

XIV SEMINARIO NACIONAL  
DE HIDRAULICA E HIDROLOGIA

*MODELACIÓN HIDRÁULICA DE SOCAVACIÓN DE POZOS*

Autores: Jorge Alberto Naranjo Mesa y José Fernando Jiménez Mejía. Profesores del Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos. Facultad de Minas. Universidad Nacional, Medellín, Colombia

*RESUMEN*

Se definen números elasto-fluidos para modelar la socavación de pozos de impacto de chorros y se propone una modelación elasto-fluida para suelos cohesivos. Debido a las dificultades actuales de esta clase de modelación se utiliza un modelo más simple (Amanian y Urroz) para examinar la socavación de un pozo aguas abajo del embalse Porce II y la formación de una barra secuente.

*ABSTRACT*

In this paper a set of "elasto-fluid" dimensionless numbers are defined in order to model the scour process generated by jets on erodable beds. Also an "elasto-fluid" modeling is suggested for cohesive soils. Due to the difficulties of the scale modeling with these derived dimensionless numbers, a simpler scale model is used (Amanian and Urroz) to study the scour hole down the weir from Project Porce II, including the formation of the sequent bar.

## 1. BAJO PODER PREDICTIVO.

La modelación en laboratorio de los procesos de socavación de pozos en un lecho por impacto de chorro de agua, no alcanza todavía el poder de predicción que tiene, por ejemplo, la modelación de vertederos ó resaltos. No hay una teoría satisfactoria, general y relativamente simple, para dar cuenta de la interacción del chorro con el suelo, no hay todavía un acople seguro entre las variables hidrodinámicas, que proveen la energía de socavación, y las geológicas, que proveen las resistencias. Es obvio que en la descripción del proceso de fractura de una roca viva, pongamos por caso, no pueden aparecer como números moduladores solamente los de carácter hidrodinámico, Froude ó Reynolds, sino que deben aparecer otros de carácter elástico y algunos que combinan variables hidrodinámicas y elásticas. Imaginemos una roca a compresión debido a una presión de chorro. Debe deformarse en función de sus módulos de Young y de Poisson, y por simplicidad, debe deformarse una longitud unitaria  $\varepsilon$  tal que  $-p = E\varepsilon$ . Y fluirá a un cierto valor máximo de la deformación, digamos  $\varepsilon_p$ , en el que el material ó se fractura ó fluye. Entonces, puesto que la presión será de un orden  $\rho v^2$ , siendo  $v$  la velocidad de impacto del chorro y  $\rho$  la densidad del fluido, debe haber un cociente

$$\frac{-p}{E\varepsilon_p} = \frac{\rho}{E|\varepsilon_p|} \quad (1)$$

que regula la interacción. Esto es, un número de la forma

$$\frac{v}{\sqrt{\frac{E|\varepsilon_p|}{\rho}}} = N \quad (2)$$

Y para los esfuerzos cortantes debe haber un número semejante, con el esfuerzo  $\tau$  provisto por el fluido balanceado con la resistencia interna  $G\gamma$  del material, por lo menos hasta un cierto valor  $\gamma_p$  correspondiente a un límite plástico para la deformación angular. Debe haber un cociente

$$\frac{\tau}{G\gamma_p} \quad (3)$$

que regule la interacción. Con el esfuerzo cortante proporcional a  $\rho v^2$  otra vez, se puede producir un número

$$\frac{v}{\sqrt{\frac{G\gamma_p}{\rho}}} = T \quad (4)$$

Si  $N > 1$ , las energías de impacto vencen las de resistencia normal, y el manto se fractura ó fluye. Si  $T > 1$ , las fuerzas cortantes son capaces de “desprender” el material

Si el número normal  $N$  y el tangencial  $T$  son menores que la unidad, el lecho resiste. El pozo deja de profundizarse aproximadamente cuando  $N$  y  $T$  son la unidad. Nótese que el chorro pierde energía de impacto al ir penetrando a un pozo de mayor profundidad. Este análisis tosco permite de todas maneras formarse idea de la importancia de tomar en cuenta la modelación hidrogeológica del proceso.

Si  $N$  y  $T$  se usan como números de modelación, ya que las velocidades se modelan a escala froudeana, se tendrá que

$$N_M = \frac{v_M}{\sqrt{\frac{E_M \epsilon_{pM}}{\rho}}} = \frac{\lambda^{\frac{1}{2}} v_p}{\sqrt{\frac{E_M \epsilon_{pM}}{\rho}}} = \frac{v_p}{\sqrt{\frac{E_p \epsilon_{pP}}{\rho}}} = N_p$$

Y esto implica que los módulos  $E$  y los desplazamientos  $\epsilon$  deben modelarse bajo la relación de escala

$$\boxed{\frac{E_M \epsilon_{pM}}{E_p \epsilon_{pP}} = \lambda} \quad (5)$$

con  $\lambda$  la medida de escala geométrica! Un análisis semejante da como criterio para la modelación de las resistencias cortantes del suelo,

$$\boxed{\frac{G_M \gamma_{pM}}{G_p \gamma_{pP}} = \lambda} \quad (6)$$

Tal vez aquí se encuentre la clave para determinar la conveniente mezcla de cemento, arena y gravas con la que se modelaría un suelo sometido a impacto de un chorro... Un análisis más fino tomaría en cuenta el ángulo  $\beta$  de impacto del chorro sobre el piso, por una parte, y corregiría los indicadores de  $p$  y  $\tau_{ciz}$  con los convenientes coeficientes de impacto y de dragado. Esto no es lo importante, sino resaltar que sin chequear la correcta modelación de los parámetros elásticos parece muy dudoso poder aproximarse por un modelo a la situación hidrogeológica real. De allí posiblemente una de las causas del bajo poder predictivo de modelos de pozos de impacto.

La evaluación de las deformaciones plásticas límites puede ser complicada, pero como muchos de los materiales rocosos salen abruptamente de su límite elástico hacia la fractura, puede ser viable usar las deformaciones límites elásticas en lugar de las plásticas. También convendrá notar que el análisis previo no tomó en cuenta la razón de Poisson del material, pero no parece difícil hacerlo con ayuda de las leyes de Hooke.

## 2. UN PODER PREDICTIVO MENOS MALO.

La formación de pozos por impacto de chorros en suelos desagregados, sin cohesión notable, se ha venido modelando con mejor fortuna desde un punto de vista meramente hidráulico. Básicamente se trata de estudiar las fuerzas de arrastre y sustentación sobre partículas desagregadas, y la evaluación de esas fuerzas supone estudiar la mecánica del chorro, los vórtices que se forman en el interior del pozo ya formado, la creación de una barra de material a la salida del pozo y su efecto amortiguador sobre el impacto del chorro al ir subiendo el “colchón” de agua encima del pozo. La idea de una profunda socavación se debilita cuando se toma en cuenta lo alta que puede llegar a ser la barra formada aguas abajo, por efecto de la misma socavación.

Las partículas que simulan el movimiento de las rocas fracturadas no tienen por qué ser del mismo material cuya elasticidad se modeló para conservar la semejanza en la resistencia del lecho. Su tamaño se modela mediante dos criterios, uno froudeano, que asigna a las partículas un diámetro  $D_M = \lambda D_p$ , como es usual; y otro de origen viscoso, según el cual las fuerzas de sustentación y arrastre deben guardar con el peso de la masa arrastrada la misma proporción en prototipo y modelo. El cociente entre el peso de la partícula y la fuerza de dragado produce que los números

$$\frac{\rho' - \rho}{\rho} \frac{gR}{c_D v^2}$$

deben ser iguales en modelo y prototipo. Aquí  $c_D$  es el coeficiente de dragado,  $R$  el radio y  $\rho'$  la densidad de la partícula. Esta condición produce para la razón de radios de las partículas,

$$\frac{R_M}{R_p} = \frac{c_{DM}}{c_{DP}} \frac{v_M^2}{v_p^2} \frac{(\rho' - \rho)_p}{(\rho' - \rho)_M} \quad (7)$$

Y con  $c_D$  más o menos igual en prototipo y modelo, con las velocidades escaladas froudeanamente,

$$\frac{R_M}{R_p} \approx 1. \lambda \frac{(\rho' - \rho)_p}{(\rho' - \rho)_M}, \quad (8)$$

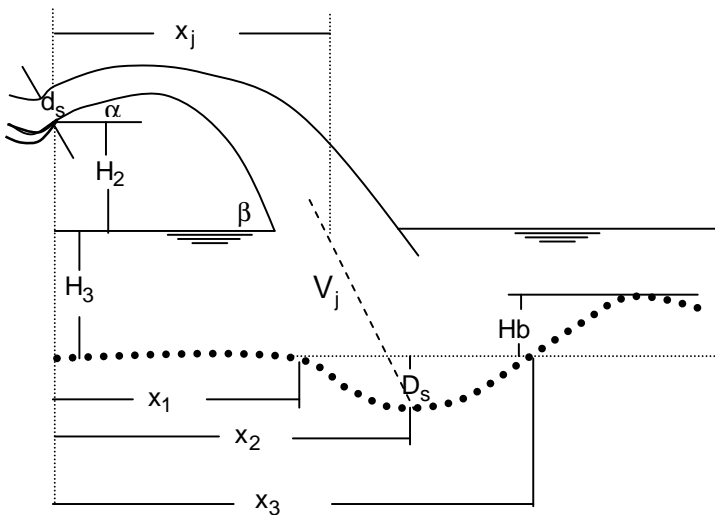
Si la partícula en el modelo tiene densidad  $\rho'_M$  igual a la de las movidas en el prototipo,  $\rho'_p$ , resulta que las razones de radios coinciden según los dos criterios. En general las razones son muy parecidas a la razón de la escala geométrica, siempre que las densidades sean parecidas en el material de modelo y prototipo.

Suponiendo un correcto escalamiento de las magnitudes involucradas, parece factible hacer ciertas predicciones acerca del tamaño y geometría del pozo y su barra secuente para material de lecho desagregado. Amanian y Urroz hicieron más de setenta experimentos en formación de pozos auto excavados, y pre-excavados, y las observaciones les permitieron

por medio de regresiones múltiples obtener expresiones que resisten el escalamiento froudeano de las variables y se mantienen invariables para modelo y prototipo. Con base en ello pudieron hacer prediseños de pozos, que preexcavaron, y que no se alteraron mayormente con la caída del chorro (cf Hydraulic Engineering 93, p. 857, fórmulas (1) a (9)). Con base en esas fórmulas se han hecho las primeras estimaciones para el pozo de sovación que creará el chorro vertido desde el embalse de Porce II.

### 3. DIMENSIONES ESTIMADAS DEL POZO DE IMPACTO.

En la figura se presenta el esquema de geometría de pozo y barra del que dan cuenta la técnica y las fórmulas de Amanian y Urroz. Se deben suministrar los datos de caudal por unidad de ancho ( $q_j$ ), espesor de manto del chorro al pasar sobre el labio del esquí ( $d_s$ ),



el ángulo  $\alpha$  de salida del esquí, la altura ( $H_2$ ) desde el labio hasta la superficie del "lago" bajo impacto, profundidad ( $H_3$ ) del "lago" hasta el suelo no deformado. Las fórmulas de Amanian-Urroz permiten evaluar el resto de las variables (para la velocidad de salida  $V_j$  del chorro se precisa el ancho  $w_b$  del vertedero). En la tabla siguiente se presentan los datos y estimativos para un modelo en escala 1:50 del chorro vertido en Porce II para un caudal máximo de  $6040 \text{ m}^3/\text{s}$  en prototipo. Los datos se entregan en unidades inglesas.

Escala 1:50. Diámetro de partículas:  $0.033'$  y  $0.0165'$ .  
 $H_3 + H_2 = 3.58'$ .  $\alpha = 20^\circ$  y  $\alpha = 40^\circ$   $q_j = 4.597 \text{ pie}^3 / \text{seg} / \text{pie}$ .  $d_s = 0.39'$ .  $w_b = 2.62'$ .

Con los valores anteriores se tantea para valores crecientes de  $H_2$ , hasta el momento en que la altura de la barra  $H_b$  es menor que la altura  $H_3$  del tirante del "lago". Un valor  $H_b > H_3$  supone que hay una presa -la barra- y que el nivel del agua no alcanza el punto de rebose, lo cual no tiene significado.

$D_{50} = 0.0165'$	0.0165'	0.033'	0.033'	Diámetro partícula
$\alpha = 20^\circ$	$40^\circ$	$20^\circ$	$40^\circ$	Angulo esquí
$H_2 = 0.88'$	0.28'	1.20'	0.78'	Altura sobre supef. libre
$H_3 = 2.70'$	3.30'	2.38'	2.80'	Tirante de lago
$V_j = 11.79$ pie/seg	11.79	11.79'	11.79'	Velocidad de chorro
$E_j = 3.23'$	2.63'	3.55'	3.13'	Energía de chorro
$x_j = 4.32'$	4.56'	4.71'	5.03'	Alcance de chorro
$\beta = 37.6^\circ$	$43.9^\circ$	$41.1^\circ$	$49.0^\circ$	Angulo de impacto
$D_s = 1.80'$	1.48'	1.75'	1.56'	Profundidad del pozo
$x_1 = 6.78'$	6.94'	6.90'	7.18'	Abcisa de inic pozo
$x_2 = 12.84'$	11.95'	12.13'	11.59'	Abcisa de Max Profund
$x_3 = 18.41$	17.30'	16.44'	15.75'	Abcisa de final pozo
$w_1' = 2.76'$	2.67'	2.81'	2.72'	Ancho pozo en $x_1$
$w_M = 8.53'$	7.46'	7.80'	7.17'	Ancho Máximo
$H_b = 2.70'$	3.23'	2.33'	2.77'	Altura de Barra
$B_b = 15.54'$	12.93'	13.13'	11.78'	Ancho de Barra

Se nota que el pozo es más profundo para  $\alpha=20^\circ$ , y la barra más alta para  $\alpha=40^\circ$ . Se propone diseñar el modelo con los valores máximos. El “ancho de barra” puede ser irreal para el caso que interesa, ya que no se tiene flujo bidimensional: hay un cañón, ó al menos un talud de roca sana, sobre el cual impacta el chorro. Los valores enmarcados dan una idea de las dimensiones necesarias, a escala 1:50 para modelar el pozo creado por el caudal máximo previsto para Porce II. Una inspección sobre los resultados muestra que bajo ángulo  $\alpha$  produce pozo profundo y barra no muy alta, mientras alto  $\alpha$  produce pozo más pando y barra más alta. La distancia de lo alto de la barra a lo profundo del pozo resulta del orden de 4.5 pies, es decir, en prototipo unos 67.5 m, pero el propio pozo no excedería unos 28 m de profundidad.

En esta escala resulta necesario modelar la topografía en una área de unos  $7 \times 4 \text{ m}^2$ , y en una profundidad de unos 3 m. Los volúmenes de grava llegarían a unos  $70 \text{ m}^3$ , casi 200 ton de peso. Y habida cuenta del no muy alto poder predictivo de esta clase de modelaciones, parece razonable ensayar una escala más pequeña, 1:100 por ejemplo, que divide los volúmenes por 8 y las áreas por 4 y las longitudes previas por 2. Los ahorros son significativos, en obra civil y en tiempo, y las facilidades de experimentación se multiplican. En la tabla siguiente se presentan los datos y estimativos para un modelo en escala 1:100 del pozo creado por el chorro que vertería Porce II bajo caudal máximo.

Escala 1:100,  $H_3 + H_2 = 1.8'$ .  $\alpha = 20^\circ$  y  $40^\circ$ ,  $q_j = 1.625 \text{ pie}^3/\text{seg}/\text{pie}$ .  
 $w_b = 1.32'$ .  $d_s = 0.197'$ . Diámetro de partículas:  $0.0165'$  y  $0.0083'$ .

$D_{50} = 0.0083'$	$0.0083'$	$0.0165'$	$0.0165'$	Diámetro partícula
$\alpha = 20^\circ$	$\alpha = 40^\circ$	$20^\circ$	$40^\circ$	Angulo esquí
$H_2 = 0.4'$	$0.1'$	$0.6'$	$0.4'$	Altura sobre superf. libre
$H_3 = 1.4'$	$1.7'$	$1.2'$	$1.4'$	Tirante de lago
$V_j = 8.25 \text{ pie}/\text{seg}$	$8.25'$	$8.25'$	$8.25'$	Velocidad de chorro
$E_j = 1.56'$	$1.26'$	$1.76'$	$1.56'$	Energía de chorro
$x_j = 2.08'$	$2.19'$	$2.32'$	$2.48'$	Alcance de chorro
$\beta = 36.84^\circ$	$42.9^\circ$	$41.37^\circ$	$49.3^\circ$	Angulo de impacto
$D_s = 0.85'$	$0.69'$	$0.87'$	$0.78'$	Profundidad del pozo
$x_1 = 3.36'$	$3.42'$	$3.44'$	$3.58'$	Abcisa de inic pozo
$x_2 = 6.33'$	$5.86'$	$6.02'$	$5.76'$	Abcisa de Max Profund
$x_3 = 9.02'$	$8.47'$	$8.15'$	$7.82'$	Abcisa de final pozo
$w_1' = 1.38'$	$1.34'$	$1.41'$	$1.37'$	Ancho pozo en $x_1$
$w_M = 4.09'$	$3.6'$	$3.88'$	$3.60'$	Ancho Máximo
$H_b = 1.34'$	$1.6'$	$1.17'$	$1.39'$	Altura de Barra
$B_b = 7.30'$	$6.11'$	$6.52'$	$5.90'$	Ancho de Barra

La suma  $H_b + D_s$  es ahora 2.2 pies aproximadamente, unos 66 m en el prototipo. La máxima profundidad  $D_s$  es de unos 0.87 pies, unos 26 m en el prototipo. Con modelar en escala 1:100 unos  $4 \times 2.5 \text{ m}^2$  de la topografía, en una profundidad no mucho mayor de 1 m, se cubrirá el estudio experimental del pozo creado hasta para el caudal máximo. Un  $\alpha$  bajo vuelve a producir un pozo hondo y barra baja; un  $\alpha$  alto produce lo contrario.

Un análisis semejante deberá hacerse para otros caudales, sobre todo los de bajo período de retorno, que son los que más labrarán el pozo. La solución buscada serían las envolventes de los valores encontrados. Este cálculo no se ha hecho todavía en forma sistemática y es imperativo hacerlo para mayor seguridad del diseño. Sin embargo unos tanteos preliminares indican que los estimativos previos cubren los casos de socavaciones a menor caudal...

En cambio de ello parece útil plantear el siguiente problema. La mecánica de formación del pozo indica que el equilibrio suelo-chorro se logra atenuando el impacto con la creación de un "lago" de profundidad  $H_3 + D_s$ , merced a un doble proceso: ahondamiento del pozo y elevación de la barra. A cada caudal correspondería un arreglo final dado. ¿Pero qué pasa si sobreviene un caudal nuevo sobre un pozo-barra ya formados para otro caudal? Hay una variable histórica de evolución del lecho bajo chorros anteriores, y nada asegura que antiguas configuraciones cederán sin resistencia para formar un pozo-barra a la medida del nuevo caudal: el pozo ya formado creará guías de flujo, focalizará energías de impacto del nuevo chorro, y no es probable que "borre" totalmente la antigua configuración... Si, por ejemplo, en el lugar de un lago creado bajo alto caudal incide luego el chorro de menor

caudal no es seguro que logre cavar su pozo con la energía disponible, ya que la antigua barra no tiene por qué desmoronarse ante menor caudal. Puede ser que el fondo del pozo se alargue un poco.... aguas arriba. Este conjunto de problemas indica la conveniencia de hacer modelaciones con historia de los cambios de caudal y de las evoluciones de deformación del lecho bajo esos cambios.