123-137, (1978).

[4] STEPHENSON, D., "Rockfill in hydraulic engineering". Elsevier Science Publishers BV (North-Holland), Amsterdam, The Netherlands, 19-24, (1979).

[5] MARTINS, R., "Turbulent seepage flow through rockfill structures". Water Power and Dam Construction, 40 (3), 41-45, (1990).

[6] MARTINS, R., "Seepage flow through rockfill dams". Seventeenth Congress on Large Dams, Vienna 1991; Q. 67-R. 14, (1991).

[7] GENT, R.M.A. VAN, "Formulae to describe porous flow", Communications on Hydr. And Geotech. Engrg., ISSN 0169-6548 No. 92-2, Delft Univ. Of Technol. And MAST - G6S Rep., Project 1, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands, (1991).

[8] PARKIN, A.K., "Rockfill dams with inbuilt spillways", Part 1: Hydraulic Characteristic. Water Research Foundation of Australia, (1963).

Ingeniería Civil



Enviar a: Revista **Ingeniería Civil** (PUBLICACIONES)

Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas del CEDEX
c/ Alfonso XII, 3 • 28014 Madrid



Tarjeta de Suscripción

Un año **49€** con IVA incluido

CIF o DNI: _____ Nombre: _____

Apellidos: _____

Empresa: _____

Calle: _____ nº: _____

Población: _____ C.P.: _____

Provincia: _____ Telf.: _____ Fecha: _____

Firma: _____

Formas de Pago

A nombre del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX).

Cheque nominativo Giro Postal

Transferencia bancaria a la c/c nº 0182-2370-45-0200200574 de BBVA (c/ Alcalá, 16 - 6ª planta • 28014 Madrid)

NOTA IMPORTANTE: Los cambios de domicilio deben ser notificados con un mes de antelación.

