

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



**EROSION NULA Y EROSION CON COLCHON POCO
PROFUNDO CAUSADA POR CHORROS DE AGUA EN
LECHOS NO COHESIVOS**

INFORME DE SUFICIENCIA

Para Optar el Titulo Profesional de:

INGENIERO CIVIL

Alejandro Juan Villafranca Asca

LIMA – PERU

2005

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Julio Kuroiwa Zevallos por el asesoramiento y mejor disposición para el desarrollo de este tema de investigación.

A la Ing. Elsa Minaya Espinoza por brindarme la oportunidad de apoyarla en la etapa del desarrollo e investigación del modelo físico.

Alejandro J. Villafranca Asca

DEDICATORIA

Dedico este trabajo:

A mis padres, Natividad y Victoriano, quienes me transmitieron siempre sus enseñanzas, alentándome y apoyándome para desarrollarme como ser humano espiritual y profesional. Gracias

A mis hermanas y hermanos quienes con su ejemplo, palabras y apoyo me permiten avanzar..

Alejandro

ÍNDICE

Introducción.....	1
Resumen.....	1
Objetivo.....	3
CAPITULO I ANTECEDENTES	1
1.1 Antecedentes.....	4
CAPITULO II CONSIDERACIONES TEORICAS.....	9
2.1 Teoría del chorro.....	9
2.1.1 Esquema de un chorro plano libre	9
2.1.2 Chorro circular de flujo normal.....	11
2.2 Fluctuación de la presión inducida por el impacto de un chorro.....	11
2.3 Estructuras terminales	13
2.3.Trampolín o salto de Ski.....	13
2.4 El Proceso de erosión.....	17
2.5 Cinemática de la trayectoria del chorro.....	18
2.6 Influencia de la carga total y de la longitud del chorro en la energía del chorro.....	23
2.7 Mecanismo de disipación de la turbulencia del chorro en el colchón de agua.....	24
2.8 Iniciación de movimiento de la partícula.....	25
2.9 Análisis Dimensional.....	26

CAPITULO III	DESCRIPCION DE MODELOS Y DATOS USADOS EN ESTE ESTUDIO EN DIFERENTES INVESTIGACIONES.....	31
3.1	Descripción de arreglo de erosión.....	31
3.2	Datos usados en este estudio.....	37
CAPITULO IV	ANALISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....	38
4.1	Relación entre la profundidad del colchón de agua y la erosión.....	38
4.1.1	Profundidad del colchón de agua mínima sin cambio en la socavación inicial.....	49
4.1.2	Profundidad del colchón de agua mínima sin presencia de socavación.....	50
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	51
	Conclusiones.....	51
	Recomendaciones.....	53
	REFERENCIAS	
ANEXO A	Láminas del modelo hidráulico y estructura de la rápida en planta y perfil.	
ANEXO B	Datos recolectados del proceso de erosión.	
ANEXO C	Fotos	

LISTA DE SIMBOLOS

Los siguientes símbolos fueron usados en este estudio.

h	Profundidad de erosión (L)
Hca	Profundidad del colchón de agua (L).
d ₅₀	diámetro nominal por el cual pasa el 50% del material (L)
d ₈₅	diámetro nominal por el cual pasa el 85% del material (L)
g	aceleración de la gravedad (LT ⁻²)
Q	descarga del agua (L ³ T)
q	descarga unitario (L ² T ⁻¹)
V _o	velocidad del chorro a las salida (LT ⁻¹)
V _i	velocidad del chorro en el momento del impacto (LT ⁻¹)
z	distancia del nivel del colchon de agua ala salida (L)

Alfabeto Griego:

φ	ángulo de reposo del material (grado)
ν	viscosidad cinemática del agua (L ² T ⁻¹)
θ	ángulo con el que el eje del chorro impacta en el colchón de agua (medido desde el eje X horizontal del nivel de agua) (grados)
θ _o	ángulo de despegue del salto de ski (grados)
ρ _w	densidad del agua (ML ⁻³)
ρ _s	densidad del sólido (ML ⁻³)

INTRODUCCIÓN

El Perú debido a su geografía y a la ocurrencia del Fenómeno del Niño esta siempre expuesto a la ocurrencia de tormentas que causan desastres consecuencia de una falta de mitigación.

Cuando se producen fuertes tormentas las estructuras hidráulicas encargadas de almacenar grandes volúmenes de agua como son las presas, sobre exceden su capacidad de almacenamiento; esta situación hace necesaria la eliminación del volumen excedente de agua a través de estructuras auxiliares provocando la formación de chorros de agua en caída libre, que, según el caudal conducido podrían causar excesiva erosión aguas abajo de la estructura hidráulica comprometiendo su estabilidad.

Debido a la erosión las cimentaciones de las estructuras hidráulicas son afectadas por lo que encontrar la máxima profundidad de erosión así como métodos de disipación de la energía del chorro, son en consecuencia muy importantes para el diseño de estas estructuras.

La disipación de la energía del chorro que se logra cuando se coloca un colchón de agua sobre el lecho en la zona de impacto es un fenómeno de cuyo comportamiento aún no se tiene mayores estudios pero que debido a su gran influencia en la erosión resulta de gran importancia.

RESUMEN

En el *Capítulo I Antecedentes*, se presenta la información recopilada de investigaciones correspondientes a chorros inclinados realizadas sobre el tema de erosión en lechos no cohesivos debido al impacto de chorros verticales originados por la rotura de una presa y/o a la salida del vertedero.

El *Capítulo II Consideraciones Teóricas*, explica la teoría de "Chorros" así como el proceso de erosión debido al impacto de un chorro en un lecho con un cierto colchón de agua, criterios teóricos sobre la cinemática de la trayectoria y características del chorro, cantidad de movimiento en el mecanismo de disipación de la turbulencia del chorro en el colchón de agua, iniciación de movimiento de la partícula y el análisis adimensional.

El *Capítulo III Descripción del modelo y datos usados en este estudio*, se presentan los datos de los modelos usados por Hallmark (1955), Thomas (1953), y Lencastre (1961) ; así como la descripción del modelo desarrollado en el laboratorio Nacional de Hidráulica por la Ing Minaya Elsa, planos del modelo, el cual consistió de una rápida con terminal en salto de ski y/o trampolín y el cuenco amortiguador; así también se muestra la matriz de pruebas bajo la cual se desarrollaron las 36 pruebas. Dichas pruebas consistieron de tres fases. El material utilizado en la Fase I fue arena gruesa con $d_{50} = 1,60$ mm, $d_{85} = 4.81$ mm y $d_{90} = 5,96$ mm, para la Fase II se utilizó la grava media con $d_{50} = 17,88$ mm, $d_{85} = 23.43$ mm y $d_{90} = 24,22$ mm la forma de la roca fue del tipo angulosa, y finalmente, para la Fase III fue roca con $d_{50} = 49,08$ mm, $d_{85} = 70.53$ mm y $d_{90} = 70,53$ mm, la forma de esta fue tipo redondeada, denominada boleó. Finalmente se hace una descripción general del modo como fueron desarrolladas cada una de las pruebas, indicando las condiciones iniciales, toma de datos durante el proceso y al final de la prueba.

En el *Capítulo IV Análisis y Discusión de los Resultados*, se presenta el análisis entre los datos usados de las variables y su comportamiento, las graficas muestran como para colchones de agua poco profundos no se encuentra una relación entre la profundidad de erosión y la profundidad del colchón de agua, los casos en los que se encontró que la profundidad de erosión se incrementa al disminuir la altura del colchón de agua, a través de una extrapolación fueron halladas las profundidades de colchón de agua necesaria para que una determinada descarga no produzca erosión, otras variables analizadas fueron las relaciones entre la energía del chorro, la longitud de amortiguamiento y el diámetro medio de las partículas del lecho.

Finalmente en *Conclusiones y Recomendaciones*, se presentan las conclusiones a las cuales se ha llegado con los resultados obtenidos de las pruebas realizadas y se formulan las recomendaciones para la realización de estudios que continúen y/o profundicen la investigación sobre el tema.

OBJETIVO

El objetivo principal de este estudio es el de analizar el comportamiento del fenómeno de la disipación de la energía del chorro en el colchón de agua colocado sobre un lecho no cohesivo, en dos casos específicos: el primero cuando la profundidad del colchón de agua empieza a disipar la energía del chorro provocando los primeros cambios en la profundidad de la erosión y el segundo cuando la profundidad del colchón de agua disipa a tal punto a la energía del chorro que hace nula la erosión

CAPITULO I

ANTECEDENTES

1.1 Antecedentes.

Al colocar sobre un lecho no cohesivo impactado por un chorro, un colchón de agua con el propósito de disminuir la energía que provoca la erosión, se observa que para colchones de agua poco profundos la erosión inicial no cambia, es decir que no hay disipación de energía del chorro, también se observa que al aumentar la profundidad del colchón de agua se logra disipar completamente la energía del chorro que provoca la erosión, el presente estudio usa datos de diferentes investigadores para analizar estos fenómenos.

A través del tiempo las ecuaciones para determinar la profundidad de erosión fueron modificándose, así en las primeras ecuaciones se expresa la profundidad de erosión (h_s), en términos de la carga de agua (H), diferencia de nivel entre el reservorio y el colchón de agua, la descarga unitaria del chorro en el punto de impacto (q) y en algunos casos el diámetro característico del material del lecho (d). La forma general que toma la Ecuación (1.1) es la siguiente:

$$h_s = K \frac{q^x H^y}{d^z} \quad \dots\dots\dots (1.1)$$

En el Cuadro N°1.1 se observa una lista conformada por tres grupos de investigaciones de años recientes.

Cuadro 1.1 Ecuaciones planteadas por diferentes investigadores

Investigadores	Formula	Ano
Okyay	$\frac{h_s}{y} = \frac{30.67 \left(\frac{V_0}{W_m} \right)^{2.01} \left(\frac{d_{50}}{y} \right)^{1.28}}{Fr^{1.119} \left(\frac{h_{CA}}{y} \right)^{0.431}}$	1973
Borman y Julián	$h_s = \left[\frac{0.611}{[\text{sen}(0.436 + \beta')]^{0.8}} q^{0.6} \frac{V_0}{g^{0.8} d_{90}^{0.4}} \text{sen} \beta' \right] - z$	1991
Stein y Julián	$h_s = \frac{C_d^2 C_f V_i^2 y_i}{\tau_c} \text{sen} \theta_i$	1994
Kuroiwa	$\frac{h_s}{y_c} = 0.965 \frac{\left[\frac{V_i}{\sqrt{g y_i}} \right]^{0.72}}{\left(\frac{h_{CA} / \text{sen} \theta_i}{y_i} \right)^{0.12} \left(\frac{W_m}{\sqrt{g y_i}} \right)^{1.26}}$	1998
D'Agostin o-Ferro	$\frac{h_s}{z} = 0.540 \left(\frac{b}{z} \right)^{0.593} \left(\frac{h_{CA}}{H} \right)^{-0.126} (A_{50})^{0.544} \left(\frac{d_{90}}{d_{50}} \right)^{-0.856} \left(\frac{b}{B} \right)^{-0.751}$	2000
Minaya	$\frac{h_s}{y_i} = 3.188 \left(\frac{z}{H} \right)^{0.6254} \left(\frac{d_{85}}{d_{50}} \right)^{0.1185} \left(\frac{q}{z((G-1)gd_{50})^{1/2}} \right)^{0.3875} \left(\frac{V_i}{\sqrt{g y_i}} \right)^{1.3777} \left(\frac{H}{\left(\frac{h_{CA}}{\text{sen} \theta_i} \right)} \right)^{0.0688}$	2005

Las primeras ecuaciones proponen parámetros como: el espesor del chorro a la salida del vertedero (y) y en la zona de impacto (y_i). Así como la velocidad con la que sale del vertedero (V_0) y con la que impacta (V_i), finalmente la velocidad de caída de la partícula (W_m).

En la Figura 1.1 se observa el esquema que muestra las consideraciones para el planteamiento de las ecuaciones.

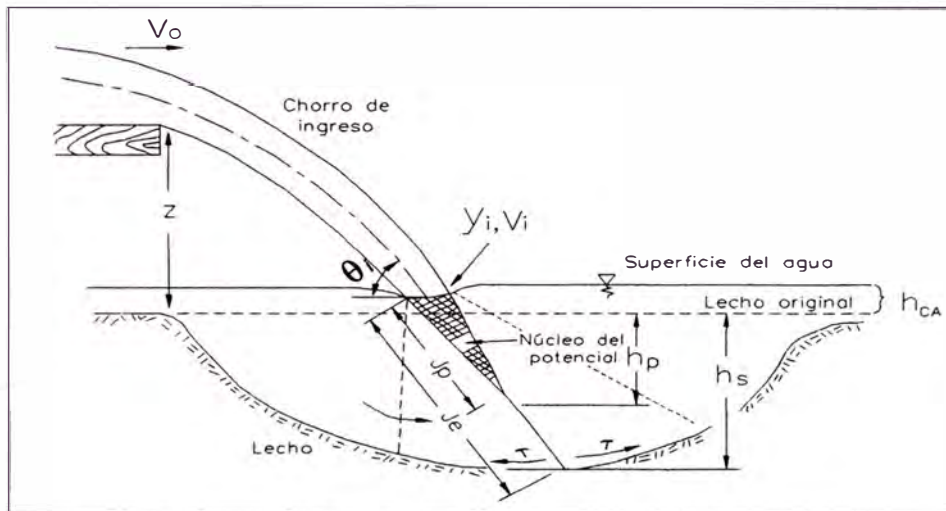


Figura 1.1 Definición de regiones para un chorro que impacta en un suelo no cohesivo.

Borman y Julien en 1991 (D'Angostino-Ferro). Ellos calibraron una ecuación basada en la estabilidad de la partícula y para una amplia variedad de condiciones como: chorros verticales, chorros de flujo radial, chorros producto de avenidas, chorros sumergidos y flujos sobre estructuras a gran escala. De acuerdo a sus resultados ellos estimaron la profundidad de erosión de acuerdo a la Ecuación (1.2):

$$h_s = \left[\frac{0.611}{[\text{sen}(0.436 + \beta')]^{0.8}} q^{0.6} \frac{V_o}{g^{0.8} d_{90}^{0.4}} \text{sen} \beta' \right] - z \quad \dots\dots$$

(1.2)

Donde: β' es el máximo ángulo del talud de aguas arriba del hoyo de erosión (rad).

Ellos infirieron una relación para este ángulo:

$$\beta' = 0.316 \operatorname{sen} \lambda + 0.15 \ln \left(\frac{z + y_o}{y_o} \right) + 0.13 \left(\frac{h}{y_o} \right) - 0.05 \ln \left(\frac{V_o}{\sqrt{g y_o}} \right) \dots\dots$$

(1.3)

Donde: λ , es el ángulo de la cara de aguas abajo de la estructura de control (rad)
y

y_o es la altura de agua sobre la cresta del vertedero.

Kuroiwa, J. (1998) relaciono parámetros adimensionales como las características del fluido, suelo y la fuerza de los chorros impactantes. Así mismo consideró el fenómeno de aireación, cuyos parámetros son la densidad y viscosidad del aire.

La Ecuación 1.4 fue planteada para determinar la profundidad de socavación debido al efecto del impacto del chorro:

$$\frac{h_s}{y_c} = 0.965 \frac{\left[\frac{V_i}{\sqrt{g y_i}} \right]^{0.72}}{\left(\frac{(h_{CA} / \operatorname{sen} \theta_i)}{y_i} \right)^{0.12} \left(\frac{W_m}{\sqrt{g y_i}} \right)^{1.26}} \dots\dots (1.4)$$

Donde : el tirante crítico esta dado por:

$$y_c = \left(\frac{q^2}{g} \right)^{1/3} \dots\dots (1.5)$$

donde:

$H_{ca} / \operatorname{sen} \theta_i$ del grafico 1.1 corresponde a la longitud de penetración del chorro sobre el eje central.

D'Angostino y Ferro en el 2000. Ellos realizaron un análisis denominado "self-similarity" con los datos de Veronenese (1937), Borman & Julien (1991), D'Angostino (1994) y Mossa (1998). Como trabajan con diferentes tipos de granulometría, consideraron el parámetro (d_{90}/d_{50}) para caracterizar mejor el material del lecho. Luego la ecuación que propusieron fue:

$$\frac{h_s}{z} = 0.540 \left(\frac{b}{z} \right)^{0.593} \left(\frac{h_{CA}}{H} \right)^{-0.126} (A_{50})^{0.544} \left(\frac{d_{90}}{d_{50}} \right)^{-0.856} \left(\frac{b}{B} \right)^{-0.751} \dots$$

(1.7)

y :

$$A_{50} = \frac{Q}{bz \left[gd_{50} \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right) \right]^{1/2}} \dots \dots \dots (1.8)$$

Donde :

- b** = ancho del vertedero
- B** = ancho del canal
- ρ_s = densidad del sólido
- ρ = densidad del agua

CAPITULO II

CONSIDERACIONES TEORICAS

Además de contener información sobre los diferentes tipos de chorros, este capítulo presenta el desarrollo de un proceso de erosión en lecho no cohesivo debido al impacto de un chorro.

2.1 Teoría de chorro

2.1.1 Esquema de un chorro plano libre.

Consideremos un chorro de agua saliendo del plano de un orificio de altura b_0 y entrando a una masa de agua sin movimiento. Esta acción produce una mezcla violenta y difusión del chorro que incorpora masa de agua impactada aumentando el espesor del chorro y disipación de su velocidad. En la Figura 2.1 se puede apreciar una representación esquemática del chorro, conocida como el *plano de turbulencia de un chorro libre*. De acuerdo a observaciones experimentales se ha determinado la formación de dos regiones: la primera, la más cercana al orificio, se conoce comúnmente como la *región del flujo en desarrollo*, así la turbulencia penetra en dirección del eje central X , entonces al final de esta región se presenta la velocidad máxima que es igual a U_0 . Inmediatamente después del desarrollo de ésta, va la región denominada *flujo totalmente desarrollado*, la turbulencia ha penetrado en dirección axial y como resultado la velocidad máxima va disminuyendo.

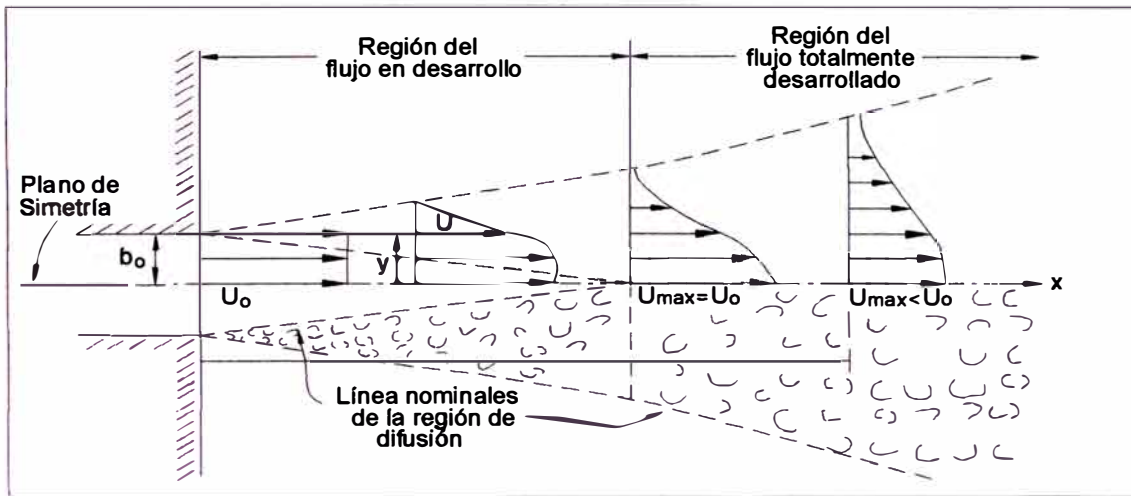


Figura 2.1 Esquema de turbulencia de un chorro libre

Tollmien (1926), (Rajaratman,1983) usó las ecuaciones de movimiento, ecuación de la integral de momento, ecuación de la integral de energía y la longitud de mezcla de Prandtl. Luego con el uso del teorema Pi y el principio de conservación de momenta a lo largo del flujo, propuso la siguiente ecuación:

$$\frac{U_m}{U_o} = \frac{1,21}{\sqrt{\frac{a}{x}}} \dots\dots\dots (2.1)$$

donde:

- U_m, velocidad en la línea central del chorro
- U_o, velocidad promedio a la salida del chorro
- a, constante
- X, distancia desde el punto de salida
- b_o, altura del orificio

2.1.2 Chorro circular de flujo radial.

A un flujo creado por un chorro vertical que impacta sobre una superficie plana y se distribuye radialmente hacia los costados o bordes se le conoce como chorro de flujo radial. (Rajaratman, 1976).

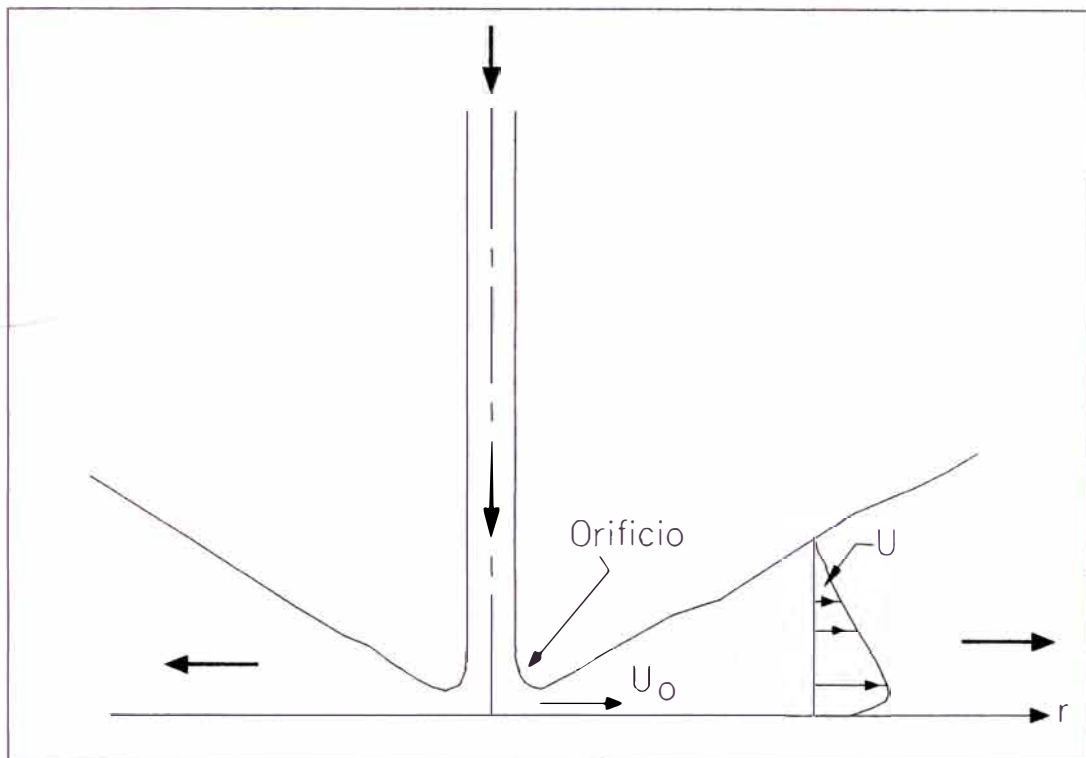


Figura 2.2 Chorro de pared radial.

2.2 Fluctuación de la presión inducida por el impacto de un chorro.

Beltaos y Rajaratman (1974) establecieron en el chorro tres regiones. La primera inmediatamente a la salida del chorro como región libre. La segunda como la zona de impacto donde el chorro se acomoda al plano de impacto encontrando que la región de impacto en la cercanía a la pared se inicia para $x/H > 0.86$, donde H es la distancia del orificio al plano horizontal y x es la distancia medida a lo largo de la línea central del eje del chorro. En la tercera

región se observa que el chorro descarga radialmente sobre la pared. En la Figura 2.3 se puede apreciar dichas regiones.

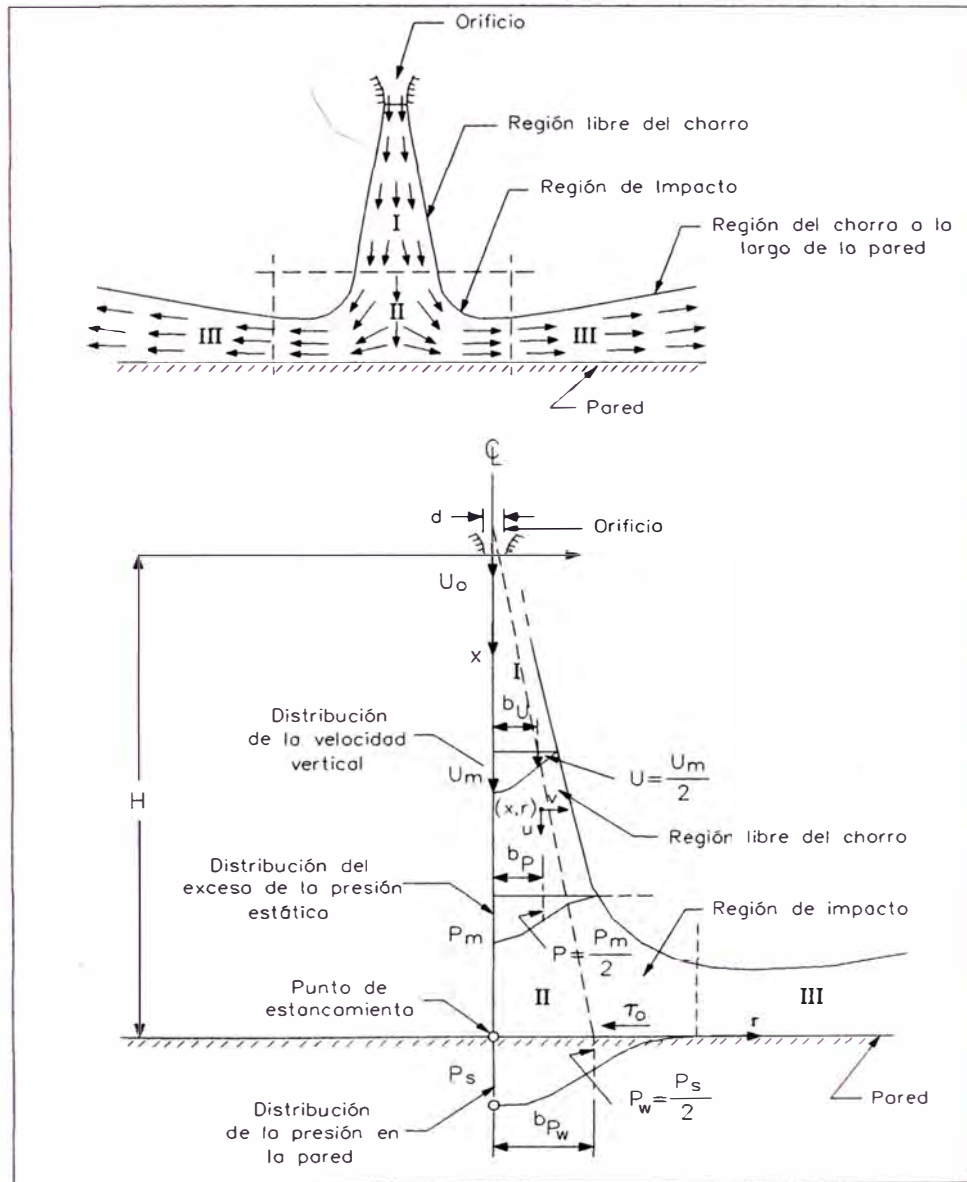


Figura 2.3 Distribución de velocidades del chorro y esfuerzos de corte cerca de la pared.

La distribución de la velocidad en la región libre propuesta en este caso fue:

$$\frac{U_{mi}}{U_m} = 3,1 \frac{x}{H} \left(x - \frac{x}{H}\right)^{1/2} \dots\dots\dots (2.2)$$

y el máximo esfuerzo de corte en la región de impacto (τ_m) es:

$$\tau_m = 0.166 \frac{\rho U_o^2}{\left(\frac{H}{d}\right)^2} \dots\dots\dots (2.3)$$

donde,

U_m = velocidad en el eje del chorro de la región libre.

U_{mi} = velocidad máxima en la región de impacto

d = diámetro del chorro en la sección de emisión

U_o = velocidad del chorro a la salida del orificio.

H = Distancia entre el orificio y el plano horizontal

2.3 Estructuras terminales

Cuando la descarga del vertedero se hace directamente al cauce, se produce erosión al pie de la estructura. Para disminuir los efectos se consideran por ejemplo estructuras terminales que permitan proyectar el chorro lo mas lejos posible del pie de la estructura, como los *deflectores terminales* o *trampolines*.

2.3.1 Trampolín o Salto de ski.

Los términos *trampolín* o *salto de ski* (Bureau of Reclamation, Monograph N°25; Rouse, 1951) corresponden a una estructura terminal del tipo deflector (Fig. 2.4). Estos deflectores imponen cambios en la dirección con la que sale el flujo de la estructura vertedora. El chorro es arrojado al aire para luego caer en un punto predeterminado. Una pequeña cantidad de energía es disipada por la fricción a través del trampolín. Durante su viaje a través del aire el chorro se expande debido a la masa de aire que entra en contacto con el chorro. Este efecto disipa otra porción de energía del chorro.

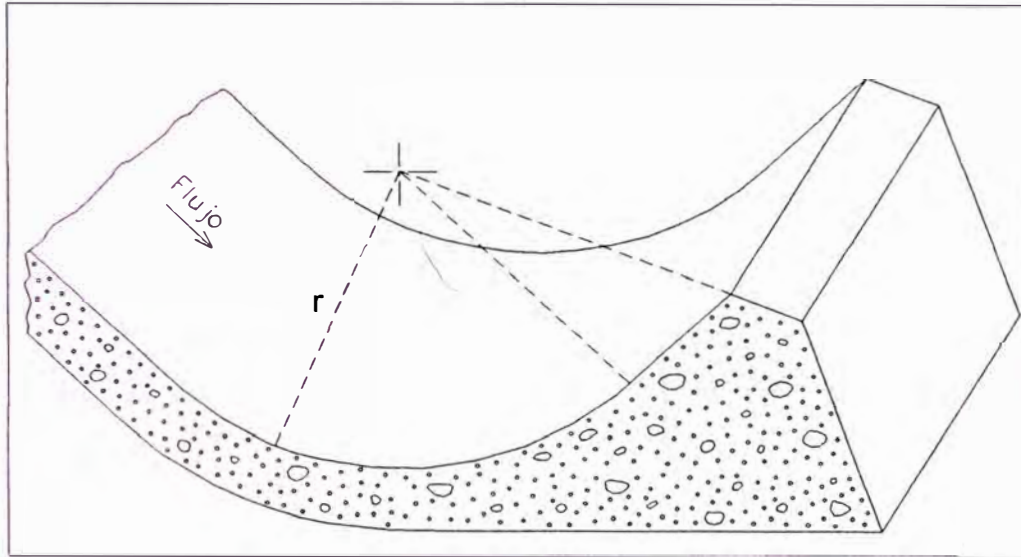


Figura 2.4. Trampolín o salto de ski

Los parámetros geométricos requeridos para el diseño de un trampolín o flip bucket son: el radio del trampolín r , la altura mínima del labio del trampolín h_{min} , el ángulo de la trayectoria ubicado al final del trampolín θ_0 y el alineamiento planimétrico del trampolín. La Figura 2.5 muestra las variables involucradas en el diseño del deflector o trampolín.

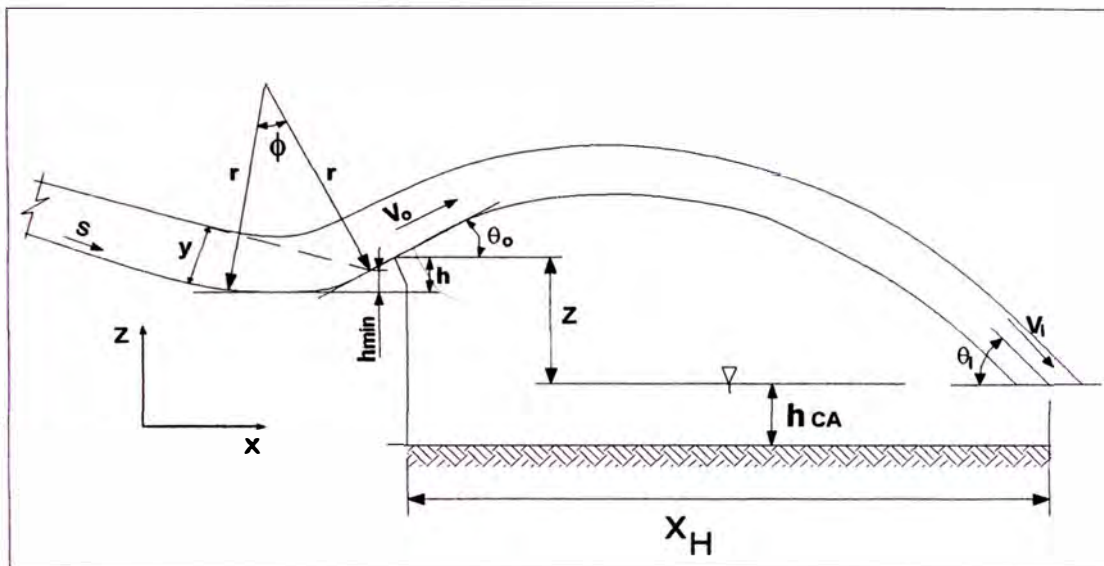


Figura 2.5 Variables de la trayectoria del chorro.

El radio del trampolín debe ser lo suficientemente largo para mantener una corriente concéntrica al moverse el agua alrededor de la curva, el radio mínimo puede obtenerse de la siguiente relación:

$$r_{\min} = \frac{\rho V_o^2 y}{p - \gamma y} \quad \dots\dots\dots (2.4)$$

donde :

- r_{\min} = radio de la curvatura mínimo
- V_o = velocidad del flujo en el vertedero
- y = tirante del flujo en el vertedero
- p = presión dinámica normal ejercida sobre el piso
- ρ = Densidad del agua
- γ = Peso Específico del agua

Las experiencias sugieren que el radio del trampolín sea al menos cuatro veces el tirante máximo del flujo que se desarrolla antes de salir del trampolín.

La altura mínima (h_{\min}), es la requerida por el trampolín para asegurar que el flujo siga la curvatura del trampolín y viene dada por la siguiente ecuación:

$$h_{\min} = r - r \cos(\phi - \tan^{-1} s) \quad \dots\dots\dots (2.5)$$

$$Y: \quad \phi = \tan^{-1} \left\{ \frac{[y(2r - y)]^{1/2}}{r - y} \right\} \quad \dots\dots\dots (2.6)$$

donde :

ϕ = mínimo ángulo de la deflexión

s = pendiente del vertedero adjunta al trampolín

El ángulo de la trayectoria es el ángulo que hace el labio del ski respecto a la horizontal. Este ángulo es un factor determinante en la distancia de la trayectoria del chorro y de las características hidráulicas en el área de impacto. Un ángulo igual a 45° generaría la máxima distancia horizontal de la trayectoria del chorro. La altura requerida del labio del trampolín o ski, h , medida desde la parte inferior de la curvatura del trampolín, de modo de satisfacer la trayectoria deseada θ_o , puede ser determinada por la siguiente ecuación:

$$h = r - r \cos \theta_o \quad \dots\dots\dots (2.7)$$

La distancia horizontal de la trayectoria del chorro X_H depende de la velocidad del flujo en el momento que sale del trampolín V_o , del ángulo de la trayectoria θ_o y de la distancia vertical que existe entre el labio del trampolín y la superficie del colchón de agua z , este valor es determinado por la siguiente ecuación:

$$X_H = \frac{V_o^2}{2g} \sin 2\theta_o + 2 \cos \theta_o \left[\frac{V_o^2}{2g} \left(\frac{V_o^2}{2g} \sin^2 \theta_o + z \right) \right]^{1/2} \quad \dots\dots\dots (2.8)$$

Cuando el valor de z es igual a cero, la ecuación se reduce a:

$$X_H = \frac{V_o^2}{2g} \text{sen } 2\theta_o \dots\dots\dots (2.9)$$

2.4 El Proceso de Erosión

El proceso de erosión de un lecho no cohesivo debido al impacto de un chorro inclinado es esquematizado en la Figura 2.6. Se aprecia la poza u hoyo vivo de erosión resultado del impacto directo del chorro y la erosión exterior producido por las corrientes recirculantes o deflectadas.

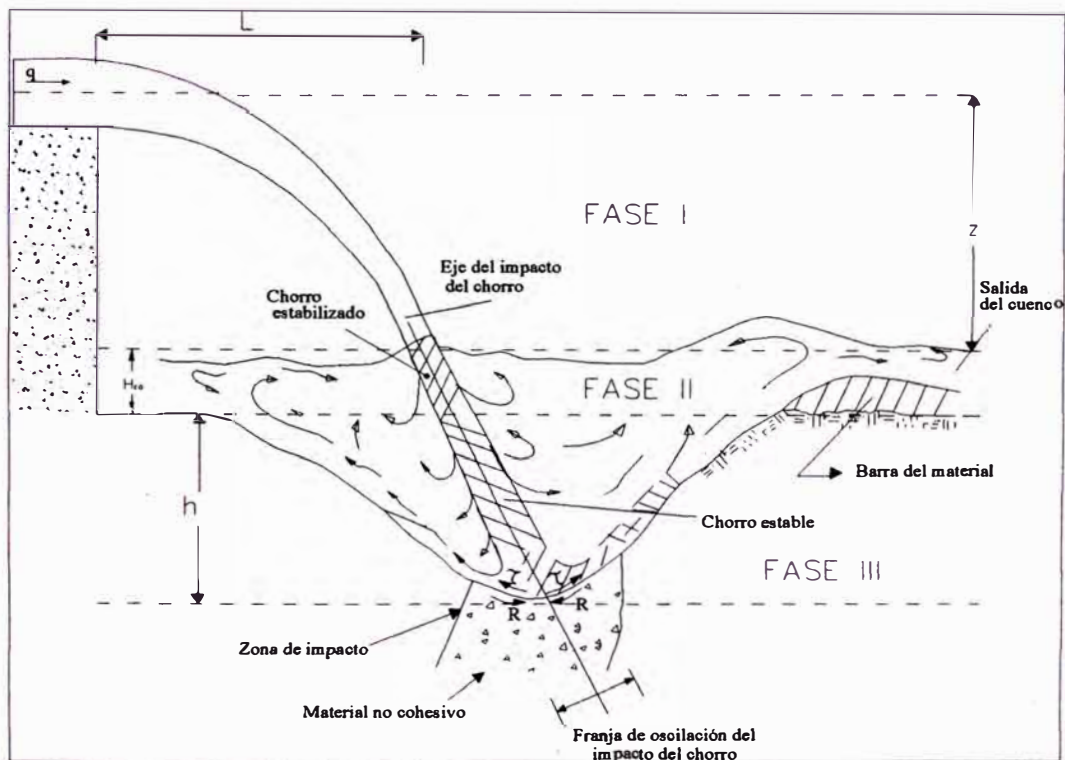


Figura 2.6 Esquema del proceso de erosión.

De los estudios realizados por Supr. (1985), Gis (1998), Kuroiwa (1999) y Yafei (2001) sobre este tema se ha podido clasificar al proceso de erosión en las siguientes fases (ver Figura 2.6):

La primera fase, se produce un aumento neto en la energía cinética debido a la aceleración gravitatoria. El chorro impacta con el lecho a una mayor velocidad con la que fue emitido, a menos que este se desintegre. El chorro se desintegra si la trayectoria del chorro, L , es grande comparado con la longitud de la desintegración, L_d que esta, en función de la unidad de descarga del chorro, q , y el nivel de turbulencia en la emisión.

En Fase Dos, el chorro disipa la energía después de impactar con el colchón de agua. La velocidad del chorro es reducida cuando este penetra en el colchón de agua. El chorro se mezcla, transfiriendo parte de su energía al fluido estático por esfuerzos de corte. La longitud de penetración de la línea central del es $H_{cb}/\sin \theta$.

En Fase Tres, el chorro impacta con el lecho y creará una poza de socavación si la energía del chorro es suficiente como para causar la remoción del material del lecho.

2.5 Cinemática de la trayectoria del chorro

El chorro desarrolla una trayectoria curvilínea con régimen permanente y superficie libre, lo cual quiere decir que la presión atmosférica actúa en cualquier punto del chorro.

Un chorro compacto es un chorro que no tiene incorporación de aire y será considerado para desarrollar una expresión que calcula la profundidad máxima de la poza de socavación.

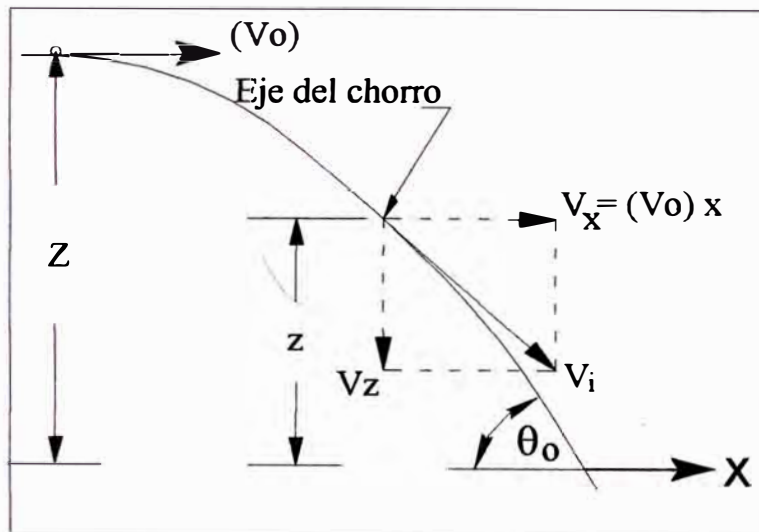


Figura 2.7.a Distribución de las componentes de velocidad de la trayectoria del chorro.

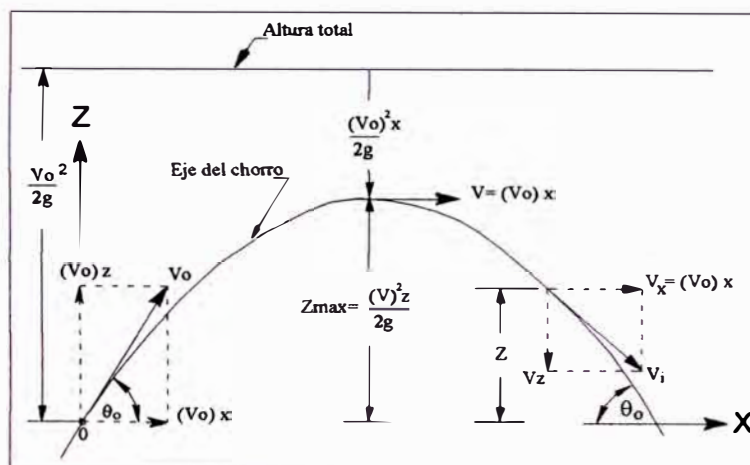


Figura 2.7.b Distribución de las componentes de velocidad de la trayectoria del chorro para el caso del Salto de Ski.

La velocidad de incidencia (V_i) con la cual ingresa el chorro a la superficie del colchón de agua (H_{ca}) se deduce utilizando los conceptos de cinemática de partículas en movimiento curvilíneo y energía.

El vector aceleración puede descomponerse en componentes cuyas magnitudes son:

$$a_x = \frac{dV_x}{dt} = 0 \qquad a_z = \frac{dV_z}{dt} = g \qquad \dots\dots\dots$$

(2.10)

dado que la única fuerza actuante es el peso propio del chorro.

Según la descripción de la trayectoria y el sistema de ejes asumidos en la Figura 2.7.a y 2.7.b, la aceleración en el eje z tendrá signo negativo en el tramo ascendente de la curva y signo positivo en el tramo descendente de la curva. Como la velocidad de incidencia se encuentra en el tramo descendente, para el siguiente desarrollo se utilizará el signo positivo.

Si la distancia del punto de emisión de la estructura es localizada a una distancia, z, desde la elevación del colchón de agua, y considerado la aceleración de gravedad:

$$x = (v_o)_x t \qquad \dots\dots\dots (2.11)$$

$$z = (v_o)_z t + \frac{1}{2} g t^2 \qquad \dots\dots\dots (2.12)$$

De la Ecuación (2.12) despejamos "t", obtenemos

$$t = \frac{-V_o \text{sen} \theta_o + \sqrt{V_o^2 \text{sen}^2 \theta_o + 2gz}}{g} \qquad \dots\dots\dots (2.13)$$

Finalmente, podrá verse que, en cualquier instante,

$$V_z^2 = (V_o)_z^2 + 2gz \qquad \dots\dots (2.14)$$

Luego, la magnitud escalar de la velocidad de incidencia (V_i) será:

$$V_i = \sqrt{V_x^2 + V_z^2} \qquad \dots\dots\dots (2.15)$$

Reemplazando en la Ecuación (2.15) las ecuaciones (2.11) y (2.14) se tiene:

$$V_i = \sqrt{V_o^2 \cos^2 \theta_o + V_o^2 \text{sen}^2 \theta_o + 2gz} \quad \text{.....(2.16)}$$

Ordenando la ecuación y sabiendo que : $\text{sen}^2 \theta_o + \cos^2 \theta_o = 1$, tenemos:

$$V_i = \sqrt{V_o^2 + 2gz} \quad \text{..... (2.17)}$$

La Ecuación (2.17) también puede ser escrita como:

$$V_i = \sqrt{2g\left(\frac{V_o^2}{2g} + z\right)} \quad \text{..... (2.18)}$$

Como se mencionó anteriormente se trata de una corriente con superficie libre, luego la presión actuante es atmosférica (nula manométricamente). Entonces, en la ecuación de Bemoulli el término carga de presión desaparece. De la Figura 2.7.a y 2.7.b, y aplicando la ecuación de Energía se observa que la carga total (H) esta dada por:

$$H = z + \frac{V_o^2}{2g} \quad \text{..... (2.20)}$$

donde:

- z, es la altura que hay entre el eje de la salida del chorro y la superficie del colchón de agua y
- $V_o^2/2g$ es la carga cinética. Se considera que las pérdidas de carga locales son despreciables.

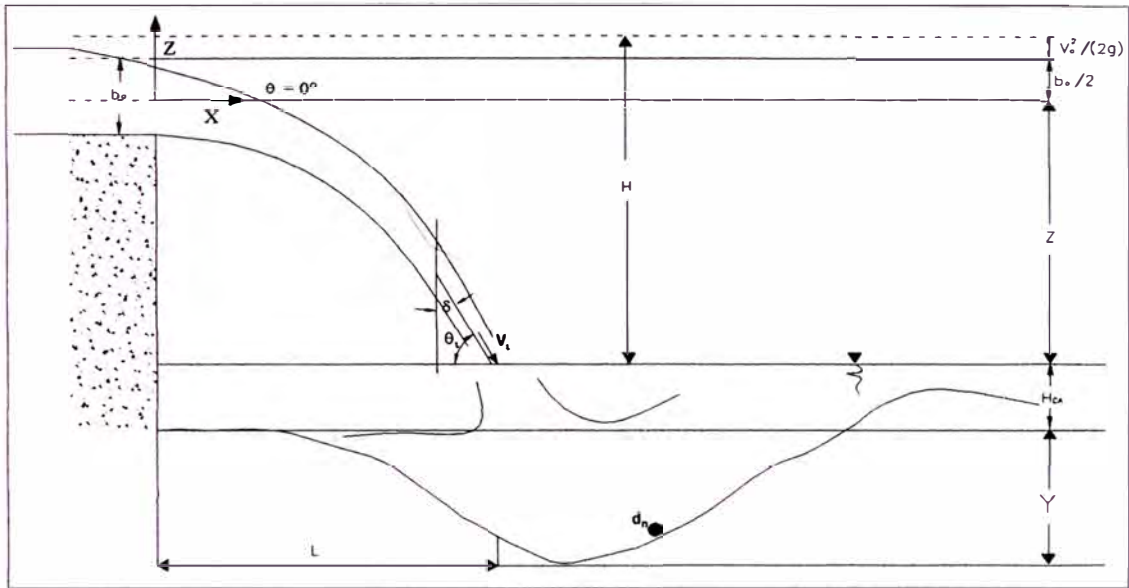


Figura 2.8.a Variables que intervienen en la deducción de la velocidad de incidencia (V_i).

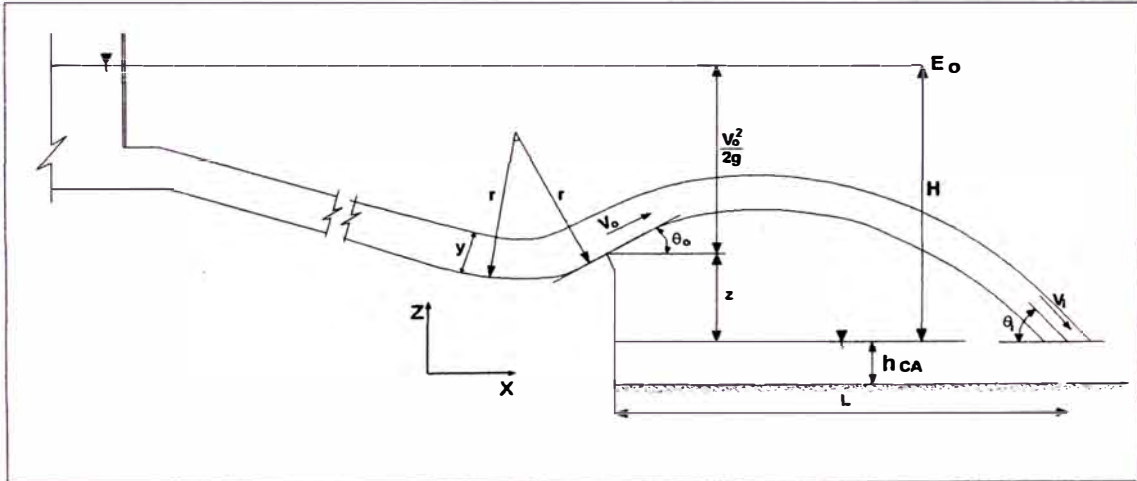


Figura 2.8.b Variables que intervienen en la deducción de la velocidad de incidencia (V_i) para el caso del salto de Ski.

Reemplazando la Ecuación (2.19) en la Ecuación (2.20), obtenemos:

$$V_i = \sqrt{2gH} \quad \dots\dots\dots (2.21)$$

2.6 Influencia de la Carga Total y de la Longitud del Chorro en la energía del Chorro

La velocidad real del chorro en la superficie del colchón de agua, V_{iact} , podría ser igual a la velocidad teórica de intrusión, V_i , si las condiciones fueran ideales (es decir, sin considerar la fricción aérea y la desintegración del chorro). Sin embargo, en estudios por Lencastre (1961), Lewis (1996) y Bohrer y Abt (1996), fue encontrado que la velocidad real en la intrusión, V_{iact} , era menor que la velocidad teórica de intrusión, V_i . La real velocidad de intrusión era tan baja como 70% de la velocidad teórica de intrusión en estudios Lencastres cuando la altura de la caída, z , era 15 veces el espesor del chorro en la emisión, b_o . La presión disponible en el suelo en el impacto de un chorro se encontró que estaba en función L/L_d y Hca/b_i . L es la longitud de trayectoria del chorro en el aire. La longitud de desintegración de un chorro que impacta, L_d , se encontró que estaba en función de la unidad descarga, q , y el nivel de turbulencia en la emisión ε según los resultados de McKeogh, y Elsayy (1980).

Para el caso del salto de Ski, Elevatorski (1959) sugiere que para compensar la reducción de la velocidad y la pérdida de energía del chorro durante su viaje, se haga uso de la siguiente ecuación para hallar la longitud real de la trayectoria del chorro:

$$\frac{X_H}{H} = 1,9 \frac{h}{H} \text{sen}2\theta_o \quad \dots\dots\dots (2.22)$$

El ángulo que hace el chorro en el momento del impacto θ_i con la superficie del colchón de agua, es descrito por la siguiente relación:

$$\theta_i = \tan^{-1} \left[\sec \theta_o \left(\sin^2 \theta_o + \frac{z}{V_o^2 / 2g} \right)^{1/2} \right] \dots\dots\dots (2.23)$$

La ecuación se reduce a $\theta_i = \theta_o$ cuando z es igual a cero

De igual modo se puede determinar la componente vertical o la altura de la trayectoria del chorro. Si la resistencia y perturbación del aire son despreciables, se puede hacer uso de la siguiente ecuación:

$$z = \frac{V_o^2}{2g} \sin^2 \theta_o \dots\dots\dots (2.24)$$

Como $V_o^2/2g$ es igual a "h", entonces la Ecuación (2.24) se puede expresar adimensionalmente como:

$$\frac{z}{h} = \sin^2 \theta_o \dots\dots\dots (2.25)$$

De estas deducciones, se encontró que al disminuir la potencia del chorro durante su trayectoria en el aire, entonces la velocidad de impacto en el colchón de agua es menor que la velocidad de impacto teórica.

2.7 Mecanismo de disipación de la energía del chorro en el colchón de agua.

Cuando el chorro de agua impacta en el colchón de agua se pueden observar dos regiones distintas (Ver Figura 2.1). Así tenemos la zona o región del flujo en desarrollo y la otra del flujo totalmente desarrollado (Rajaratman, 1976).

La zona de flujo establecido empieza donde la velocidad de la línea central del chorro empieza a disminuir. La longitud de la zona de establecimiento de flujo estaba en el orden de cinco a diez veces el espesor del chorro en la emisión. Según Hom-ma (1953), no se encontraron zonas distintas para los impactos con chorros. El decaimiento de la velocidad de la línea central del chorro fue

detectado inmediatamente debajo de la superficie del colchón de agua. Resultados similares fueron obtenidos por Bohrer y Abt (1997).

Por consiguiente, se asumirá que el decaimiento de velocidad de la línea central del chorro tiene lugar inmediatamente después de la intrusión. En (Albertson et al, 1950) la ecuación de la velocidad de la línea central del chorro es proporcional al producto de la velocidad del chorro en la intrusión y la raíz cuadrada de b_i/x , la relación entre el espesor del chorro en la intrusión y la distancia, x desde la superficie del colchón de agua, como sigue:

$$V_x = K V_i (b_i / x)^{0.5} \quad \dots\dots\dots(2.26)$$

Si el chorro impacta con la superficie del colchón de agua con un ángulo δ , la trayectoria del chorro en el agua, x , es igual a $H_{ca} / \cos \delta$. Si $x = H_{ca} / \cos \delta$, La Ecuación (3.17) puede reestructurarse como sigue:

$$\frac{V_{H_{ca} / \cos \delta}}{V_i} = K \frac{1}{((H_{ca} / \cos \delta) / b_i)^{0.5}} \quad \dots\dots\dots(2.27)$$

La Ecuación (2.27) daría aproximadamente la velocidad del chorro en la superficie si este es libre. Sin embargo, las velocidades disminuyen en la región de la intrusión según Beltaos y Rajaratnam (1974).

2.8 Iniciación de movimiento de la partícula

Un flujo de agua que fluye sobre un lecho compuesto de diferentes tipos de partículas no cohesivas, ejerce fuerzas sobre estas. Dicha fuerza puede ser de tal magnitud, que empieza a moverlas, llamando a esta condición, la condición crítica. Las arenas, gravas y cantos rodados, resisten con su peso la tendencia al movimiento. (Rocha, 1998), (Vanoni, 1975).

Las fuerzas hidrodinámicas que actúan sobre la partícula de sedimento son las fuerzas de gravedad (F_w), la fuerza de levantamiento (F_L) perpendicular al fondo del cauce y la fuerza de arrastre (F_D) paralela al cauce. Cuando se está en la condición crítica estas fuerzas tienden a estar en equilibrio. En la Figura 2.9 se

puede observar la distribución de fuerzas sobre la partícula, la cual yace sobre un lecho cuya pendiente está dada por el ángulo ϕ y θ es el ángulo de reposo del sedimento. Las fuerzas entre partículas son despreciadas, debido que se trata de suelos no cohesivos.

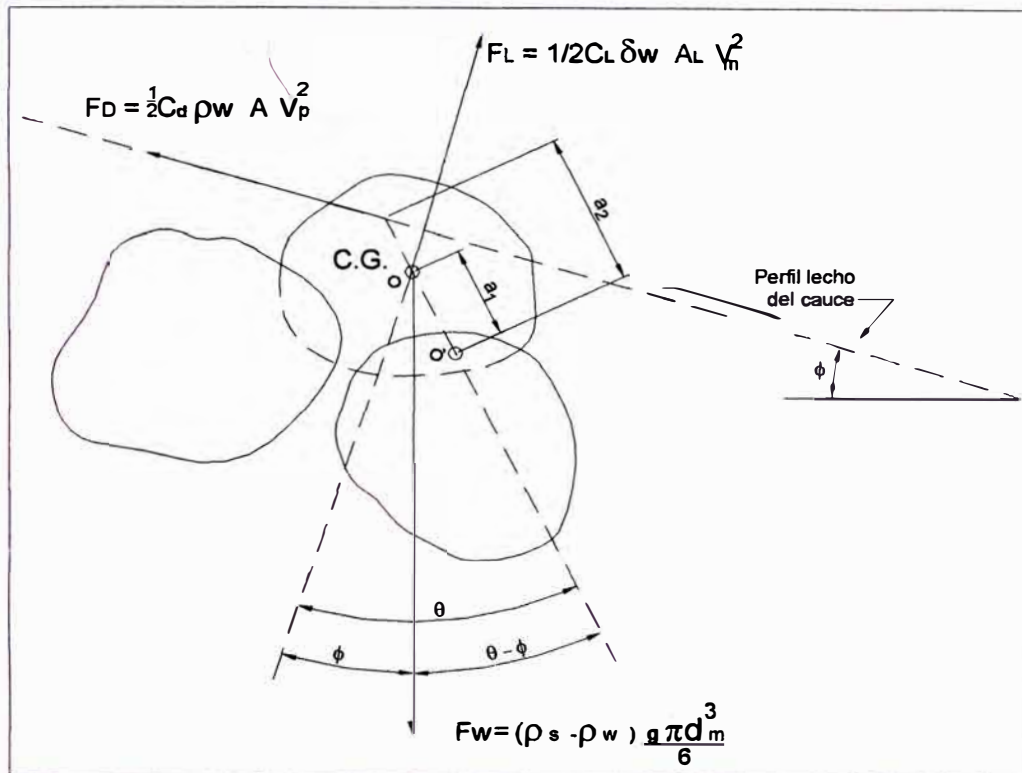


Figura 2.9 Fuerzas que intervienen en la iniciación de movimiento de la partícula.

Tomando momentos en el punto de apoyo (O') entre las dos partículas, tenemos la siguiente expresión:

$$F_w \cos \phi a_1 \sin \theta = F_w \sin \phi a_1 \cos \theta + F_D a_2 \cos \theta + F_L a_1 \sin \theta \dots (2.28)$$

realizando las operaciones y ordenando la expresión tenemos:

$$F_D + F_L \frac{a_1}{a_2} \operatorname{tg} \theta = F_W \frac{a_1}{a_2} (\cos \phi \operatorname{tg} \theta - \operatorname{sen} \phi) \quad \dots\dots (2.29)$$

Como se sabe las fuerzas de sustentación (F_L), arrastre (F_D) y peso (F_W) vienen dadas por las siguientes expresiones (Coronado, 1971):

$$F_D = \frac{1}{2} C_d \rho_w A V_m^2 \quad \dots\dots (2.30)$$

$$F_L = \frac{1}{2} C_L \rho_w A V_m^2 \quad \dots\dots (2.31)$$

$$F_W = (\rho_s - \rho_w) \frac{g \pi d_m^3}{6} \quad \dots\dots (2.32)$$

Donde:

C_d - Coeficiente de resistencia de arrastre

C_L - Coeficiente de levantamiento

ρ_s - Densidad del sólido

ρ_w - Densidad del fluido (agua)

V_m - Velocidad media del flujo

d_m - Diámetro medio

A - Área de la cara transversal de la partícula $\left(\frac{\pi d_m^2}{4}\right)$

Reemplazando las Ecuaciones (2.30), (2.31) y (2.32) en (2.29) se obtiene:

$$\left[\frac{1}{2} C_d \rho_w \left(\frac{\pi d_m^2}{4} \right) V_m^2 \right] + \left[\frac{1}{2} C_L \rho_w \left(\frac{\pi d_m^2}{4} \right) V_m^2 \right] \left(\frac{a_1}{a_2} \right) \operatorname{tg} \theta = \left[(\rho_s - \rho_w) \left(\frac{g \pi d_m^3}{6} \right) \right] \left(\frac{a_1}{a_2} \right) (\cos \phi \operatorname{tg} \theta - \operatorname{sen} \phi)$$

..... (2.33)

La fuerza de levantamiento depende de un factor de forma y de un Número de Reynolds, de la misma manera que la fuerza de arrastre, por lo tanto el coeficiente de levantamiento puede ser expresado en función del coeficiente de la fuerza de arrastre, como $C_L = p C_D$. El valor del coeficiente "p" varía entre 0.1 y 0.4 (Kuroiwa, 1999).

La expresión de la Ecuación (2.33), puede ser simplificada y expresada de la siguiente manera:

$$V_p = V_m = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{d_m g}{C_d} \left[\left(\frac{\rho_s}{\rho_w} \right) - 1 \right] \frac{\left(\frac{a_1}{a_2} \right) \cos \phi \operatorname{tg} \theta - \operatorname{sen} \phi}{1 + p \operatorname{tg} \theta \left(\frac{a_1}{a_2} \right)}} \quad \dots\dots (2.34)$$

La partícula que se encuentra dentro de un fluido en movimiento, adopta una velocidad cercana a la velocidad del fluido, por lo tanto la velocidad del fluido expresada en la Ecuación (2.34) se asumiría como la velocidad de la partícula. Además, se puede asumir, bajo condiciones críticas, que el esfuerzo de corte crítico (τ_c) dado por la fuerza de arrastre, sea similar a la V_m^2 del fluido cerca al lecho. El coeficiente de arrastre (C_d) depende del número de Reynolds y de la forma de la partícula. De investigaciones anteriormente se ha encontrado que el coeficiente de arrastre para gravas y otras piedras grandes está alrededor de 1.5. Según Vanoni, si la partícula, en condiciones críticas, está sometida a un flujo turbulento, el valor de a_1 se aproxima al valor de a_2 . Por el contrario, cuando actúan fuerzas viscosas, el valor de a_2 se hace mayor que a_1 . De los experimentos de laboratorio, White (1940) encontró que la relación entre a_1/a_2 estaba entre 1.7 y 2.0 veces mayor que en los casos en que el flujo era laminar. Considerando que el esfuerzo cortante crítico tiene un valor constante, determinado para un flujo laminar, luego $a_1/a_2 = 0.18$. Simons y Stevens (1971) asumen que la razón entre a_1/a_2 es igual a la unidad (Kuroiwa, 1999).

2.9 Análisis Dimensional.

Hay muy pocos problemas de interés en el campo de la mecánica de fluidos que se resuelven utilizando únicamente las ecuaciones diferenciales e integrales. En casi todos los casos es necesario recurrir a métodos experimentales para establecer relaciones entre las variables de interés. Esto se hace empleando una técnica llamada análisis dimensional que se basa en el concepto de homogeneidad dimensional. En el estudio de fenómenos donde intervienen fluidos, sea analítica o experimentalmente, siempre están implicados muchos parámetros de flujo y geométricos. (Potter, Merle C./Wiggert, David C.).

La profundidad de socavación (h) depende de parámetros como , la profundidad del colchón de agua (H_{ca}), el diámetro medio del material (d_{50}), diámetro por el cual el 85% del material pasa (d_{85}), el caudal unitario (q), la velocidad de intrusión (V_i), ángulo de intrusión (θ_i), densidad del agua (ρ_w), densidad de la partícula (ρ_s), la gravedad (g). La expresión que relaciona las variables mas importantes para este estudio es:

$$h = f(H_{ca}, d_{50}, q, V_i, g, \theta_i, \rho_w, \rho_s)$$

$$[h] = L \quad [H_{ca}] = L \quad [d_{50}] = L \quad [q] = L^2 T^{-1} \quad [V_i] = L T^{-1}$$

$$[g] = L T^{-2}$$

Se escoge como variable repetitiva a $H_{ca} / \text{seno}(\theta)$ longitud de amortiguamiento, se optan por dos expresiones teniendo en cuenta la energía de impacto, así

tenemos la energía representada por el tirante critico $\left(Y_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}} \right)$ y la energía

cinética:

$$\pi_1 = \left(\frac{h}{\left(\frac{H_{ca}}{\text{seno}(\theta)} \right)} \right) \quad \pi_2 = \left(\frac{\sqrt[3]{\frac{q^2}{g}}}{\left(\frac{H_{ca}}{\text{seno}(\theta)} \right)} \right) \quad \pi_3 = \left(\frac{\left(\frac{H_{ca}}{\text{seno}(\theta)} \right)}{d_{50}} \right)$$

$$\pi_1 = \left(\frac{h}{\left(\frac{H_{ca}}{\text{seno}(\theta)} \right)} \right) \quad \pi_4 = \left(\frac{\left(\frac{V^2}{g} \right)}{\left(\frac{H_{ca}}{\text{seno}(\theta)} \right)} \right) \quad \pi_3 = \left(\frac{\left(\frac{H_{ca}}{\text{seno}(\theta)} \right)}{d_{50}} \right)$$

Las relaciones adimensionales son:

$$\pi_1 = f(\pi_2, \pi_3) \dots\dots\dots 1$$

$$\pi_1 = f(\pi_4, \pi_3) \dots\dots\dots 2$$

Entonces :

$$\frac{h}{\frac{H_{ca}}{\text{seno}(\theta)}} = f \left(\frac{\sqrt[3]{\frac{q^2}{g}}}{\frac{H_{ca}}{\text{seno}(\theta)}}; \frac{H_{ca}/\text{seno}(\theta)}{d_{50}} \right) \quad \circ$$

$$\frac{h}{\frac{H_{ca}}{\text{seno}(\theta)}} = f \left(\frac{V^2/g}{\frac{H_{ca}}{\text{seno}(\theta)}}; \frac{H_{ca}/\text{seno}(\theta)}{d_{50}} \right)$$

CAPITULO III

DESCRIPCIÓN DE MODELOS Y DATOS USADOS EN ESTE ESTUDIO

Para el presente estudio se han utilizado datos de modelos desarrollados por Hallmark (1955), Thomas (1953), y Iencastre (1961) , así como el construido en el Laboratorio Nacional de Hidráulica por la Ing. Minaya Elsa (2005) .

3.1 Descripción del arreglo de erosión.

En el modelo construido en el Laboratorio Nacional de Hidráulica los suelos usados en todas las pruebas de las cuales se obtuvieron los datos de erosión fueron no cohesivos. Sobre el lecho se colocó un colchón de arena que sirvió de amortiguador de la energía de impacto del chorro.

En el caso del modelo desarrollado en el Laboratorio Nacional de Hidráulica las pruebas fueron organizadas en tres grupos que se diferenciaban por el tipo de material usado para la conformación del lecho del cuenco estas eran: arenas gruesas, grava media y roca. Para identificarlas se trabajó con los diámetros d_{50} y d_{85} , La arena gruesa con $d_{50} = 1,60$ mm, $d_{85} = 4,81$ mm y $d_{90} = 5,96$ mm (ver Figura 3.1), la grava media con $d_{50} = 17,88$ mm, $d_{85} = 23,43$ mm y $d_{90} = 24,22$ mm del tipo anguloso (Figura 3.2), y finalmente, la roca con $d_{50} = 49,08$ mm, $d_{85} = 70,53$ mm y $d_{90} = 70,53$ mm, es denominada canto rodado (Figura 3.3).



Figura 3.1



Figura 3.2



Figura 3.3

Cuadro 3.1. Matriz de Pruebas

Fase	Prueba	Q (m ³ /s)	h _{CA} (m)	d ₅₀ (mm)	d ₈₅ (mm)
I	1	0,02	0,10	1,60	4,81
	2	0,02	0,25	1,60	4,81
	3	0,02	0,50	1,60	4,81
	4	0,02	0,05	1,60	4,81
	5	0,04	0,05	1,60	4,81
	6	0,04	0,10	1,60	4,81
	7	0,04	0,25	1,60	4,81
	8	0,04	0,50	1,60	4,81
	9	0,06	0,05	1,60	4,81
	10	0,06	0,10	1,60	4,81
	11	0,06	0,25	1,60	4,81
	12	0,06	0,50	1,60	4,81
II	1	0,02	0,05	17,88	23,43
	2	0,02	0,10	17,88	23,43
	3	0,02	0,25	17,88	23,43
	4	0,02	0,50	17,88	23,43
	5	0,04	0,05	17,88	23,43
	6	0,04	0,10	17,88	23,43
	7	0,04	0,50	17,88	23,43
	8	0,04	0,25	17,88	23,43
	9	0,06	0,05	17,88	23,43
	10	0,06	0,10	17,88	23,43
	11	0,06	0,25	17,88	23,43
	12	0,06	0,50	17,88	23,43
III	1	0,02	0,05	49,10	70,53
	2	0,02	0,10	49,10	70,53
	3	0,02	0,25	49,10	70,53
	4	0,02	0,50	49,10	70,53
	5	0,04	0,50	49,10	70,53
	6	0,04	0,05	49,10	70,53
	7	0,04	0,10	49,10	70,53
	8	0,04	0,25	49,10	70,53
	9	0,06	0,05	49,10	70,53
	10	0,06	0,50	49,10	70,53
	11	0,06	0,25	49,10	70,53
	12	0,06	0,10	49,10	70,53

Las pruebas antes mencionadas se muestran en el Cuadro 3.2 Anexo B, a continuación se describe brevemente como fueron ejecutadas:

- Una vez obtenido el material con las especificaciones deseadas se procedió a llenar el cuenco colocándolo por capas (compactando en el caso de la arena y usando rastrillos para las gravas y las boloneras). Posteriormente, el agua ingresaba al lecho del cuenco suavemente, hasta alcanzar la altura del colchón de agua deseada para cada prueba.
- Manteniendo constante el nivel de agua en el reservorio (con la altura de carga requerida). Se procedía a abrir la compuerta hasta encontrar la abertura que correspondía al caudal de ingreso. A partir de ese

instante se controlaba el tiempo con la ayuda de un cronómetro. El tiempo total de cada prueba fue de dos horas aproximadamente.

- Cuando la erosión alcanzaba mayores profundidades emergían en la superficie las bolas de color que habían sido colocadas con anterioridad en planos a diferentes profundidades, se tomaba el tiempo en el momento que estas emergían. La Figura 3.4 muestra las bolas de color amarillo y rosado que emergieron a la superficie debido al proceso de erosión.



Figura 3.4: Prueba 9. ($Q = 0,06 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_{CA} = 0,10 \text{ m}$, $d_{50} = 1,60\text{mm}$ y $d_{85} = 4,81\text{mm}$). Se observa las bolas rosadas y amarillas señal de que la erosión supero los 20 cm de profundidad del lecho.

- Las lecturas de las velocidades era uno de los procesos que más tiempo llevaba realizarlos debido a la gran cantidad de puntos de control (cuadrícula, de 30 cm x 30 cm, trazada en el cuenco) como se muestra en las láminas del Anexo A. La Figura 3.5 muestra el equipo del correntómetro de copas y veleta que indica la dirección del flujo, con este equipo se registraron los datos de velocidad del flujo.



Foto 3.5: Prueba 5. ($Q = 0,04 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_{CA} = 0,05 \text{ m}$, $d_{50} = 17,88 \text{ mm}$ y $d_{85} = 23,43 \text{ mm}$). Vista de la toma de velocidad en la zona de impacto (en el eje).

- Con la finalidad de conocer el comportamiento del chorro de agua que salía por la rápida con salto de ski, se midieron las velocidades a la salida de este (el registro se hacía con un Tubo de Pitot), como se muestra en la siguiente figura; así como también la longitud del salto, la cota de la cresta, el ángulo de incidencia, para este registro se utilizaba un transportador fabricado en acrílico y finalmente el ancho del chorro

cerca de la zona de impacto. La Figura 3.6. muestra la toma de datos de velocidad a la salida del ski de la rápida.



Figura 3.6: Fase I – Prueba 7 ($Q = 0,04 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_{CA} = 0,25 \text{ m}$, $d_{50} = 1,60 \text{ mm}$ y $d_{85} = 4,81 \text{ mm}$). Toma de datos de velocidad en la salida del ski, con el Tubo de Pitot, en tres ejes en planta y en cada eje a dos profundidades.

- Una vez finalizada cada prueba se descargaba lentamente el agua del cuenco, para ello se abría la compuerta de salida y un subdren ubicado en el fondo del cuenco. Posteriormente se procedía al levantamiento batimétrico, de acuerdo a la cuadrícula colocada en el mismo y en la zona de la poza de erosión así como también en sus alrededores de acuerdo al cambio del relieve del lecho.



Figura 3.7: Fase I - Prueba 11 ($Q = 0,06 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_{CA} = 0,25 \text{ m}$, $d_{50} = 1,60 \text{ mm}$ y $d_{85} = 4,81 \text{ mm}$). Vista del pozo de erosión después de 2 horas de prueba. La profundidad de erosión fue de $0,349 \text{ m}$.



Figura 3.8: Fase II - Prueba 5. ($Q = 0,04 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_{CA} = 0,05 \text{ m}$, $d_{50} = 17,88 \text{ mm}$ y $d_{85} = 23,43 \text{ mm}$). Vista de la poza de erosión, después de dos horas de prueba. La profundidad de erosión fue de $0,273 \text{ m}$.



Figura 3.9: Fase III - Prueba 9 ($Q = 0,06 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_{ca} = 0,05 \text{ m}$ $d_{50} = 49,08 \text{ mm}$ y $d_{85} = 70,53 \text{ mm}$). Vista de la poza de erosión, después de dos horas de prueba. La profundidad de erosión fue de $0,166 \text{ m}$.

3.2 Datos usados en este estudio.

Los datos usados de Hallmark (1955), Thomas (1953), y Lencastre (1961) para el análisis de las profundidades mínimas de colchón de agua sin cambio en la socavación inicial y sin presencia de erosión, se resumen en el Cuadro 3.1 Anexo B. Para estos estudios se usa un chorro en caída libre que a diferencia del modelo anteriormente descrito no usa el salto de ski en la salida del chorro, el rango de caudales unitarios usados va desde $0.011 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ a $0.15 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$, se usaron materiales no cohesivos para la conformación del lecho con granulometrias cuyo diámetro medio (d_{50}) varían desde 6.1 mm a 62 mm . y alturas de colchones de agua en rango de 0.004 m a 0.8 m .

CAPITULO IV

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

4.1 Relación entre la profundidad del colchón de agua y la erosión.

Los datos con los que se realiza este estudio (ver Anexo B Cuadro 3.1 y Cuadro 3.2) se dividen en grupos de diferentes características, el primero lo conforman las investigaciones de Thomas (1955), Hallmark (1953), y Lencastre (1966), quienes utilizan un chorro en caída libre; el segundo grupo de datos fueron recopilados de los ensayos realizados en el Laboratorio Nacional de Hidráulica donde se utilizó un chorro en caída libre lanzado desde un salto de Ski.

La influencia del colchón de agua en la formación de la poza de socavación debido al impacto de un chorro en caída libre se aprecia en las gráficas profundidad del colchón de agua vs profundidad de erosión, elaboradas con los datos del primer grupo para cada diámetro medio de las partículas del lecho, las curvas en las Figuras (4.1a, 4.1b, 4.1c, .4.1d) representan los puntos para los cuales el caudal unitario de salida es el mismo, en las Figuras (4.2a, 4.2b, 4.2c, 4.1d) muestra las curvas para similares velocidades de intrusión del chorro con la superficie del colchón de agua.

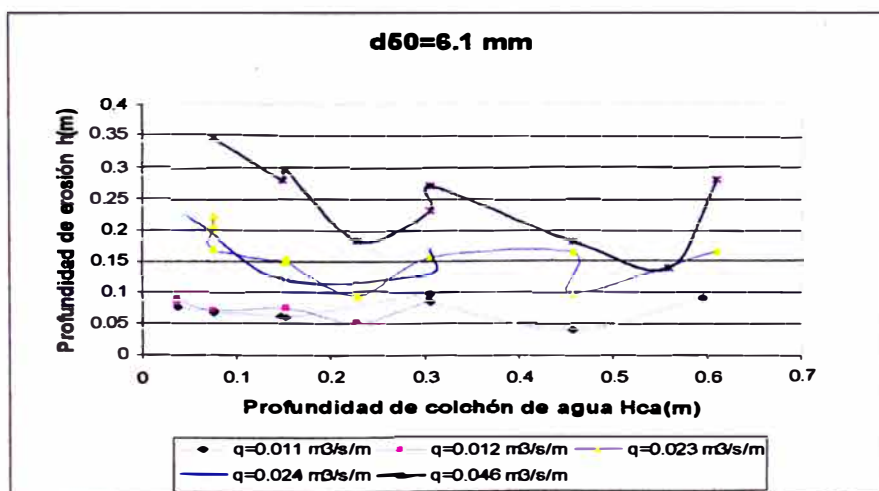


Figura 4.1.a

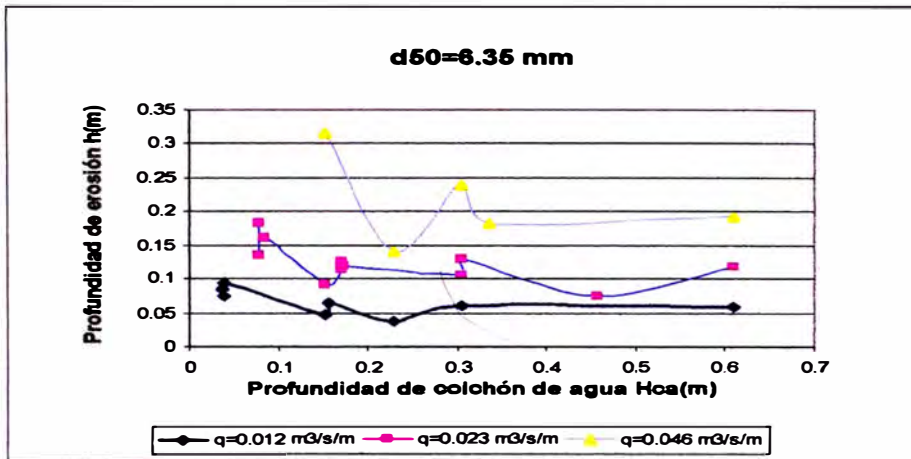


Figura 4.1.b

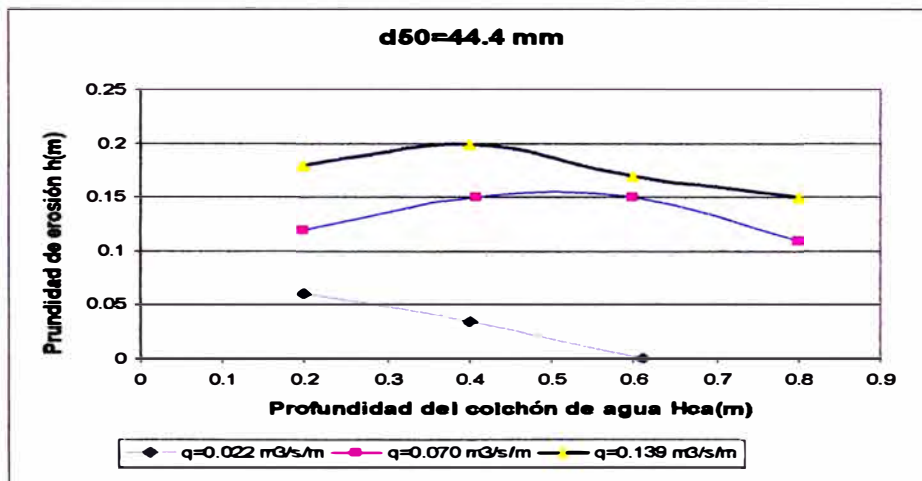


Figura 4.1.c

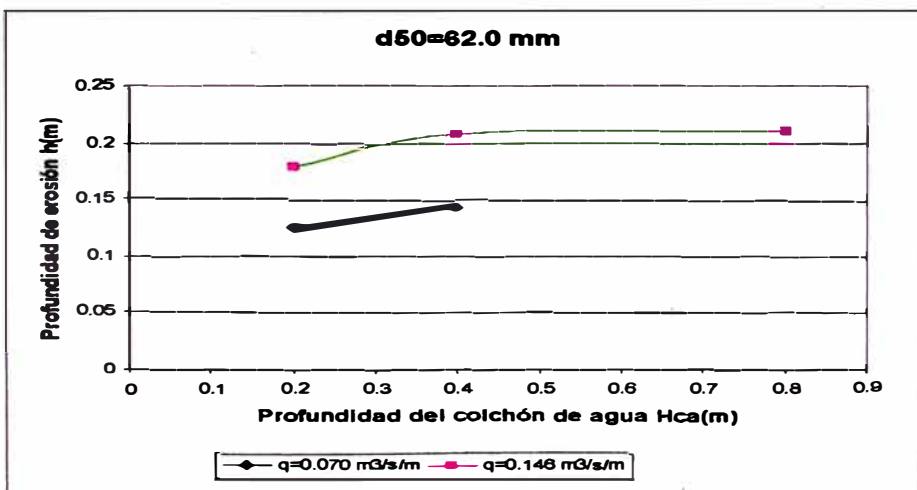


Figura 4.1.d

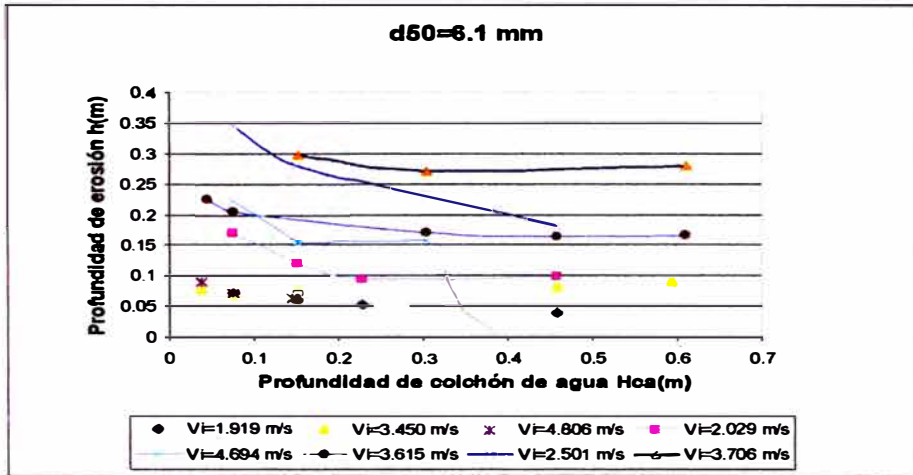


Figura 4.2.a

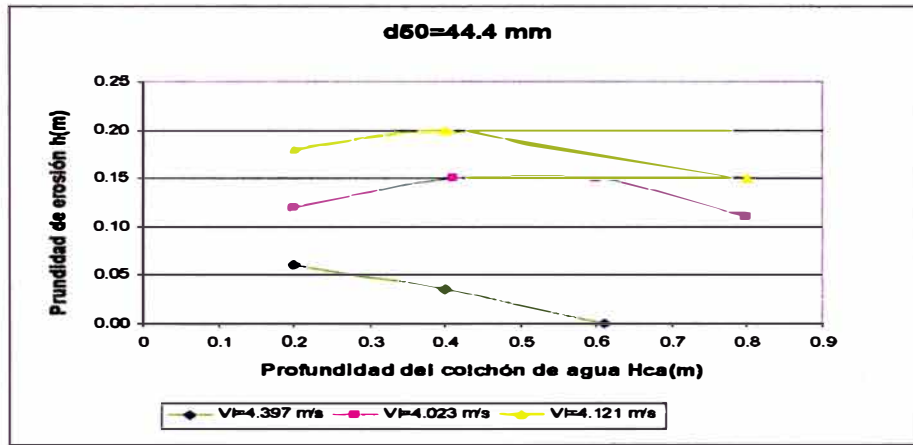


Figura 4.2.b

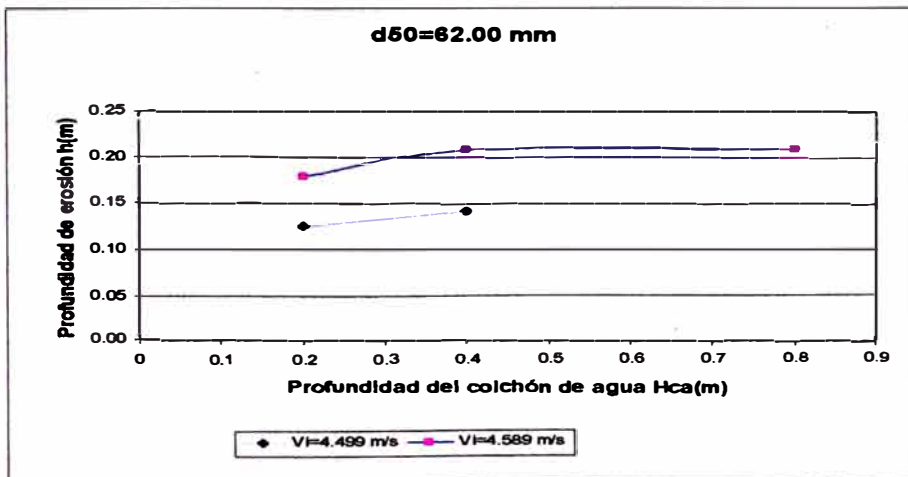


Figura 4.2.c

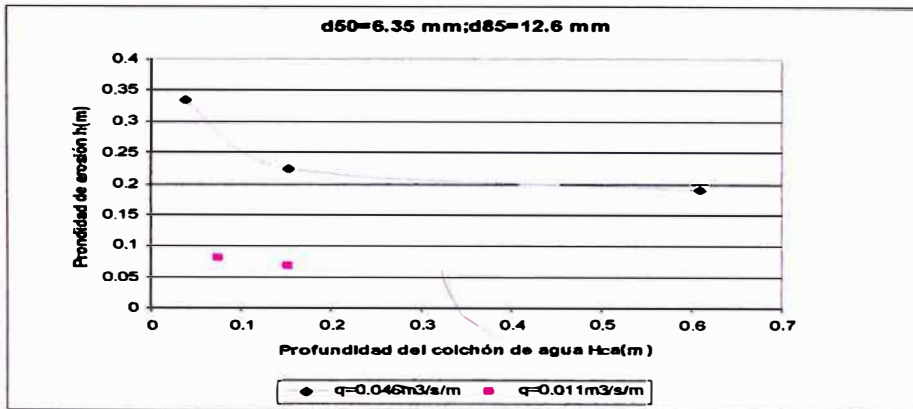


Figura 4.2.d

Debido a que las gráficas de velocidad de intrusión vs profundidad de colchón de agua tienen una mejor disposición de los puntos en las curvas, permiten extrapolar logrando así encontrar las profundidades de colchón de agua para el cual la profundidad de socavación es nula. A continuación se presentan las curvas que sirvieron para la extrapolación Figura 4.3a, 4.3b y 4.3c

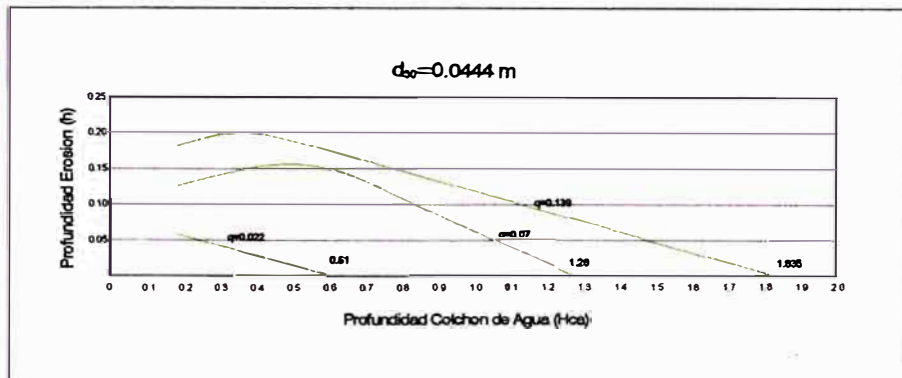


Figura 4.3.a

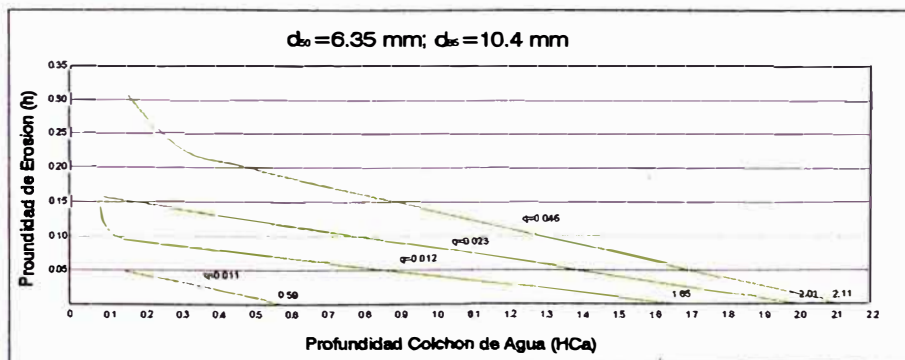


Figura 4.3.b

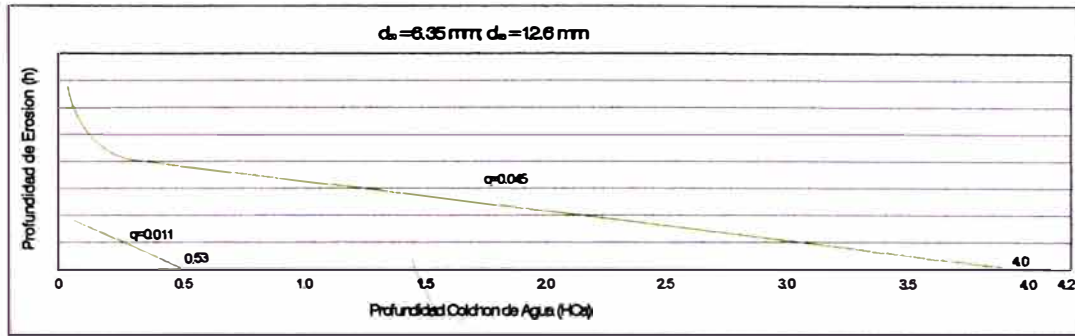


Figura 4.3.c

En el cuadro 4.1 se resumen el resultado de la extrapolación de las curvas para cada uno de las gráficas, el objetivo principal es encontrar las profundidades mínimas para el cual no se produce la erosión del lecho .

d ₅₀ (mm)	d ₈₅ (mm)	q. (m ³ /s/m)	Hca (m)
6.35	10.4	0.011	0.59
		0.012	1.85
		0.023	2.01
		0.046	2.11
6.35	12.5	0.011	0.53
		0.045	4.00*
44.4	48.0	0.022	0.61
		0.070	1.28
		0.014	1.84

● extrapolación descartada en los cálculos por ser muy grande

Cuadro 4.1

Las Figuras siguientes 4.4.a, 4.4.b como se vio en el sección 2.9 relacionan parámetros adimensionales que involucran aquellas variables de mayor importancia en el proceso de la erosión como son: la energía cinética ($V^2 o / 2g$) , la energía expresada como tirante crítico ($Yc=(q^2 / g)^{1/3}$) del chorro en la salida, la longitud de amortiguamiento (Hca/ sen(a)), el diámetro medio de la partícula del lecho (d₅₀).

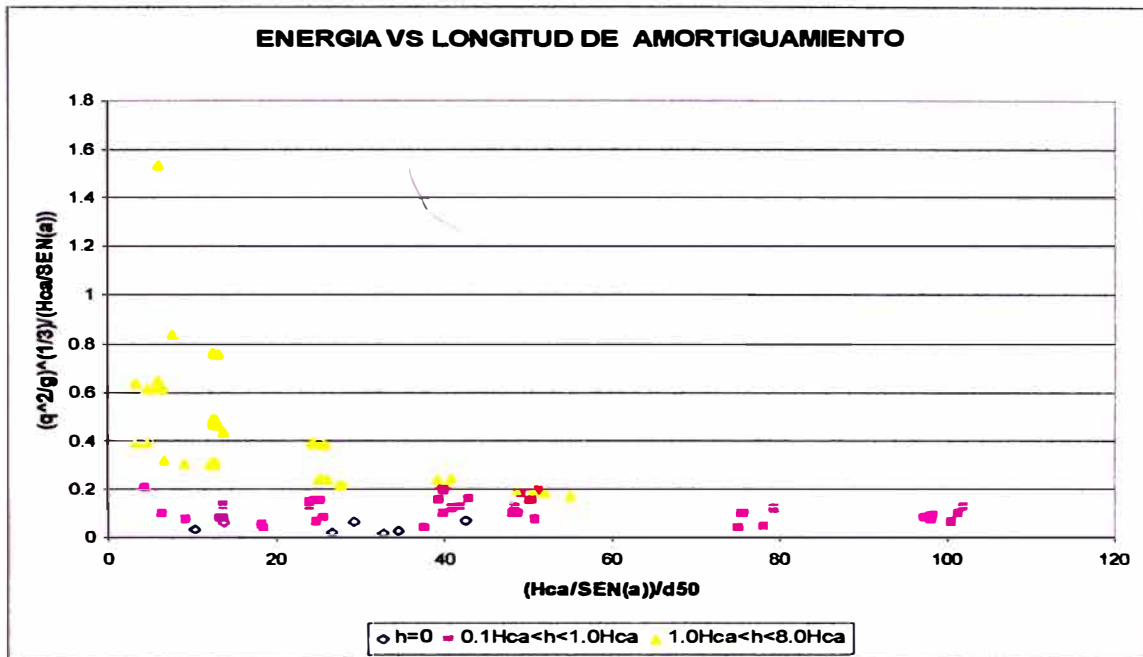


Figura 4.4.a

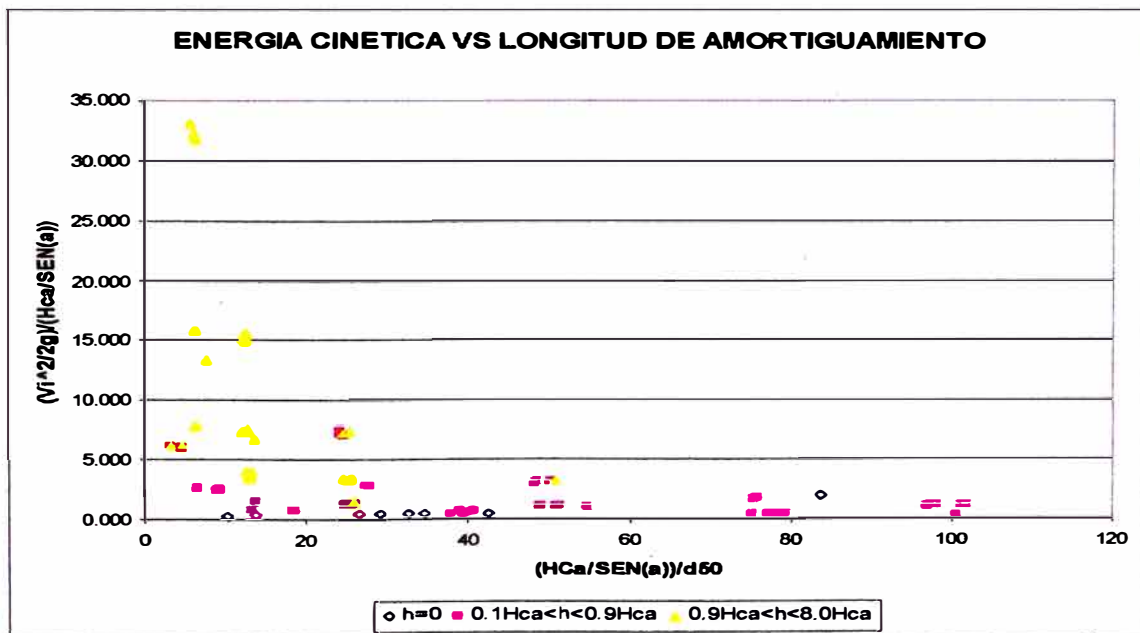
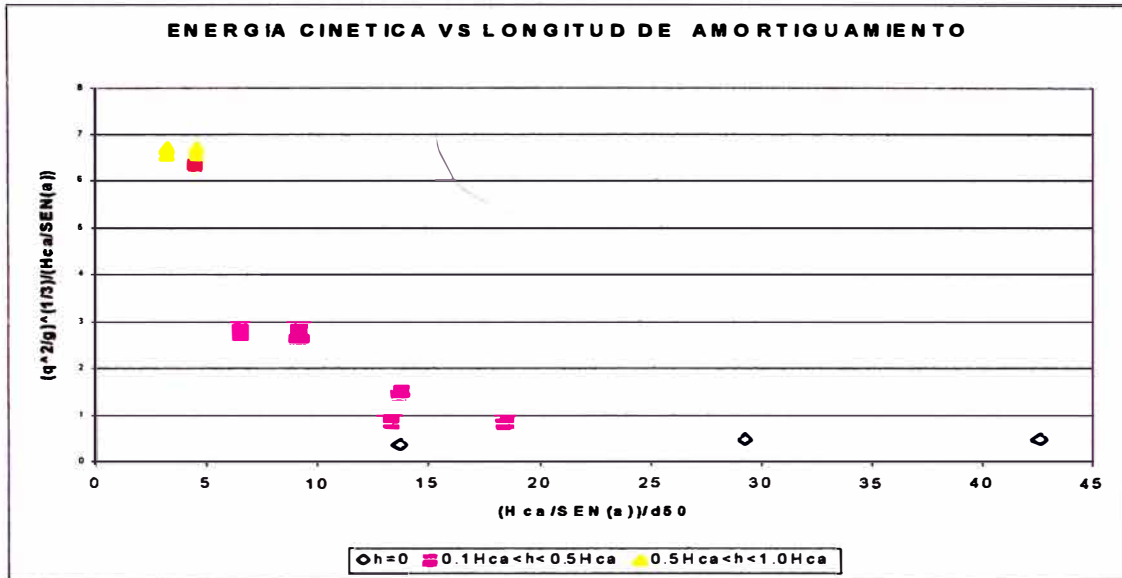


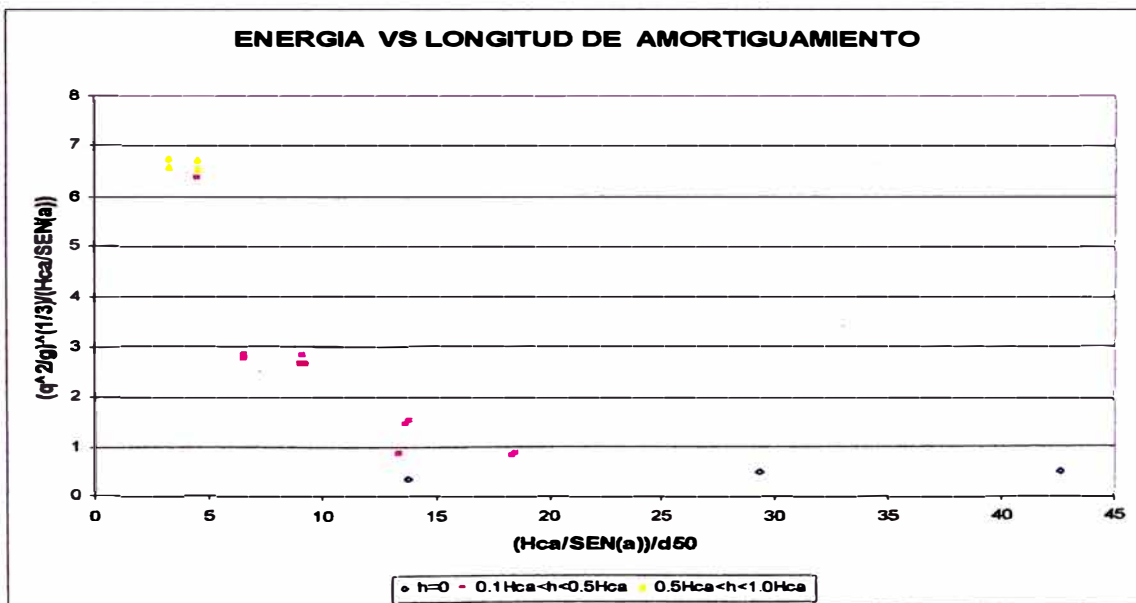
Figura 4.4.b

En las Figuras 4.2.c, 4.2.d, 4.3.c, 4.3.d las curvas tienen comportamientos similares, lo que no sucede con la otras gráficas, el diámetro medio de las

partículas en estas es mayor e igual 44,4 mm. Usando las misma variables y relaciones adimensionales se obtienen las siguientes Figuras 4.5.a y 4.5 b



4.5.a



4.5.b

En el caso de los datos del modelo en el Laboratorio Nacional de Hidráulica se consideraron cuatro valores de espesores de colchón de agua: 0,05 m, 0,10 m, 0,25 m y 0,50 m, tres descargas de 0,020 m³/s (20 L/s), 0,04 m³/s (40 L/s) y 0,06 m³/s (60 L/s) y tres granulometrías para el lecho con d₅₀ = 1,60mm, 17,88mm y 49,08mm. Los resultados se muestran en las Figuras 4.6.a, 4.6.b, y 4.6.c.

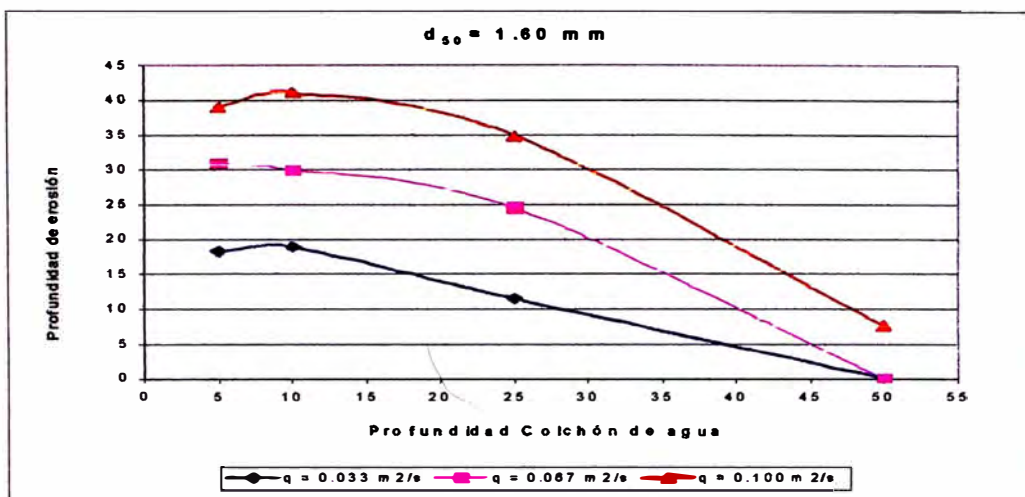


Figura 4.6.a

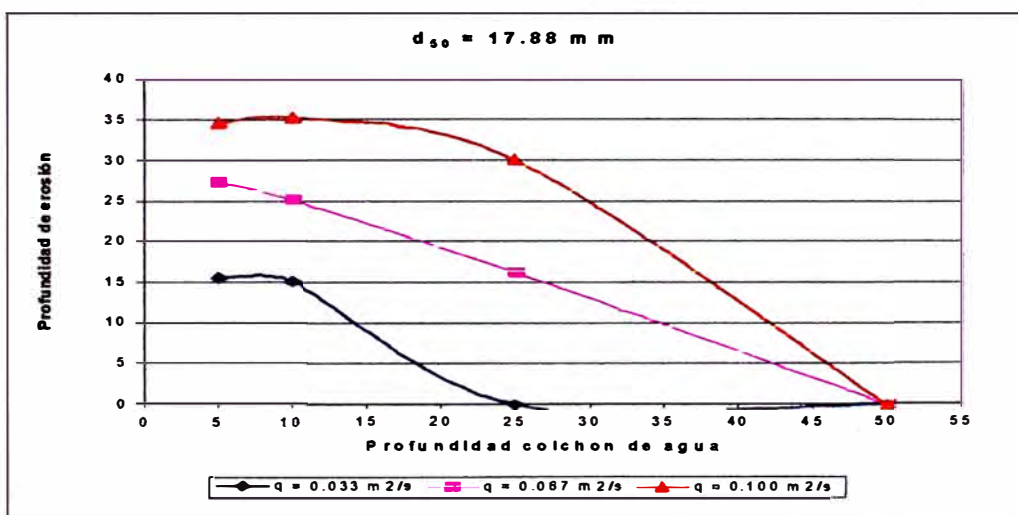


Figura 4.6.b

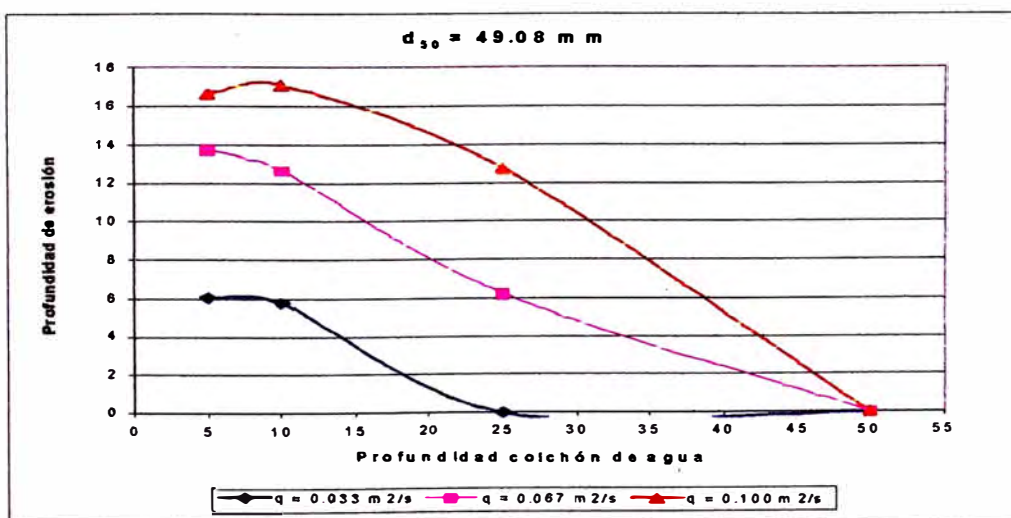


Figura 4.6.c

En las Figuras 4.7.a, 4.7.b y 4.7.c . se observa la extrapolación de las curvas de profundidad de erosión versus profundidad del colchón de agua teniendo como resultado las profundidades de colchón de agua mínimas para que la erosión del lecho sea nula

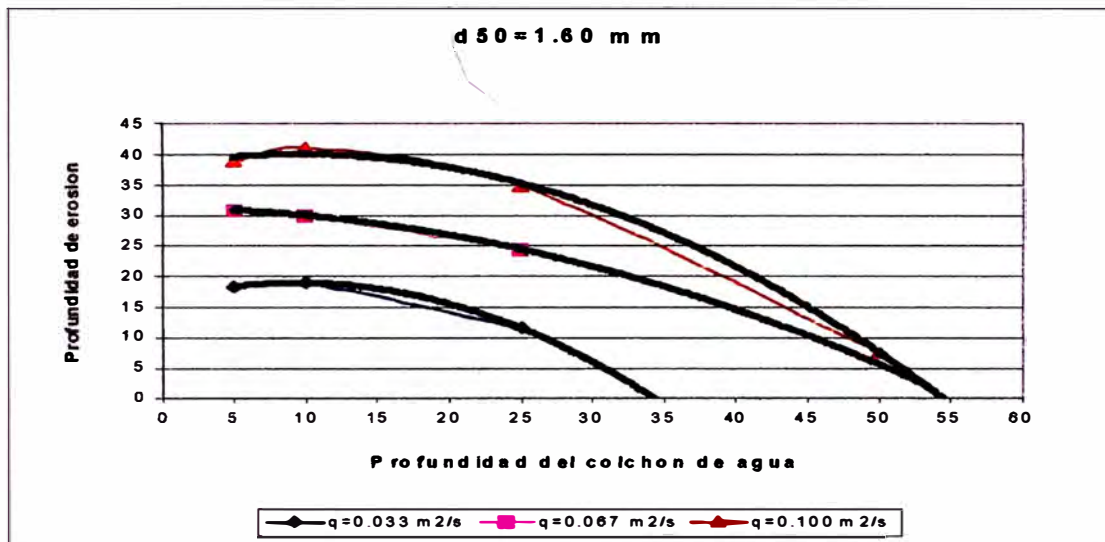


Figura 4.7.a

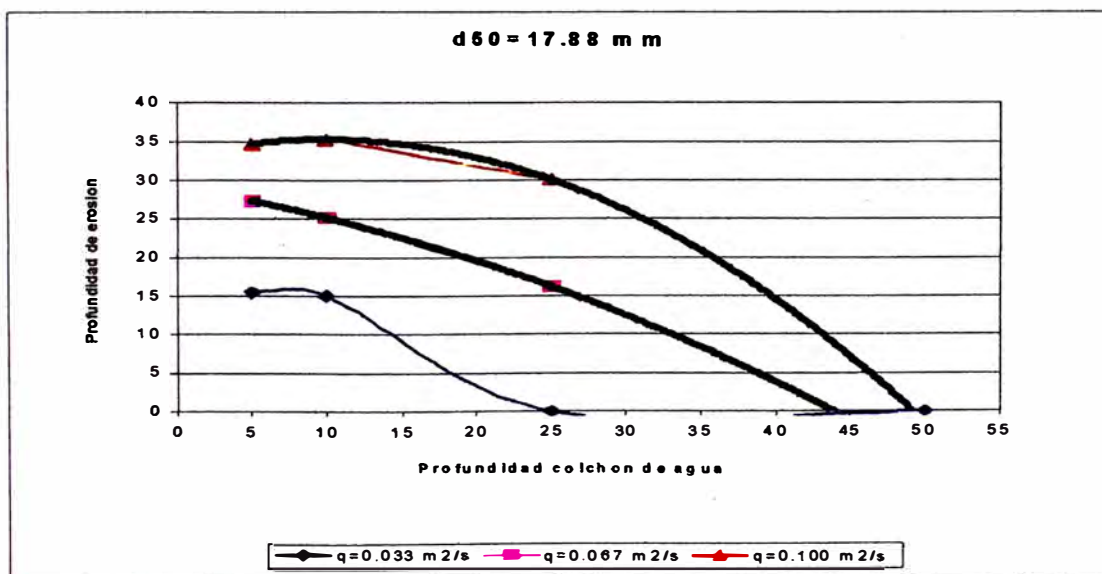


Figura 4.7.b

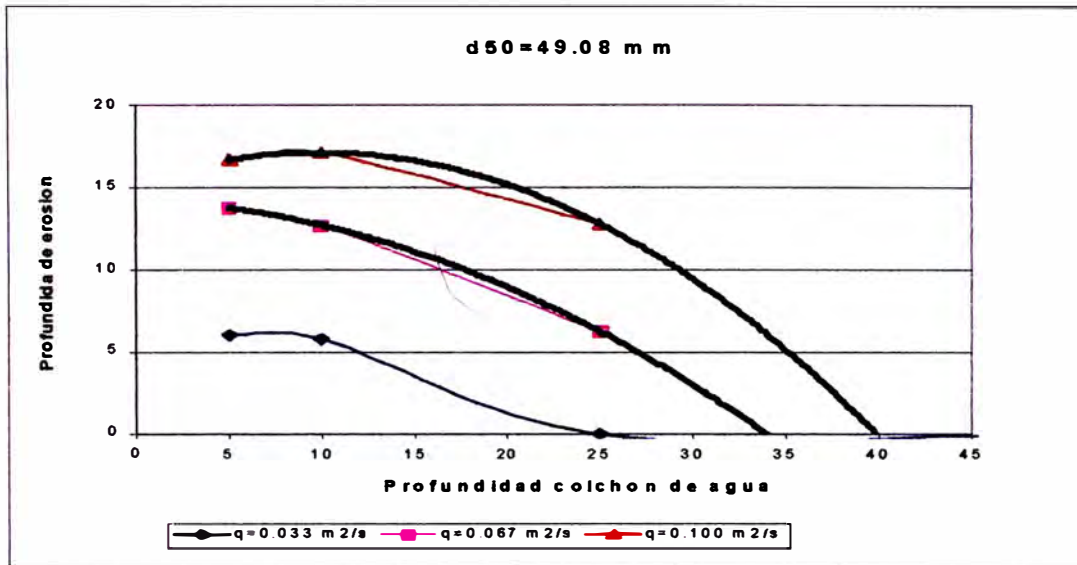


Figura 4.7.c

En el Cuadro 4.2 se resume el resultado de la extrapolación de las Figuras 4.6.a, 4.6.b, 4.6.c.

d.50(mm)	d.85(mm)	q.(m³/s/m)	H _{ca} max(m)
1.6	4.81	0.033	0.34
		0.067	0.54
		0.100	0.553
17.8	23.43	0.033	0.25
		0.067	0.44
		0.100	0.49
49.08	70.53	0.033	0.25
		0.067	0.34
		0.100	0.40

Cuadro 4.2

Una vez obtenidos las características para las cuales la profundidad de erosión es nula y relacionando los parámetros adimensionales mencionadas anteriormente se obtiene las siguientes Figuras 4.7.a , 4.7.b

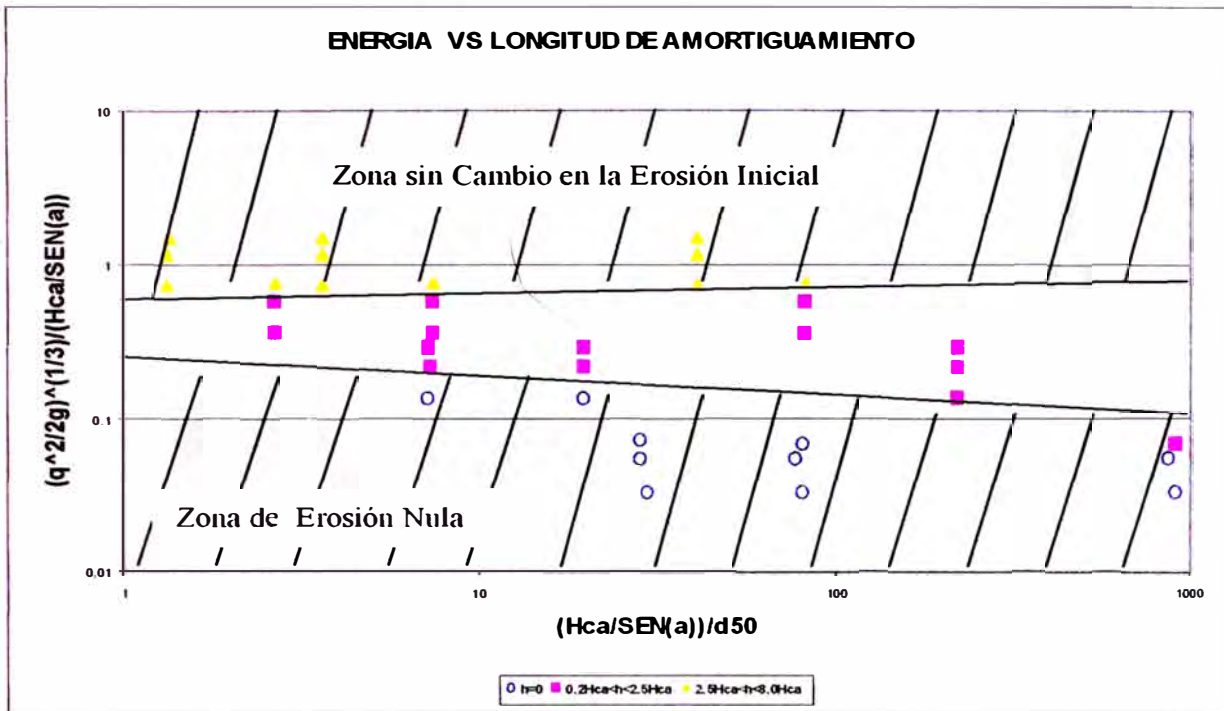


Figura 4.7.a

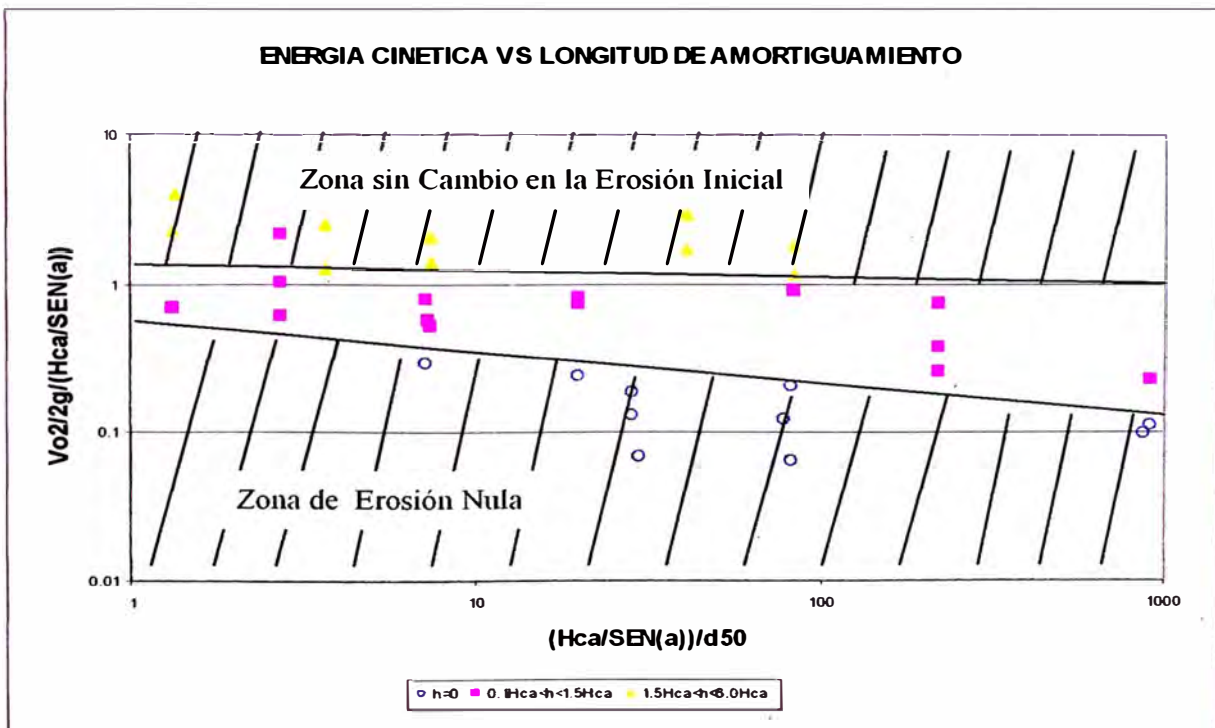


Figura 4.7.b

4.1.1 Profundidad de colchón de agua mínima sin cambio en la socavación inicial.

Las curvas en las Figuras 4.1c y 4.1d muestran que entre las profundidades de colchón de agua de 0.2 m y 0.4 m , la profundidad de socavación aumenta aproximadamente 4.0 cm en promedio , lo mismo se aprecia en las Figuras 4.6.a, 4.6.b, 4.6.c, donde para profundidades de colchón de agua entre 0.05 m y 0.10 m la profundidad de socavación tiende a aumentar o a mantenerse constante , para analizar mejor este comportamiento de la profundidad de socavación se tomaron las variables mas importantes involucradas en este proceso tales como la longitud de amortiguamiento ($H_{ca}/\text{seno}(\theta)$), la energía expresada como el tirante critico en la salida del chorro ($(q^2 / g)^{1/3}$), la energía cinética en la salida del chorro ($V^2 o / 2g$) , diámetro medio del material de lecho (d_{50}), y se procedió a combinarlas con en el fin de encontrar parámetros adimensionales que permita entender la dependencia de la profundidad de erosión y las parámetros en cuestión con una relación mas sencilla.

Con los parámetros mencionamos en la sección 2.9 se elaboran las figuras donde se aprecian que aquellos puntos donde la profundidad de la socavación aumenta cuando la profundidad del colchón de agua aumenta se ubican en la parte mas alta. Las Figuras 4.4.a y 4.4.b muestran que los puntos para los cuales la profundidad de socavación resulto mayor que la profundidad de colchón de agua se encuentran el parte mas alta, en las Figuras 4.5.a y 4.5.b se verifica que los puntos para los cuales la relación de la energía expresada como tirante critico así como la energía cinética entre longitud de amortiguamiento adquieren los valores mas altos, son los mismos que en las Figuras 4.1.c y 4.1.d pertenecen a la zona donde la profundidad de socavación aumenta cuando se incrementa la profundidad del colchón de agua; lo mismo ocurre en las Figuras 4.8.a y 4.8.b con los puntos que en las Figuras 4.6.a, 4.6.b y 4.6.c también presentan la particularidad de que a mayor profundidad del colchón de agua se incrementa o se mantiene constante la profundidad de socavación. En las graficas Energía Cinética vs Longitud de Amortiguamiento se nota mayor dispersión de los puntos que en las gráficas de Energía expresada como tirante critico vs Longitud de Amortiguamiento, por lo que se optó para este estudio analizar estas ultimas figuras.

4.1.2 Profundidad de colchón de agua mínima sin presencia de socavación.

De las Cuadros 4.1 y 4.2 tenemos las profundidades de colchón de agua mínima para las cuales no hay presencia de socavación, en las Figuras 4.4.a, 4.4.b, 4.5.a, 4.5.b, 4.6.a y 4.6.b se aprecia que la relación entre la energía cinética y la longitud de amortiguamiento así como la relación entre el tirante crítico y la profundidad de amortiguamiento adquieren los valores mas bajos por lo que se ubican en la parte mas inferior de la grafica.

En el caso de la Figuras 4.5.a y 4.5.b los puntos para los cuales la profundidad de socavación es cero tienen los valores mas bajos de la relación entre la energía cinética o tirante critico entre la longitud de amortiguamiento; para las Figuras 4.7.a y 4.7.b se aprecia que hay dos puntos ubicados en la zona donde se encuentran los puntos con profundidad de socavación igual a cero, el primero con una profundidad de socavación igual a 11, 54 cm, un caudal unitario igual a 0,033 m³/s/m, diámetro medio igual a 1,6 mm, y una profundidad de colchón de agua de 0,25 m , el segundo punto tiene una profundidad de socavación igual a 7.64, caudal unitario de 0,10 m³/s/m, y profundidad de colchón de agua de 0,5 .

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones.

En el proceso de la formación de la poza de socavación debido al impacto de un chorro en caída libre en lechos de suelos no cohesivos se encuentran involucradas muchas variables, de las cuales el caudal unitario, la profundidad del colchón de agua y el diámetro medio de las partículas resultan ser en este estudio unas de los más importantes.

Al usar profundidades de colchones de agua cada vez menores manteniendo constante otras variables se espera que la profundidad de socavación se incremente cada vez mas, en el análisis de los datos por medio de gráficas de profundidad de socavación versus profundidad del colchón de agua se observa para todos los ensayos que esta profundidad se mantiene constante una vez alcanzadas ciertas condiciones. En los ensayos realizados por Thomas se pone de manifiesto que para caudales unitarios altos y diámetros de la partículas muy pequeños, las profundidades de socavación tienen un comportamiento errático para pequeñas profundidades de colchón de agua, además las gráficas muestran claramente como la profundidad de socavación pierde su tendencia a aumentar y se mantiene en un rango de valores.

La energía con la que es lanzada el chorro de agua es amortiguada por el colchón, cuando se trata de pequeñas profundidades esta energía prácticamente no se disipa y llega intacta a erosionar el lecho produciendo profundidades de socavación similares. En el análisis de la relación entre la energía del chorro y la capacidad de amortiguamiento del agua, se hace evidente en las graficas que los valores para el cual las profundidades de socavación iniciales no cambian, la energía neta que remueve las partículas del lecho son mucho mayores comparadas con la capacidad de amortiguamiento; esta situación se mantiene hasta alcanzar una longitud de amortiguamiento con la cual empieza la disminución de la profundidad de socavación; en el presente estudio el valor de la relación entre la energía de impacto y la capacidad de amortiguamiento cuando empieza la disminución de la profundidad de socavación, en el caso de los ensayos de Lencastre el valor es mayor que 0.4 y para los ensayos de

Minaya es mayor que 0.7 ; la diferencia de estos valores podría deberse a que el chorro impacta en la superficie del colchón de agua con ángulos muy diferentes para cada caso, para Lencastre donde el valor es menor, el ángulo es casi vertical lo que hace que la longitud de amortiguamiento no sea muy diferente al la profundidad del colchón de agua y la energía que llega al fondo remueve de forma mas eficiente las partículas del lecho, mientras que en el caso de los datos de Minaya el chorro impacta con ángulos menores que van desde 20° a 50° situación que provoca que la capacidad de amortiguamiento sea menor para poder alcanzar la profundidad mínima sin cambio en la socavación . La profundidad del colchón de agua alcanza un valor tal, que la energía con la que impacta el chorro sobre la superficie es amortiguada totalmente, la energía de impacto es en este caso mucho menor a la capacidad de amortiguamiento y el valor de la relación entre ambos factores tiene sus valores mínimos Se debe tener presente que para diámetros muy pequeños de las partículas, las profundidades de la socavación se comportan de manera errática, situación por la que a pesar de producirse la socavación, la relación entre la energía de impacto y la capacidad de amortiguamiento puede resultar menor que para los casos de socavación nula (ensayo de Minaya para diámetro medio de 1.6 mm) . La relación entre la capacidad de amortiguamiento y la característica del material del lecho en los casos de profundidades de colchón de agua para los cuales no hay cambio en la socavación inicial se encuentran en un rango corto con valores pequeños debido a que las profundidades de colchón usados en los ensayos son los menores además que la mayoría de los ensayos usados para este estudio consideraron valores muy pequeños de estas profundidades que no llegaron a cambiar significativamente la socavación inicial (ensayos de Thomas y Hallmark) . En el caso de socavación nula el rango se hace mas grande y alcanza valores mas altos, debido a la falta de datos de los ensayos con socavación nula se usaron en este estudio datos extrapolados los que dieron como resultados profundidades de colchón de agua grandes para la socavación nula para los diferentes diámetros las mismas que produjeron valores altos de la relación antes mencionada.

Recomendaciones.

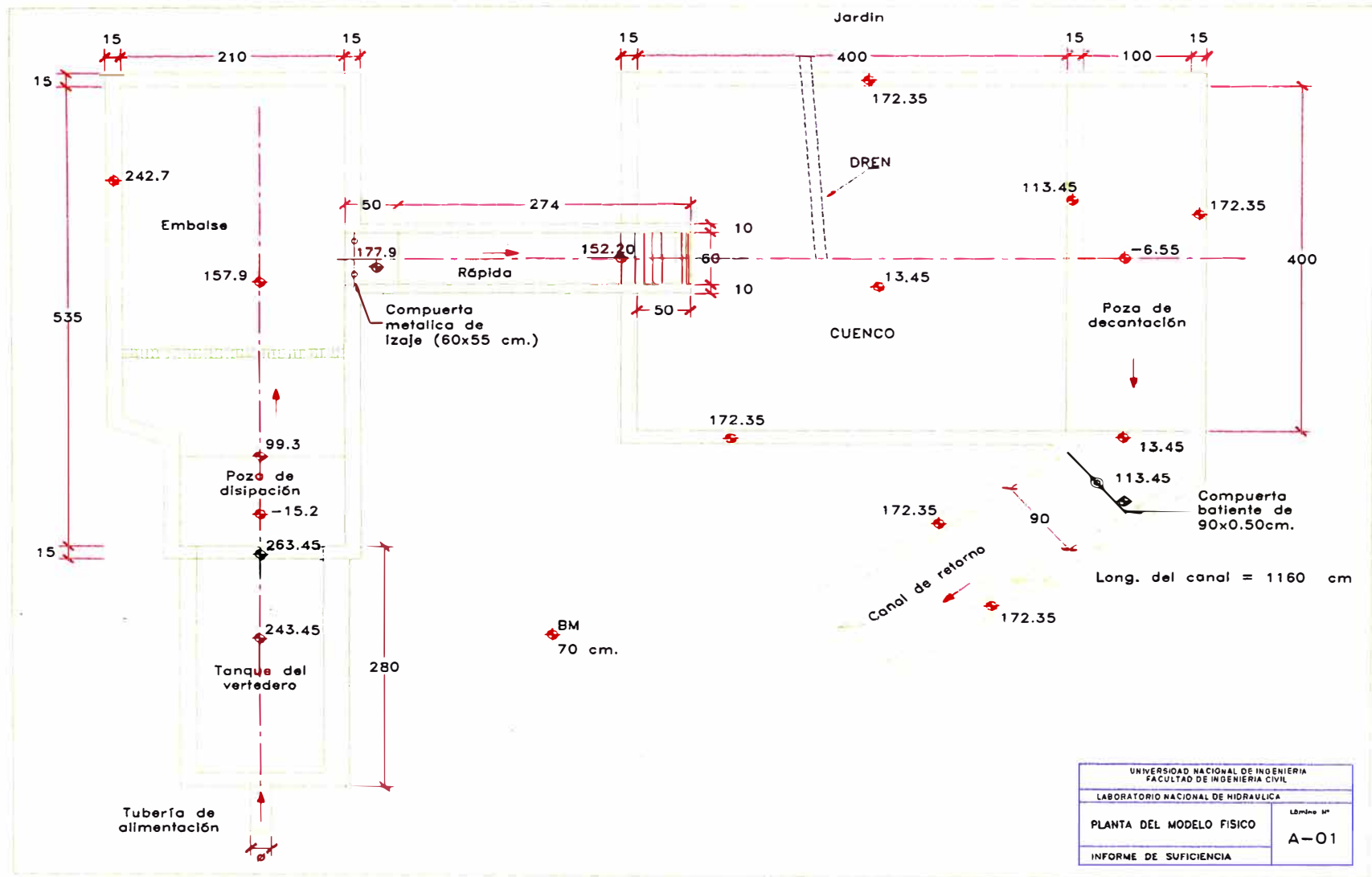
En el caso de profundidades de colchón de agua sin cambio en la socavación inicial para el siguiente estudio en los ensayos de Thomas y Hallmark las profundidades del colchón de agua no disiparon la energía del chorro como para causar un cambio en la socavación inicial (energía mucho mayor que la capacidad de amortiguamiento), por lo que se recomendaría para posteriores investigaciones usar profundidades de colchón de agua mas grandes si se van a usar diámetros medios del material del lecho parecidos a los usados en estos ensayos asi se tiene que para D_{50} igual a 6.1 mm , 6.35 mm y caudales unitarios mayores a 0.11 m³/s/m se deben usar profundidades de colchón de agua mayores a 0.6 m. En los ensayos de Lencastre para D_{50} igual a 44.4 mm y caudales unitarios mayores a 0.11 m³/s/m se encontró una zona donde el colchón de agua logra iniciar el cambio en la socavación inicial se recomienda en este caso realizar mas ensayos usando profundidades en el rango de 0.2 m a 0.6 m. En los ensayos de Minaya se consigue esta disipación de energía pero la cantidad de datos no es suficiente como para determinar con precisión la profundidad para la cual la profundidad de erosión inicial cambia , seria por consiguiente recomendable realizar ensayos con una mayor frecuencia de profundidades de colchón en el rango donde se produce el cambio en la socavación inicial asi se tiene que para D_{50} igual a 1.8 mm , 16.88 mm y 48.08 mm y caudales unitarios de 0.033 m³/s/m y 0.067 m³/s/m se deben usar para profundidades de colchón de agua en el rango de 0 a 0.10 m incrementos de 0.02 m , en el caso del caudal unitario de 0.10 m³/s/m el rango a usarse va desde 0 a 0.15 m .

Para la socavación nula se uso la extrapolación en la mayoría de los ensayos observando una variación sustantiva entre las profundidades del colchón de agua halladas y las obtenidas en los ensayos, debido principalmente a que las curvas de las graficas fueron construidas con pocos puntos por consiguiente errores en la estimación de la tendencia de la curva ,es recomendable que las profundidades del colchón de agua en las cercanías de socavaciones nulas (Cuadro 4.1 y 4.2) se tomen con mayor frecuencia en los ensayos.

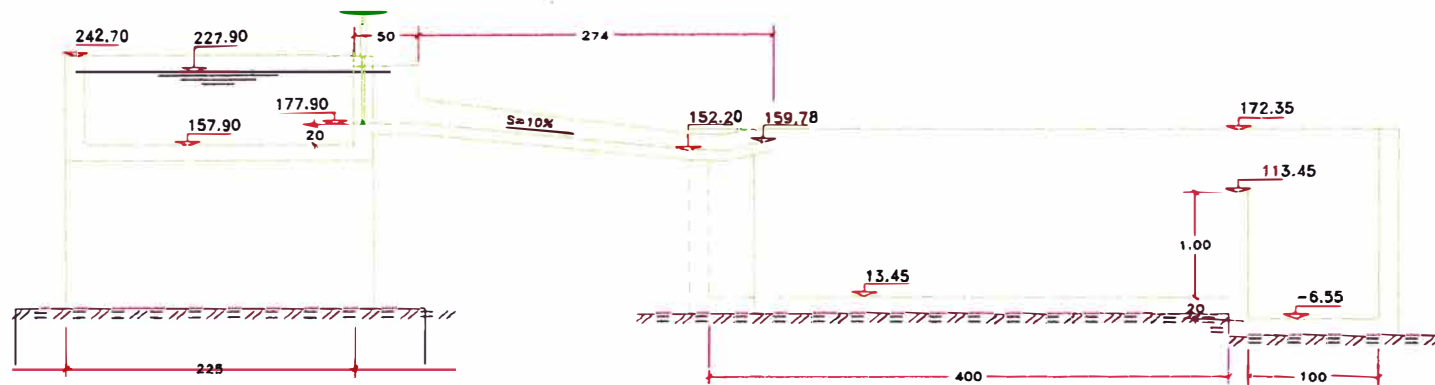
ANEXO

A

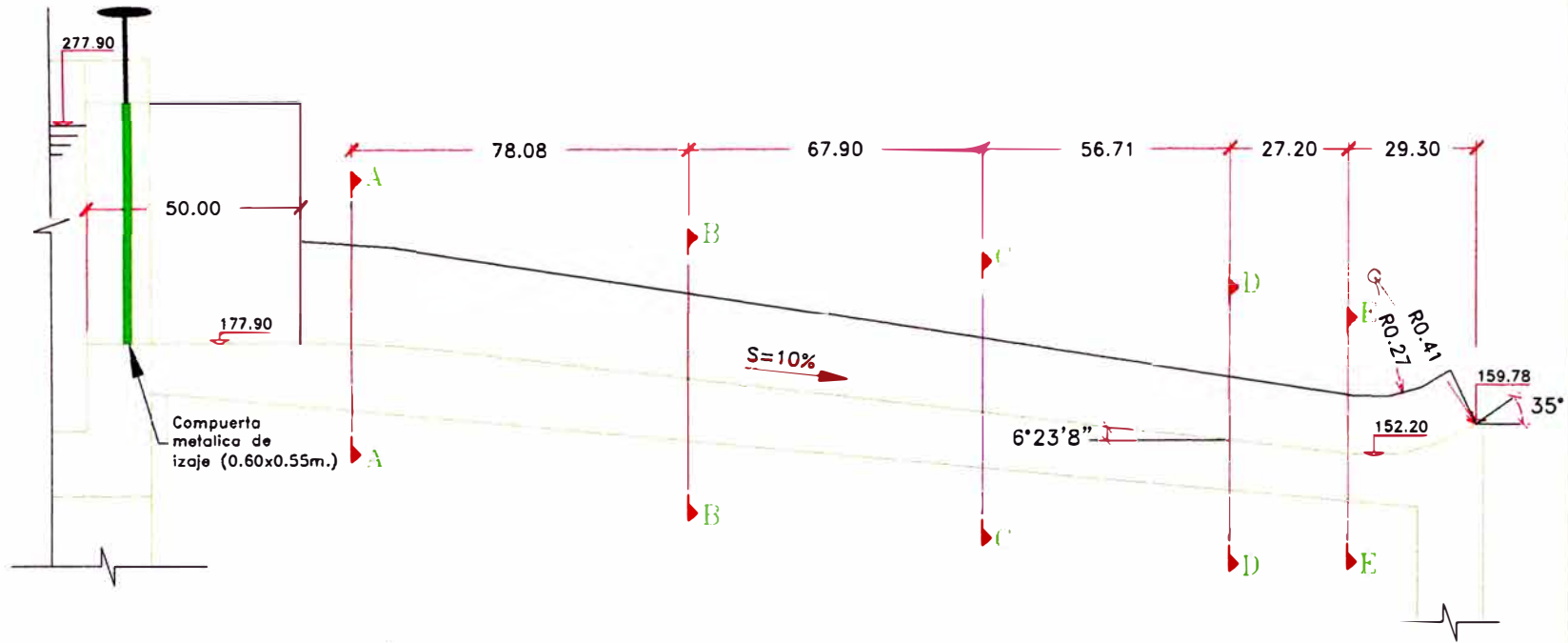
LAMINAS DEL MODELO HIDRAULICO Y RÁPIDA EN
PLANTA Y PERFIL



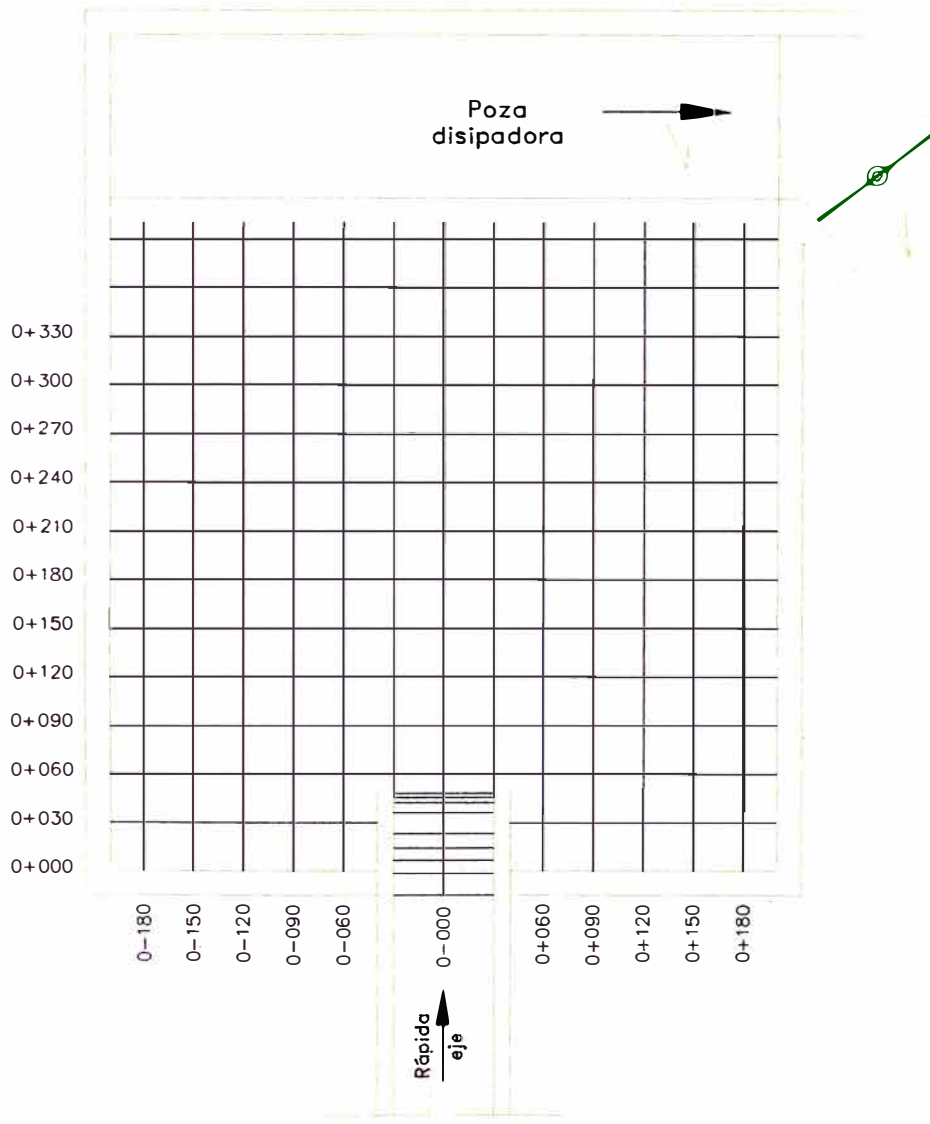
UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL	
LABORATORIO NACIONAL DE HIDRAULICA	
PLANTA DEL MODELO FISICO	Lámina N° A-01
INFORME DE SUFICIENCIA	



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL	
LABORATORIO NACIONAL DE HIDRAULICA	
PERFIL EN EL EJE DE LA RAPIDA	Lamina N° A-02
INFORME DE SUFICIENCIA	



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL	
LABORATORIO NACIONAL DE HIDRAULICA	
PERFIL LONGITUDINAL DE LA RAPIDA	Lb ^{mo} N° A-03
INFORME DE SUFICIENCIA	



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL	
LABORATORIO NACIONAL DE HIDRAULICA	
PERFIL EN EL EJE DE LA RAPIDA	Lámina N° A-04
INFORME DE SUFICIENCIA	

ANEXO B

DATOS RECOLECTADOS DEL PROCESO DE EROSION

CUADRO 4.1. Datos usados en este estudio para chorros compactos

	q	h	bo	Ref depth	dz	z	alpha	Vo	VI	bl	H	Cos d	d86	d60	Hca	G	T	z/bo
	(m ² /s)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(deg)	(m/s)	(m/s)	(m)	(m)		(m)	(m)	(m)		oC	
Hallmark A	0.045	0.190	0.059	0.059	0.610	0.639	90	0.763	3.622	0.027	0.669	0.9785	0.0126	0.0064	0.610	2.650	10.0	10.278
Hallmark A	0.045	0.334	0.059	0.059	1.181	1.211	90	0.762	4.932	0.023	1.240	0.9883	0.0126	0.0064	0.038	2.650	10.0	19.940
Hallmark A	0.046	0.238	0.060	0.060	1.067	1.097	90	0.770	4.702	0.024	1.127	0.9869	0.0126	0.0064	0.152	2.650	10.0	17.673
Hallmark A	0.012	0.073	0.025	0.025	0.610	0.622	90	0.494	3.527	0.009	0.634	0.9903	0.0126	0.0064	0.610	2.650	10.0	24.539
Hallmark A	0.012	0.067	0.024	0.024	1.067	1.079	90	0.485	4.625	0.008	1.091	0.9946	0.0126	0.0064	0.152	2.650	10.0	44.533
Hallmark A	0.011	0.079	0.023	0.023	0.914	0.926	90	0.480	4.289	0.008	0.938	0.9938	0.0126	0.0064	0.305	2.650	10.0	39.008
Hallmark A	0.011	0.080	0.023	0.023	1.143	1.155	90	0.480	4.783	0.007	1.166	0.9950	0.0126	0.0064	0.076	2.650	10.0	48.759
Hallmark A	0.046	0.225	0.060	0.060	1.067	1.097	90	0.768	4.701	0.024	1.127	0.9869	0.0126	0.0064	0.152	2.650	10.0	17.720
Hallmark A	0.046	0.278	0.060	0.060	1.067	1.097	90	0.768	4.701	0.024	1.127	0.9869	0.0126	0.0064	0.152	2.650	10.0	17.720
Thomas I	0.012	0.083	0.024	0.024	0.279	0.291	90	0.485	2.436	0.011	0.303	0.9808	0.0071	0.0061	0.038	2.650	10.0	11.633
Thomas I	0.012	0.073	0.025	0.025	0.241	0.253	90	0.491	2.282	0.011	0.265	0.9776	0.0071	0.0061	0.076	2.650	10.0	9.797
Thomas I	0.011	0.062	0.024	0.024	0.164	0.176	90	0.481	1.919	0.012	0.188	0.9700	0.0071	0.0061	0.152	2.650	10.0	6.966
Thomas I	0.012	0.052	0.024	0.024	0.088	0.100	90	0.485	1.483	0.014	0.112	0.9505	0.0071	0.0061	0.229	2.650	10.0	3.681
Thomas I	0.023	0.171	0.038	0.038	0.248	0.267	90	0.611	2.367	0.019	0.286	0.9683	0.0071	0.0061	0.076	2.650	10.0	6.512
Thomas I	0.024	0.120	0.038	0.038	0.172	0.191	90	0.613	2.029	0.021	0.210	0.9572	0.0071	0.0061	0.152	2.650	10.0	4.476
Thomas I	0.023	0.094	0.038	0.038	0.095	0.114	90	0.610	1.616	0.023	0.133	0.9355	0.0071	0.0061	0.229	2.650	10.0	2.509
Thomas I	0.046	0.345	0.060	0.060	0.259	0.289	90	0.768	2.501	0.033	0.319	0.9559	0.0071	0.0061	0.076	2.650	10.0	4.297
Thomas I	0.046	0.280	0.060	0.060	0.186	0.216	90	0.769	2.196	0.036	0.246	0.9438	0.0071	0.0061	0.149	2.650	10.0	3.079
Thomas I	0.046	0.183	0.060	0.060	0.106	0.137	90	0.770	1.808	0.039	0.167	0.9202	0.0071	0.0061	0.229	2.650	10.0	1.762
Thomas I	0.011	0.079	0.024	0.024	0.583	0.595	90	0.482	3.450	0.009	0.607	0.9904	0.0071	0.0061	0.038	2.650	10.0	24.615
Thomas I	0.011	0.071	0.024	0.024	0.545	0.557	90	0.482	3.340	0.009	0.569	0.9897	0.0071	0.0061	0.076	2.650	10.0	23.007
Thomas I	0.012	0.076	0.024	0.024	0.466	0.478	90	0.489	3.102	0.010	0.491	0.9878	0.0071	0.0061	0.152	2.650	10.0	19.161
Thomas I	0.013	0.090	0.026	0.026	0.318	0.331	90	0.509	2.599	0.012	0.344	0.9813	0.0071	0.0061	0.305	2.650	10.0	12.025
Thomas I	0.011	0.038	0.024	0.024	0.164	0.176	90	0.482	1.920	0.012	0.188	0.9699	0.0071	0.0061	0.457	2.650	10.0	6.931
Thomas I	0.024	0.226	0.039	0.039	0.580	0.600	90	0.617	3.484	0.016	0.619	0.9847	0.0071	0.0061	0.046	2.650	10.0	14.942
Thomas I	0.023	0.205	0.038	0.038	0.552	0.571	90	0.609	3.402	0.016	0.590	0.9843	0.0071	0.0061	0.076	2.650	10.0	14.602
Thomas I	0.023	0.151	0.038	0.038	0.480	0.499	90	0.611	3.188	0.017	0.518	0.9821	0.0071	0.0061	0.151	2.650	10.0	12.627
Thomas I	0.024	0.131	0.038	0.038	0.324	0.343	90	0.613	2.666	0.018	0.362	0.9745	0.0071	0.0061	0.305	2.650	10.0	8.452
Thomas I	0.023	0.099	0.038	0.038	0.174	0.193	90	0.610	2.041	0.021	0.212	0.9581	0.0071	0.0061	0.457	2.650	10.0	4.599
Thomas I	0.047	0.298	0.061	0.061	0.488	0.518	90	0.771	3.279	0.029	0.548	0.9734	0.0071	0.0061	0.152	2.650	10.0	8.044
Thomas I	0.046	0.231	0.060	0.060	0.335	0.365	90	0.769	2.784	0.032	0.395	0.9639	0.0071	0.0061	0.305	2.650	10.0	5.556
Thomas I	0.046	0.180	0.060	0.060	0.183	0.213	90	0.770	2.183	0.036	0.243	0.9431	0.0071	0.0061	0.457	2.650	10.0	3.025
Thomas I	0.046	0.141	0.060	0.060	0.082	0.112	90	0.769	1.670	0.041	0.142	0.9083	0.0071	0.0061	0.558	2.650	10.0	1.360
Thomas I	0.012	0.089	0.024	0.024	1.193	1.205	90	0.486	4.886	0.008	1.217	0.9951	0.0071	0.0061	0.038	2.650	10.0	49.543
Thomas I	0.011	0.073	0.023	0.023	1.155	1.166	90	0.476	4.806	0.007	1.178	0.9951	0.0071	0.0061	0.076	2.650	10.0	50.083
Thomas I	0.011	0.063	0.023	0.023	1.084	1.096	90	0.474	4.660	0.007	1.107	0.9949	0.0071	0.0061	0.146	2.650	10.0	47.306
Thomas I	0.011	0.098	0.023	0.023	0.926	0.937	90	0.474	4.314	0.008	0.949	0.9940	0.0071	0.0061	0.305	2.650	10.0	40.392
Thomas I	0.010	0.083	0.022	0.022	0.773	0.784	90	0.465	3.949	0.008	0.795	0.9932	0.0071	0.0061	0.457	2.650	10.0	35.139
Thomas I	0.011	0.086	0.023	0.023	0.926	0.937	90	0.474	4.314	0.008	0.949	0.9940	0.0071	0.0061	0.305	2.650	10.0	40.392
Thomas I	0.011	0.091	0.023	0.023	0.636	0.648	90	0.477	3.597	0.008	0.660	0.9913	0.0071	0.0061	0.594	2.650	10.0	27.453
Thomas I	0.023	0.223	0.038	0.038	1.162	1.181	90	0.607	4.850	0.013	1.199	0.9923	0.0071	0.0061	0.076	2.650	10.0	30.965
Thomas I	0.023	0.155	0.038	0.038	1.086	1.105	90	0.608	4.694	0.014	1.123	0.9917	0.0071	0.0061	0.152	2.650	10.0	28.781
Thomas I	0.023	0.152	0.038	0.038	1.086	1.105	90	0.608	4.694	0.014	1.123	0.9917	0.0071	0.0061	0.152	2.650	10.0	28.781
Thomas I	0.024	0.171	0.039	0.039	0.934	0.954	90	0.620	4.369	0.015	0.973	0.9901	0.0071	0.0061	0.305	2.650	10.0	23.806
Thomas I	0.022	0.157	0.036	0.036	0.933	0.951	90	0.598	4.360	0.014	0.969	0.9907	0.0071	0.0061	0.305	2.650	10.0	25.559
Thomas I	0.023	0.165	0.038	0.038	0.781	0.800	90	0.611	4.008	0.015	0.819	0.9886	0.0071	0.0061	0.457	2.650	10.0	20.539
Thomas I	0.023	0.166	0.038	0.038	0.629	0.648	90	0.610	3.615	0.016	0.666	0.9861	0.0071	0.0061	0.610	2.650	10.0	16.574
Thomas I	0.046	0.272	0.060	0.060	0.944	0.974	90	0.767	4.438	0.025	1.004	0.9854	0.0071	0.0061	0.305	2.650	10.0	15.750
Thomas I	0.046	0.281	0.060	0.060	0.640	0.670	90	0.770	3.706	0.028	0.700	0.9791	0.0071	0.0061	0.610	2.650	10.0	10.599
Thomas II	0.012	0.074	0.024	0.024	0.279	0.291	90	0.485	2.436	0.011	0.303	0.9808	0.0104	0.0064	0.038	2.650	10.0	11.633
Thomas II	0.012	0.046	0.024	0.024	0.164	0.176	90	0.483	1.921	0.012	0.188	0.9698	0.0104	0.0064	0.152	2.650	10.0	6.896
Thomas II	0.012	0.038	0.024	0.024	0.088	0.100	90	0.483	1.482	0.014	0.112	0.9507	0.0104	0.0064	0.229	2.650	10.0	3.698
Thomas II	0.023	0.136	0.038	0.038	0.245	0.264	90	0.611	2.354	0.019	0.283	0.9680	0.0104	0.0064	0.079	2.650	10.0	6.431
Thomas II	0.023	0.092	0.038	0.038	0.171	0.191	90	0.612	2.027	0.021	0.210	0.9574	0.0104	0.0064	0.152	2.650	10.0	4.497
Thomas II	0.047	0.274	0.061	0.061	0.259	0.290	90	0.773	2.505	0.034	0.320	0.9555	0.0104	0.0064	0.076	2.650	10.0	4.252
Thomas II	0.046	0.141	0.060	0.060	0.106	0.136	90	0.768	1.806	0.039	0.166	0.9203	0.0104	0.0064	0.229	2.650	10.0	1.767
Thomas II	0.012	0.094	0.024	0.024	0.584	0.596	90	0.486	3.452	0.009	0.608	0.9902	0.0104	0.0064	0.038	2.650	10.0	24.230
Thomas II	0.011	0.075	0.024	0.024	0.545	0.557	90	0.481	3.340	0.009	0.569	0.9898	0.0104	0.0064	0.076	2.650	10.0	23.130

	q	h	bo	Ref depth	dz	z	alpha	Vo	VI	bi	H	Cos d	d85	d50	Hca	G	T	z/bo
	(m2/s)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(deg)	(m/s)	(m/s)	(m)	(m)		(m)	(m)	(m)		oC	
Thomas II	0.012	0.062	0.024	0.024	0.317	0.329	90	0.485	2.585	0.010	0.341	0.9829	0.0104	0.0064	0.305	2.650	10.0	13.224
Thomas II	0.023	0.162	0.038	0.038	0.543	0.562	90	0.611	3.376	0.016	0.581	0.9840	0.0104	0.0064	0.085	2.650	10.0	14.287
Thomas II	0.023	0.125	0.038	0.038	0.458	0.477	90	0.608	3.117	0.017	0.496	0.9815	0.0104	0.0064	0.171	2.650	10.0	12.135
Thomas II	0.023	0.115	0.038	0.038	0.458	0.477	90	0.607	3.117	0.017	0.495	0.9815	0.0104	0.0064	0.171	2.650	10.0	12.167
Thomas II	0.023	0.120	0.038	0.038	0.455	0.474	90	0.611	3.109	0.017	0.493	0.9812	0.0104	0.0064	0.174	2.650	10.0	11.962
Thomas II	0.023	0.107	0.038	0.038	0.324	0.343	90	0.611	2.664	0.018	0.362	0.9747	0.0104	0.0064	0.305	2.650	10.0	8.515
Thomas II	0.023	0.074	0.038	0.038	0.171	0.190	90	0.609	2.025	0.021	0.209	0.9576	0.0104	0.0064	0.457	2.650	10.0	4.529
Thomas II	0.046	0.317	0.060	0.060	0.487	0.518	90	0.770	3.278	0.029	0.548	0.9735	0.0104	0.0064	0.152	2.650	10.0	8.074
Thomas II	0.046	0.182	0.060	0.060	0.304	0.334	90	0.768	2.674	0.032	0.365	0.9611	0.0104	0.0064	0.335	2.650	10.0	5.063
Thomas II	0.012	0.085	0.024	0.024	1.195	1.206	90	0.483	4.888	0.007	1.218	0.9951	0.0104	0.0064	0.037	2.650	10.0	50.133
Thomas II	0.012	0.066	0.024	0.024	1.076	1.088	90	0.486	4.644	0.008	1.100	0.9946	0.0104	0.0064	0.155	2.650	10.0	44.670
Thomas II	0.012	0.058	0.024	0.024	0.622	0.634	90	0.487	3.559	0.009	0.646	0.9908	0.0104	0.0064	0.610	2.650	10.0	25.679
Thomas II	0.023	0.182	0.038	0.038	1.159	1.178	90	0.609	4.845	0.013	1.197	0.9922	0.0104	0.0064	0.079	2.650	10.0	30.639
Thomas II	0.023	0.130	0.038	0.038	0.933	0.953	90	0.612	4.365	0.014	0.972	0.9903	0.0104	0.0064	0.305	2.650	10.0	24.482
Thomas II	0.023	0.118	0.038	0.038	0.629	0.648	90	0.610	3.615	0.016	0.666	0.9861	0.0104	0.0064	0.610	2.650	10.0	16.574
Thomas II	0.046	0.239	0.060	0.060	0.944	0.974	90	0.767	4.438	0.025	1.004	0.9854	0.0104	0.0064	0.305	2.650	10.0	15.750
Thomas II	0.046	0.194	0.060	0.060	0.640	0.670	90	0.768	3.705	0.027	0.700	0.9792	0.0104	0.0064	0.610	2.650	10.0	10.639
Lencastre I	0.139	0.200	0.150	0.150	0.950	1.025	90	0.895	4.572	0.066	1.066	0.9814	0.0480	0.0444	0.400	2.700	10.0	6.333
Lencastre I	0.139	0.170	0.150	0.150	0.750	0.825	90	0.895	4.121	0.070	0.866	0.9772	0.0480	0.0444	0.600	2.700	10.0	5.000
Lencastre I	0.070	0.150	0.100	0.100	0.940	0.990	90	0.701	4.462	0.040	1.015	0.9879	0.0480	0.0444	0.410	2.700	10.0	9.400
Lencastre I	0.139	0.180	0.150	0.150	1.150	1.225	90	0.895	4.983	0.064	1.266	0.9842	0.0480	0.0444	0.200	2.700	10.0	7.667
Lencastre I	0.070	0.150	0.100	0.100	0.750	0.800	90	0.701	4.023	0.042	0.825	0.9852	0.0480	0.0444	0.600	2.700	10.0	7.500
Lencastre I	0.139	0.150	0.150	0.150	0.550	0.625	90	0.895	3.614	0.075	0.666	0.9707	0.0480	0.0444	0.800	2.700	10.0	3.667
Lencastre I	0.070	0.120	0.100	0.100	1.150	1.200	90	0.701	4.902	0.038	1.225	0.9899	0.0480	0.0444	0.200	2.700	10.0	11.500
Lencastre I	0.070	0.110	0.100	0.100	0.550	0.600	90	0.701	3.501	0.045	0.625	0.9805	0.0480	0.0444	0.800	2.700	10.0	5.500
Lencastre I	0.022	0.060	0.050	0.050	1.150	1.175	90	0.456	4.822	0.015	1.186	0.9956	0.0480	0.0444	0.200	2.700	10.0	23.000
Lencastre I	0.022	0.035	0.050	0.050	0.950	0.975	90	0.456	4.397	0.016	0.986	0.9947	0.0480	0.0444	0.400	2.700	10.0	19.000
Lencastre I	0.022	0.000	0.050	0.050	0.740	0.765	90	0.056	3.874	0.006	0.765	0.9999	0.0480	0.0444	0.610	2.700	10.0	14.800
Lencastre II	0.146	0.209	0.150	0.150	0.950	1.025	90	0.977	4.589	0.089	1.074	0.9781	0.0620	0.0620	0.400	2.700	10.0	6.333
Lencastre II	0.146	0.210	0.150	0.150	0.550	0.625	90	0.977	3.635	0.078	0.674	0.9657	0.0620	0.0620	0.800	2.700	10.0	3.667
Lencastre II	0.070	0.142	0.100	0.100	0.950	1.000	90	0.795	4.499	0.042	1.032	0.9847	0.0620	0.0620	0.400	2.700	10.0	9.500
Lencastre II	0.146	0.180	0.150	0.150	1.150	1.225	90	0.977	4.998	0.066	1.274	0.9814	0.0620	0.0620	0.200	2.700	10.0	7.667
Lencastre II	0.070	0.126	0.100	0.100	1.150	1.200	90	0.795	4.916	0.040	1.232	0.9872	0.0620	0.0620	0.200	2.700	10.0	11.500

CUADRO 4.2. Datos usados en este estudio para chorros compactos

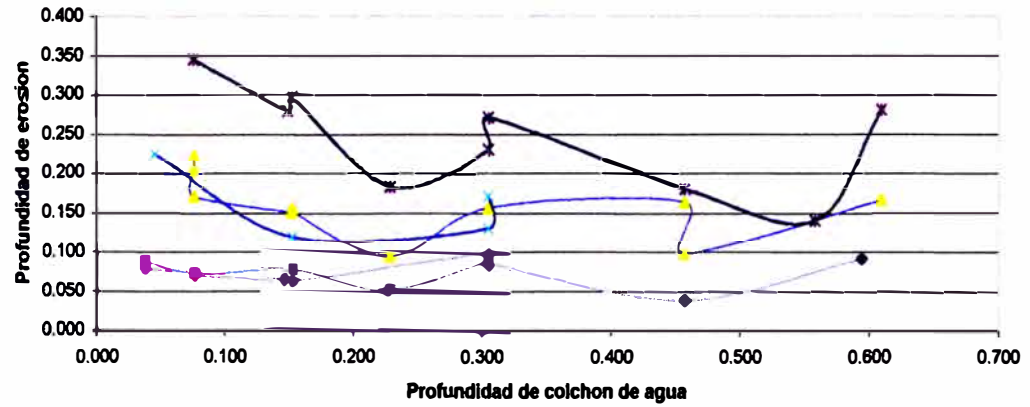
Experimento	Q (L/s)	q (m ² /s)	V0	Hca(m)	h erosión (cm)	Angulo Incid(θ)	Seno(θ)	d50(m)
1	20.0	0.033	1.530	0.100	18.94	49	0.8552	0.0016
2	20.0	0.033	1.330	0.250	11.54	45	0.7854	0.0016
3	20.0	0.033	1.780	0.500	0.00	20	0.3491	0.0016
4	20.0	0.033	1.470	0.050	18.34	50	0.8727	0.0016
5	40.0	0.067	1.940	0.050	30.94	50	0.8727	0.0016
6	40.0	0.067	1.750	0.100	30.05	49	0.8552	0.0016
7	40.0	0.067	1.630	0.250	24.49	45	0.7854	0.0016
8	40.0	0.067	1.630	0.500	0.00	21	0.3665	0.0016
9	60.0	0.100	2.130	0.050	38.94	50	0.8727	0.0016
10	60.0	0.100	2.170	0.100	41.04	49	0.8552	0.0016
11	60.0	0.100	2.260	0.250	34.89	45	0.7854	0.0016
12	60.0	0.100	2.550	0.500	7.64	20	0.3491	0.0016
13	20.0	0.033	1.290	0.050	15.51	50	0.8727	0.01788
14	20.0	0.033	1.160	0.100	15.04	49	0.8552	0.01788
15	20.0	0.033	1.290	0.250	0.00	45	0.7854	0.01788
16	20.0	0.033	1.370	0.500	0.00	20	0.3491	0.01788
17	40.0	0.067	1.790	0.050	27.33	50	0.8727	0.01788
18	40.0	0.067	1.900	0.100	25.13	49	0.8552	0.01788
19	40.0	0.067	1.820	0.500	0.00	21	0.3665	0.01788
20	40.0	0.067	2.250	0.250	16.21	45	0.7854	0.01788
21	60.0	0.100	2.390	0.050	34.69	50	0.8727	0.01788
22	60.0	0.100	2.320	0.100	35.24	49	0.8552	0.01788
23	60.0	0.100	2.360	0.250	30.04	45	0.7854	0.01788
24	60.0	0.100	2.430	0.500	0.00	20	0.3491	0.01788
25	20.0	0.033	0.940	0.050	6.04	50	0.8727	0.04908
26	20.0	0.033	1.250	0.100	5.79	49	0.8552	0.04908
27	20.0	0.033	1.420	0.250	0.00	45	0.7854	0.04908
28	20.0	0.033	1.400	0.500	0.00	20	0.3491	0.04908
29	40.0	0.067	1.900	0.500	0.00	21	0.3665	0.04908
30	40.0	0.067	1.710	0.050	13.74	50	0.8727	0.04908
31	40.0	0.067	1.640	0.100	12.68	49	0.8552	0.04908
32	40.0	0.067	2.000	0.250	6.23	44	0.7679	0.04908
33	60.0	0.100	2.300	0.050	16.64	49	0.8552	0.04908
34	60.0	0.100	2.260	0.500	0.00	21	0.3665	0.04908
35	60.0	0.100	2.330	0.250	12.75	45	0.7854	0.04908
36	60.0	0.100	2.360	0.100	17.09	49	0.8552	0.04908

CADROS Y GRAFICOS DE LOS DATOS DE THOMAS, HALLMARK Y LENCASTRE

CURVAS PARA DIFERENTES CAUDALES

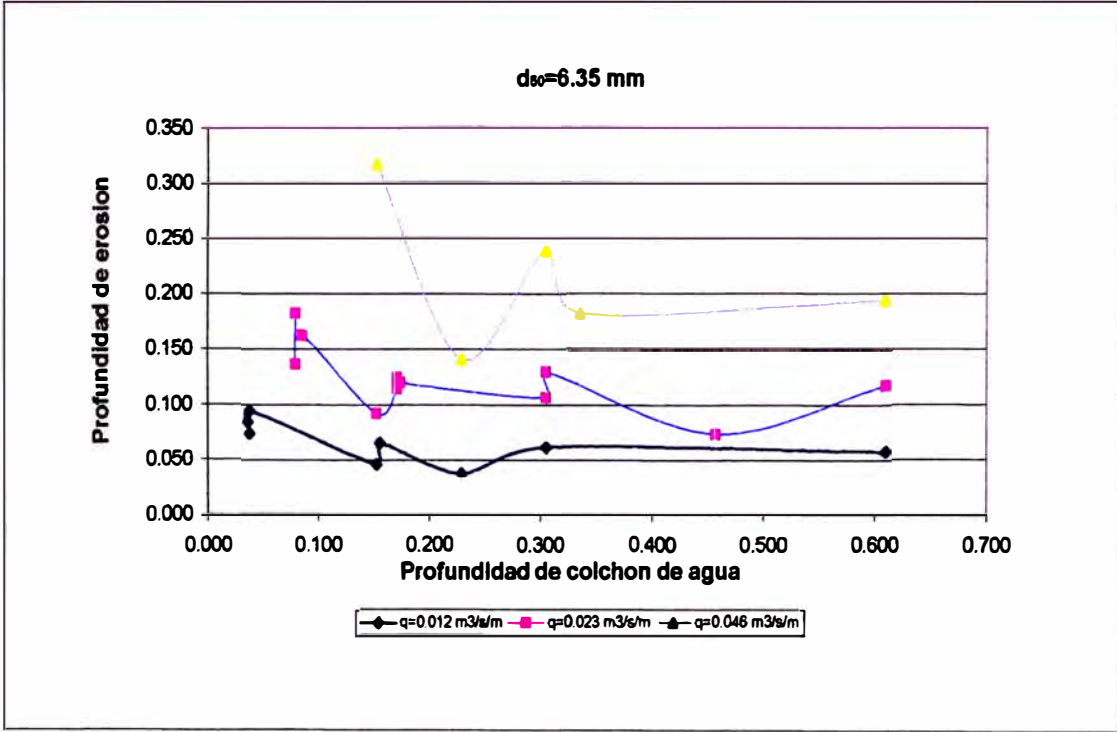
	q	h	VI	d85	d50	Hca
	(m ² /s)	(m)	(m/s)	(m)	(m)	(m)
Thomas I	0.011	0.079	3.450	0.007	0.006	0.038
Thomas I	0.011	0.073	4.806	0.007	0.006	0.076
Thomas I	0.011	0.071	3.340	0.007	0.006	0.076
Thomas I	0.011	0.063	4.660	0.007	0.006	0.146
Thomas I	0.011	0.062	1.919	0.007	0.006	0.152
Thomas I	0.011	0.098	4.314	0.007	0.006	0.305
Thomas I	0.011	0.086	4.314	0.007	0.006	0.305
Thomas I	0.011	0.038	1.920	0.007	0.006	0.457
Thomas I	0.011	0.091	3.597	0.007	0.006	0.594
Thomas I	0.012	0.083	2.436	0.007	0.006	0.038
Thomas I	0.012	0.089	4.886	0.007	0.006	0.038
Thomas I	0.012	0.073	2.282	0.007	0.006	0.076
Thomas I	0.012	0.076	3.102	0.007	0.006	0.152
Thomas I	0.012	0.052	1.483	0.007	0.006	0.229
Thomas I	0.013	0.090	2.599	0.007	0.006	0.305
Thomas I	0.023	0.223	4.850	0.007	0.006	0.076
Thomas I	0.023	0.205	3.402	0.007	0.006	0.076
Thomas I	0.023	0.171	2.367	0.007	0.006	0.076
Thomas I	0.023	0.151	3.188	0.007	0.006	0.151
Thomas I	0.023	0.155	4.694	0.007	0.006	0.152
Thomas I	0.023	0.152	4.694	0.007	0.006	0.152
Thomas I	0.023	0.094	1.616	0.007	0.006	0.229
Thomas I	0.022	0.157	4.360	0.007	0.006	0.305
Thomas I	0.023	0.165	4.008	0.007	0.006	0.457
Thomas I	0.023	0.099	2.041	0.007	0.006	0.457
Thomas I	0.023	0.166	3.615	0.007	0.006	0.610
Thomas I	0.024	0.226	3.484	0.007	0.006	0.046
Thomas I	0.024	0.120	2.029	0.007	0.006	0.152
Thomas I	0.024	0.131	2.666	0.007	0.006	0.305
Thomas I	0.024	0.171	4.369	0.007	0.006	0.305
Thomas I	0.046	0.345	2.501	0.007	0.006	0.076
Thomas I	0.046	0.280	2.196	0.007	0.006	0.149
Thomas I	0.047	0.298	3.279	0.007	0.006	0.152
Thomas I	0.046	0.183	1.808	0.007	0.006	0.229
Thomas I	0.046	0.231	2.784	0.007	0.006	0.305
Thomas I	0.046	0.272	4.438	0.007	0.006	0.305
Thomas I	0.046	0.180	2.183	0.007	0.006	0.457
Thomas I	0.046	0.141	1.670	0.007	0.006	0.558
Thomas I	0.046	0.281	3.706	0.007	0.006	0.610

$d_{50}=6.1 \text{ mm}$

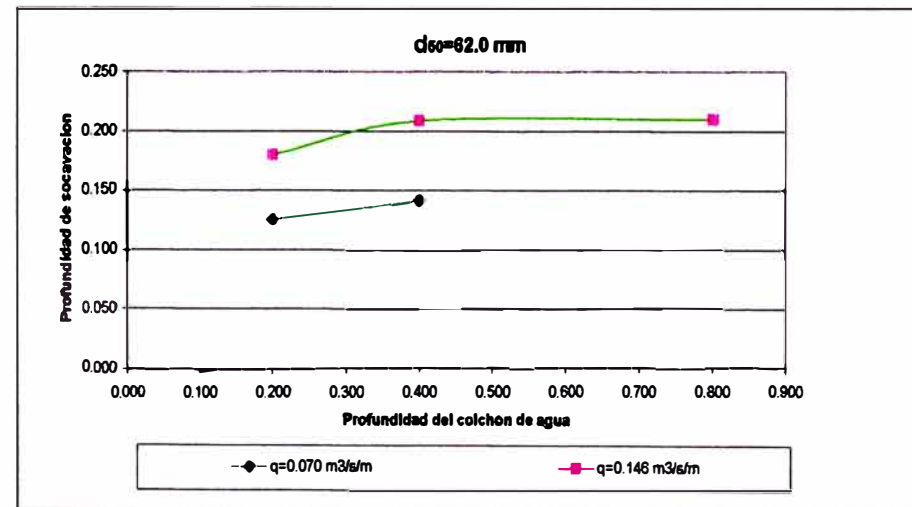
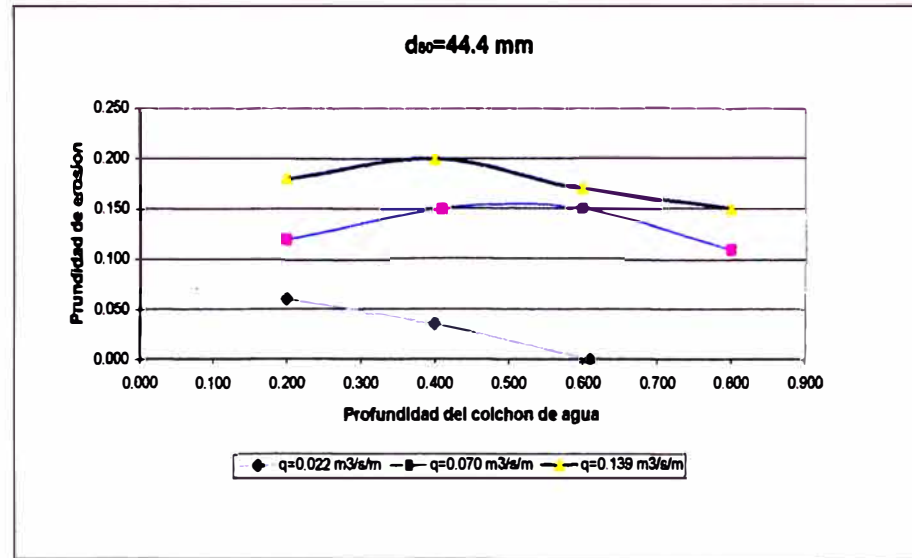


◆ q=0.011 m³/s/m ◆ q=0.012 m³/s/m ◆ q=0.023 m³/s/m ◆ q=0.024 m³/s/m ◆ q=0.046 m³/s/m

	q	h	Vi	d85	d50	Hca
	(m ² /s)	(m)	(m/s)	(m)	(m)	(m)
Thomas II	0.012	0.085	4.888	0.010	0.006	0.037
Thomas II	0.012	0.074	2.436	0.010	0.006	0.038
Thomas II	0.012	0.094	3.452	0.010	0.006	0.038
Thomas II	0.012	0.046	1.921	0.010	0.006	0.152
Thomas II	0.012	0.066	4.644	0.010	0.006	0.155
Thomas II	0.012	0.038	1.482	0.010	0.006	0.229
Thomas II	0.012	0.062	2.585	0.010	0.006	0.305
Thomas II	0.012	0.058	3.559	0.010	0.006	0.610
Thomas II	0.023	0.182	4.845	0.010	0.006	0.079
Thomas II	0.023	0.136	2.354	0.010	0.006	0.079
Thomas II	0.023	0.162	3.376	0.010	0.006	0.085
Thomas II	0.023	0.092	2.027	0.010	0.006	0.152
Thomas II	0.023	0.115	3.117	0.010	0.006	0.171
Thomas II	0.023	0.125	3.117	0.010	0.006	0.171
Thomas II	0.023	0.120	3.109	0.010	0.006	0.174
Thomas II	0.023	0.107	2.664	0.010	0.006	0.305
Thomas II	0.023	0.130	4.365	0.010	0.006	0.305
Thomas II	0.023	0.074	2.025	0.010	0.006	0.457
Thomas II	0.023	0.118	3.615	0.010	0.006	0.610
Thomas II	0.046	0.317	3.278	0.010	0.006	0.152
Thomas II	0.046	0.141	1.806	0.010	0.006	0.229
Thomas II	0.046	0.239	4.438	0.010	0.006	0.305
Thomas II	0.046	0.182	2.674	0.010	0.006	0.335
Thomas II	0.046	0.194	3.705	0.010	0.006	0.610

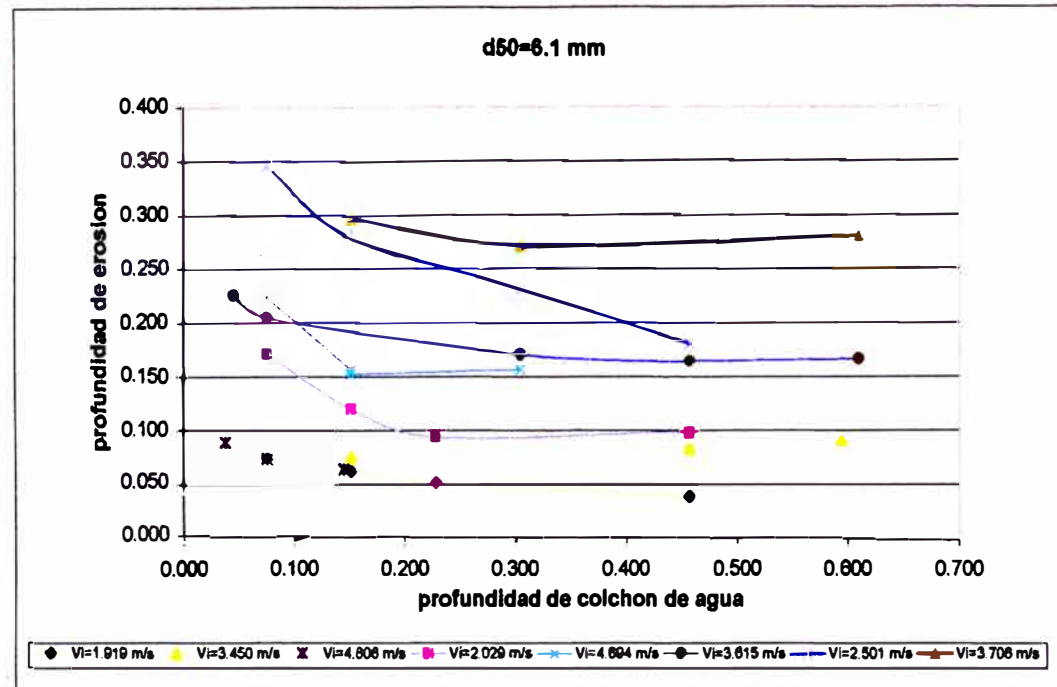


	q	h	Vi	d85	d50	Hca
	(m ² /s)	(m)	(m/s)	(m)	(m)	(m)
Lencastre I	0.022	0.060	4.822	0.048	0.044	0.200
Lencastre I	0.022	0.035	4.397	0.048	0.044	0.400
Lencastre I	0.022	0.000	3.874	0.048	0.044	0.610
Lencastre I	0.070	0.120	4.902	0.048	0.044	0.200
Lencastre I	0.070	0.150	4.462	0.048	0.044	0.410
Lencastre I	0.070	0.150	4.023	0.048	0.044	0.600
Lencastre I	0.070	0.110	3.501	0.048	0.044	0.800
Lencastre I	0.139	0.180	4.983	0.048	0.044	0.200
Lencastre I	0.139	0.200	4.572	0.048	0.044	0.400
Lencastre I	0.139	0.170	4.121	0.048	0.044	0.600
Lencastre I	0.139	0.150	3.614	0.048	0.044	0.800
Lencastre II	0.070	0.126	4.916	0.062	0.062	0.200
Lencastre II	0.070	0.142	4.499	0.062	0.062	0.400
Lencastre II	0.146	0.180	4.998	0.062	0.062	0.200
Lencastre II	0.146	0.209	4.589	0.062	0.062	0.400
Lencastre II	0.146	0.210	3.635	0.062	0.062	0.800

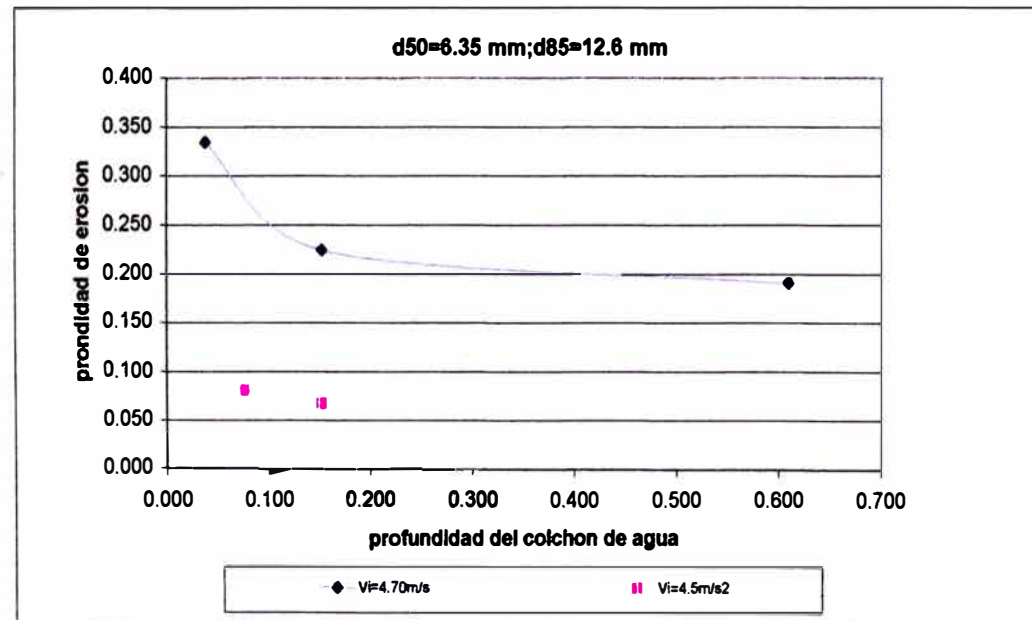
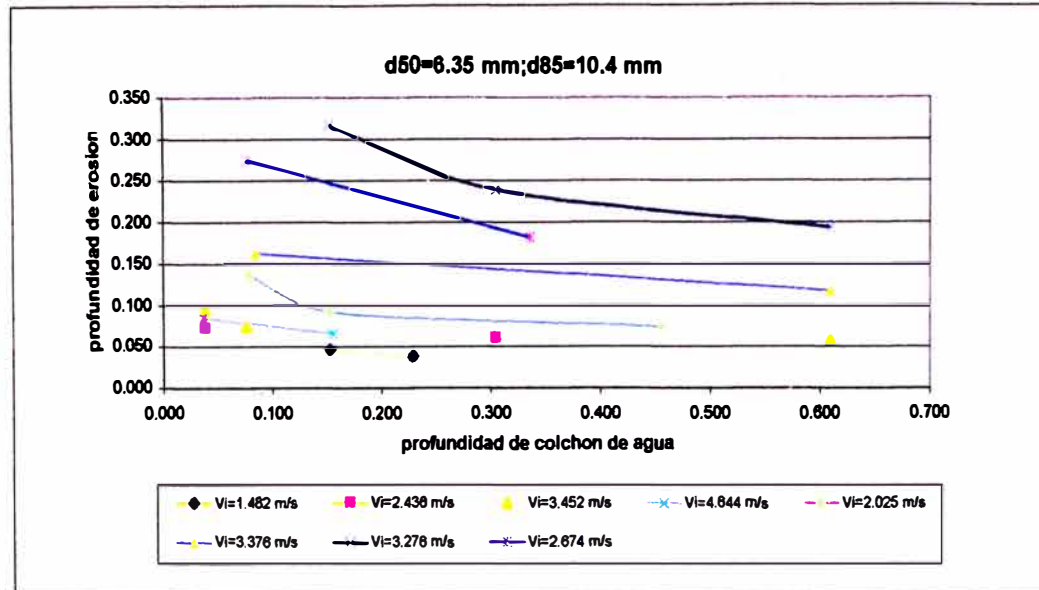


CURVAS PARA DIFERENTES VELOCIDADES DE INTRUSION

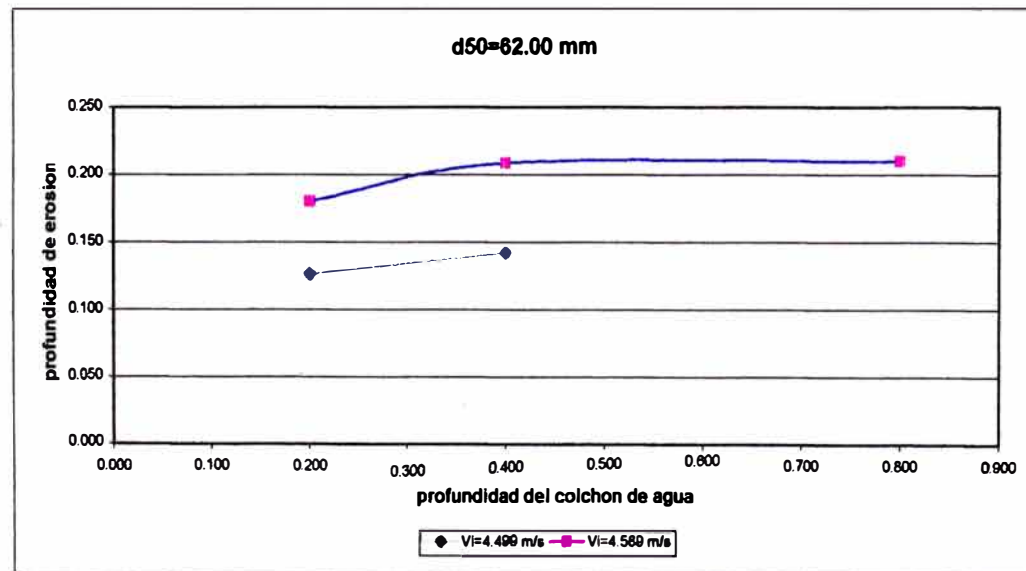
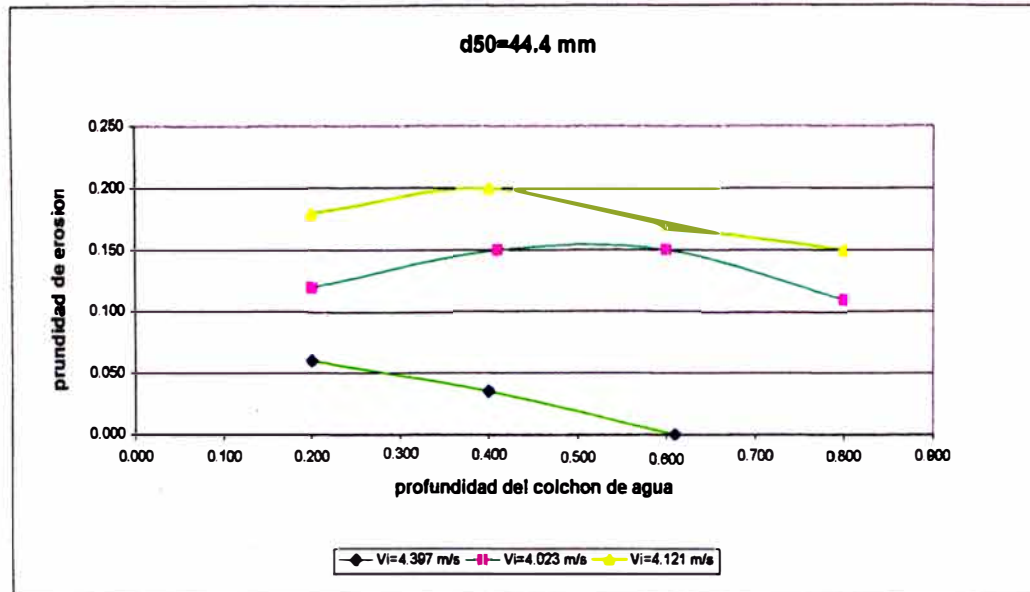
	q	h	VI	d85	d50	Hca
	(m ² /s)	(m)	(m/s)	(m)	(m)	(m)
Thomas I	0.012	0.073	2.282	0.007	0.006	0.076
Thomas I	0.011	0.062	1.919	0.007	0.006	0.152
Thomas I	0.012	0.052	1.483	0.007	0.006	0.229
Thomas I	0.011	0.038	1.920	0.007	0.006	0.457
Thomas I	0.011	0.079	3.450	0.007	0.006	0.038
Thomas I	0.011	0.071	3.340	0.007	0.006	0.076
Thomas I	0.012	0.076	3.102	0.007	0.006	0.152
Thomas I	0.010	0.083	3.949	0.007	0.006	0.457
Thomas I	0.011	0.091	3.597	0.007	0.006	0.594
Thomas I	0.012	0.089	4.886	0.007	0.006	0.038
Thomas I	0.011	0.073	4.806	0.007	0.006	0.076
Thomas I	0.011	0.063	4.660	0.007	0.006	0.146
Thomas I	0.023	0.171	2.367	0.007	0.006	0.076
Thomas I	0.024	0.120	2.029	0.007	0.006	0.152
Thomas I	0.023	0.094	1.616	0.007	0.006	0.229
Thomas I	0.023	0.099	2.041	0.007	0.006	0.457
Thomas I	0.023	0.223	4.850	0.007	0.006	0.076
Thomas I	0.023	0.155	4.694	0.007	0.006	0.152
Thomas I	0.023	0.152	4.694	0.007	0.006	0.152
Thomas I	0.022	0.157	4.360	0.007	0.006	0.305
Thomas I	0.024	0.226	3.484	0.007	0.006	0.046
Thomas I	0.023	0.205	3.402	0.007	0.006	0.076
Thomas I	0.024	0.171	4.369	0.007	0.006	0.305
Thomas I	0.023	0.165	4.008	0.007	0.006	0.457
Thomas I	0.023	0.166	3.615	0.007	0.006	0.610
Thomas I	0.046	0.345	2.501	0.007	0.006	0.076
Thomas I	0.046	0.280	2.196	0.007	0.006	0.149
Thomas I	0.046	0.231	2.784	0.007	0.006	0.305
Thomas I	0.046	0.180	2.183	0.007	0.006	0.457
Thomas I	0.047	0.298	3.279	0.007	0.006	0.152
Thomas I	0.046	0.272	4.438	0.007	0.006	0.305
Thomas I	0.046	0.281	3.706	0.007	0.006	0.610



	q	h	Vl	d85	d50	Hca
	(m ² /s)	(m)	(m/s)	(m)	(m)	(m)
Thomas II	0.012	0.046	1.921	0.010	0.006	0.152
Thomas II	0.012	0.038	1.482	0.010	0.006	0.229
Thomas II	0.012	0.074	2.436	0.010	0.006	0.038
Thomas II	0.012	0.062	2.585	0.010	0.006	0.305
Thomas II	0.012	0.094	3.452	0.010	0.006	0.038
Thomas II	0.011	0.075	3.340	0.010	0.006	0.076
Thomas II	0.012	0.058	3.559	0.010	0.006	0.610
Thomas II	0.012	0.066	4.644	0.010	0.006	0.155
Thomas II	0.012	0.085	4.888	0.010	0.006	0.037
Thomas II	0.023	0.074	2.025	0.010	0.006	0.457
Thomas II	0.023	0.092	2.027	0.010	0.006	0.152
Thomas II	0.023	0.136	2.354	0.010	0.006	0.079
Thomas II	0.023	0.162	3.376	0.010	0.006	0.085
Thomas II	0.023	0.118	3.615	0.010	0.006	0.610
Thomas II	0.046	0.182	2.674	0.010	0.006	0.335
Thomas II	0.047	0.274	2.505	0.010	0.006	0.076
Thomas II	0.046	0.317	3.278	0.010	0.006	0.152
Thomas II	0.046	0.239	4.438	0.010	0.006	0.305
Thomas II	0.046	0.194	3.705	0.010	0.006	0.610
Hallmark A	0.011	0.080	4.783	0.013	0.006	0.076
Hallmark A	0.012	0.067	4.625	0.013	0.006	0.152
Hallmark A	0.045	0.190	3.622	0.013	0.006	0.610
Hallmark A	0.046	0.225	4.701	0.013	0.006	0.152
Hallmark A	0.045	0.334	4.932	0.013	0.006	0.038



	q	Y	Vi	d85	d50	TW
	(m ² /s)	(m)	(m/s)	(m)	(m)	(m)
Lencastre I	0.022	0.000	3.874	0.048	0.044	0.610
Lencastre I	0.022	0.035	4.397	0.048	0.044	0.400
Lencastre I	0.022	0.060	4.822	0.048	0.044	0.200
Lencastre I	0.070	0.120	4.902	0.048	0.044	0.200
Lencastre I	0.070	0.150	4.462	0.048	0.044	0.410
Lencastre I	0.070	0.150	4.023	0.048	0.044	0.600
Lencastre I	0.070	0.110	3.501	0.048	0.044	0.800
Lencastre I	0.139	0.150	3.614	0.048	0.044	0.800
Lencastre I	0.139	0.170	4.121	0.048	0.044	0.600
Lencastre I	0.139	0.200	4.572	0.048	0.044	0.400
Lencastre I	0.139	0.180	4.983	0.048	0.044	0.200
Lencastre II	0.070	0.142	4.499	0.062	0.062	0.400
Lencastre II	0.070	0.126	4.916	0.062	0.062	0.200
Lencastre II	0.146	0.210	3.635	0.062	0.062	0.800
Lencastre II	0.146	0.209	4.589	0.062	0.062	0.400
Lencastre II	0.146	0.180	4.998	0.062	0.062	0.200



ANEXO C

FOTOGRAFIAS



Fotografía N° 01: Fase I - El material ha ser utilizado en la Fase I de pruebas.



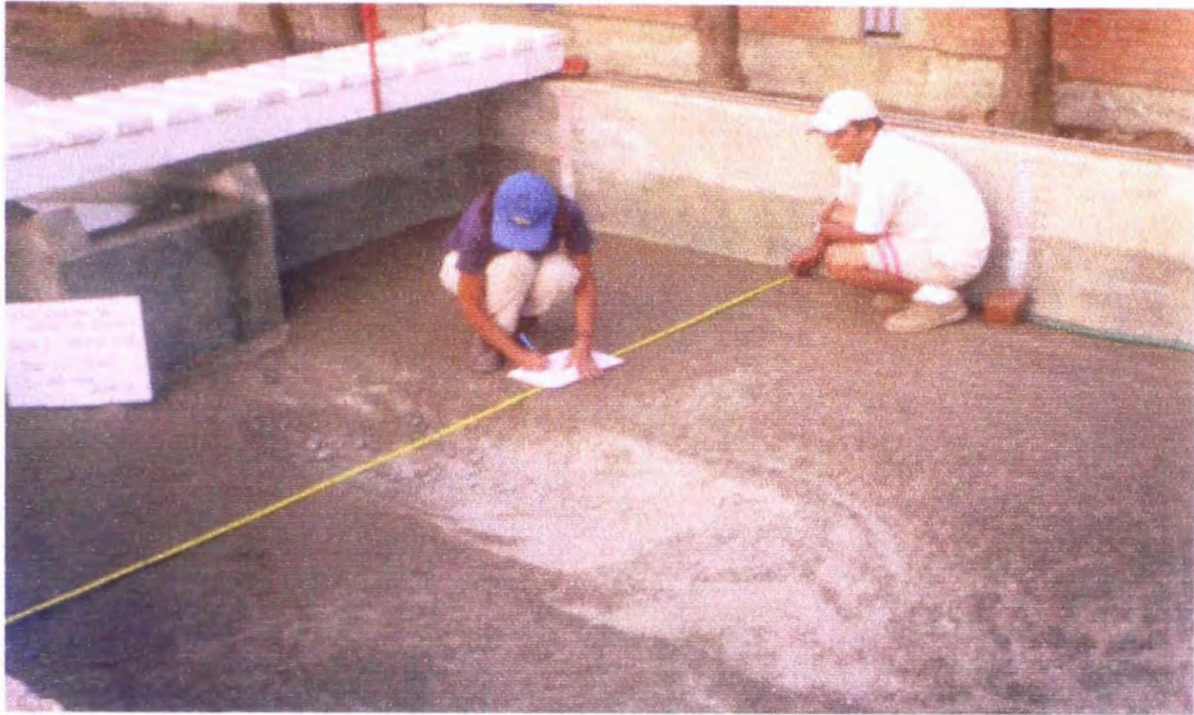
Fotografía N° 02: Fase I - Colocación de las bolas de color en tres ejes paralelos a la rápida.



Fotografía N° 03: Fase I – Ejecución de la prueba del cono de arena para determinar la densidad seca del material.



Fotografía N° 04: Fase I - Prueba N°1 ($Q = 0.02 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_{CA} = 0.10 \text{ m}$, $d_{50} = 1,60 \text{ mm}$).



Fotografía N° 05: Fase I - Prueba 2. ($Q = 0.02 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_{CA} = 0.25 \text{ m}$; $d_{50} = 1.60 \text{ mm}$).
Vista del pozo de erosión después de dos horas de prueba. La profundidad de esta fue de 0.115 m



Fotografía N° 06: Fase I - Prueba 3. ($Q = 0.02 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_{CA} = 0.50 \text{ m}$; $d_{50} = 1.60 \text{ mm}$)
Vista del cuenco después de dos horas de prueba. No se produjo erosión.



Fotografía N° 07: Fase I - Prueba 4. ($Q = 0.02 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_{CA} 0.05 \text{ m}$; $d_{50} = 1.60 \text{ mm}$)
Se observa la poza de erosión después de dos horas de prueba. La profundidad fue de 0.183 m



Fotografía N° 08: Fase I - Prueba 5. ($Q = 0.04 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_{CA} 0.05 \text{ m}$; $d_{50} = 1.60 \text{ mm}$)
Se observa la poza de erosión después de dos horas de prueba. La profundidad de erosión fue de 0.309 m . De modo similar fue para la Prueba 6, siendo la profundidad de erosión de 0.301 m



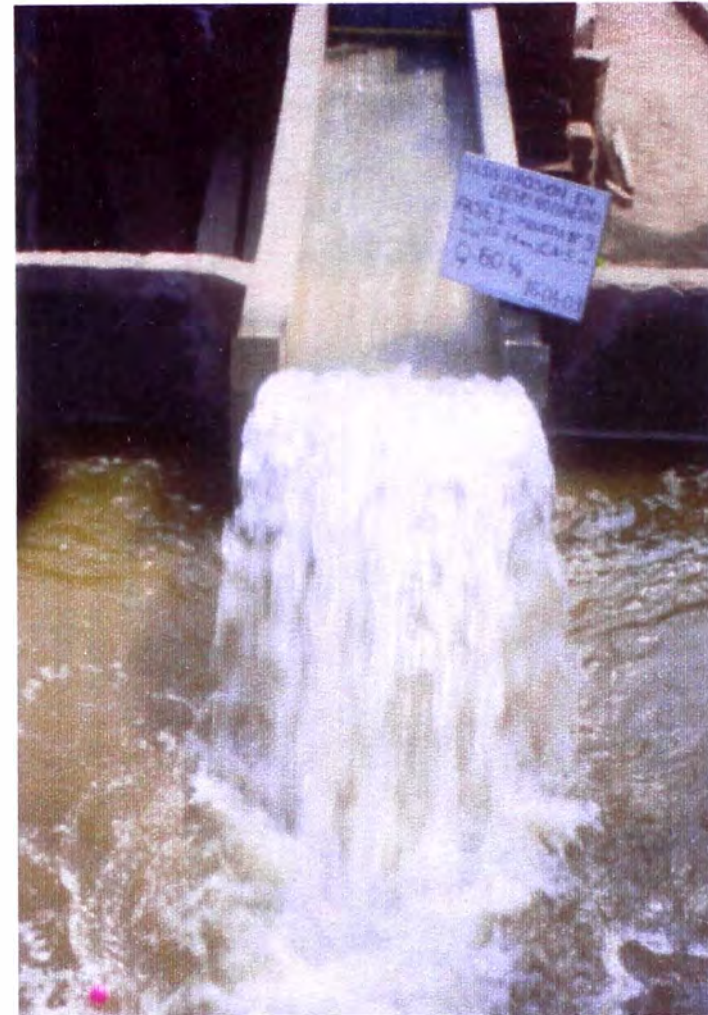
Fotografía N° 09: Fase I - Prueba 7. ($Q = 0.04 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_{CA} = 0.25 \text{ m}$, $d_{50} = 1.60 \text{ mm}$)
La profundidad de erosión en esta prueba, después de dos horas de prueba, fue de 0.245 m.



Fotografía N° 10: Fase I – Prueba 7. ($Q = 0.04 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_{CA} = 0.25 \text{ m}$, $d_{50} = 1.60 \text{ mm}$). Se observa la toma de datos de velocidad en el ski, con el Tubo de Pitot.



Fotografía N° 11: Fase I - Prueba 8. ($Q = 0.04 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_{CA} = 0.50 \text{ m}$, $d_{50} = 1.60 \text{ mm}$)
La superficie del suelo no ha sido erosionada, solo se observa una leve mancha en la cual aparecen levemente os materiales gruesos, al parecer los finos fueron lavados.



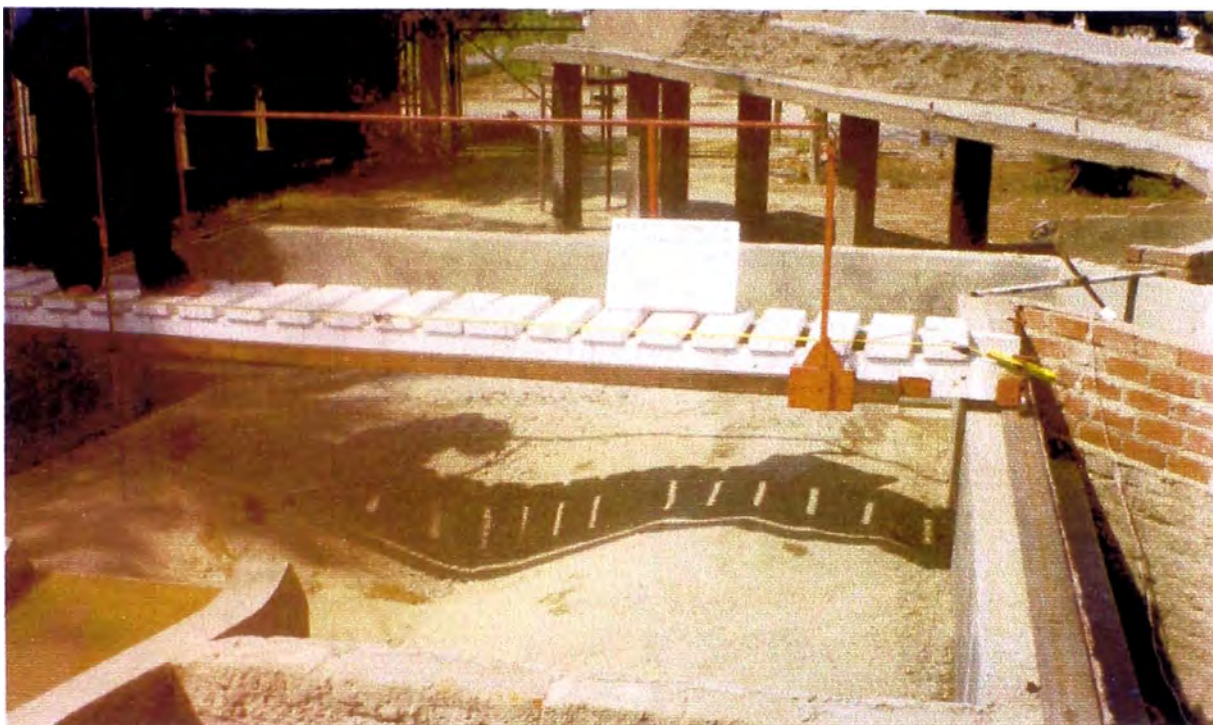
Fotografía N° 12: Fase I - Prueba 9. ($Q = 0.06 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_{CA} = 0.05 \text{ m}$, $d_{50} = 1.60 \text{ mm}$)
Se observa la bolita rosada, la cual indica que la erosión ha llegado a 20 cm de profundidad, aproximadamente.



Fotografía N° 13: Fase I - Prueba 9. ($Q = 0.06 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_{CA} = 0.05 \text{ m}$, $d_{50} = 1.60 \text{ mm}$). Vista del pozo de erosión después de 2 horas de prueba. La profundidad de erosión fue de 0.389 m .



Fotografía N° 14: Fase I - Prueba 10. ($Q = 0.06 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_{CA} = 0.10 \text{ m}$, $d_{50} = 1.60 \text{ mm}$) Vista de la distribución del flujo en el cuenco . Para ello se utilizó un trazador de color púrpura denominado permanganato de potasio.



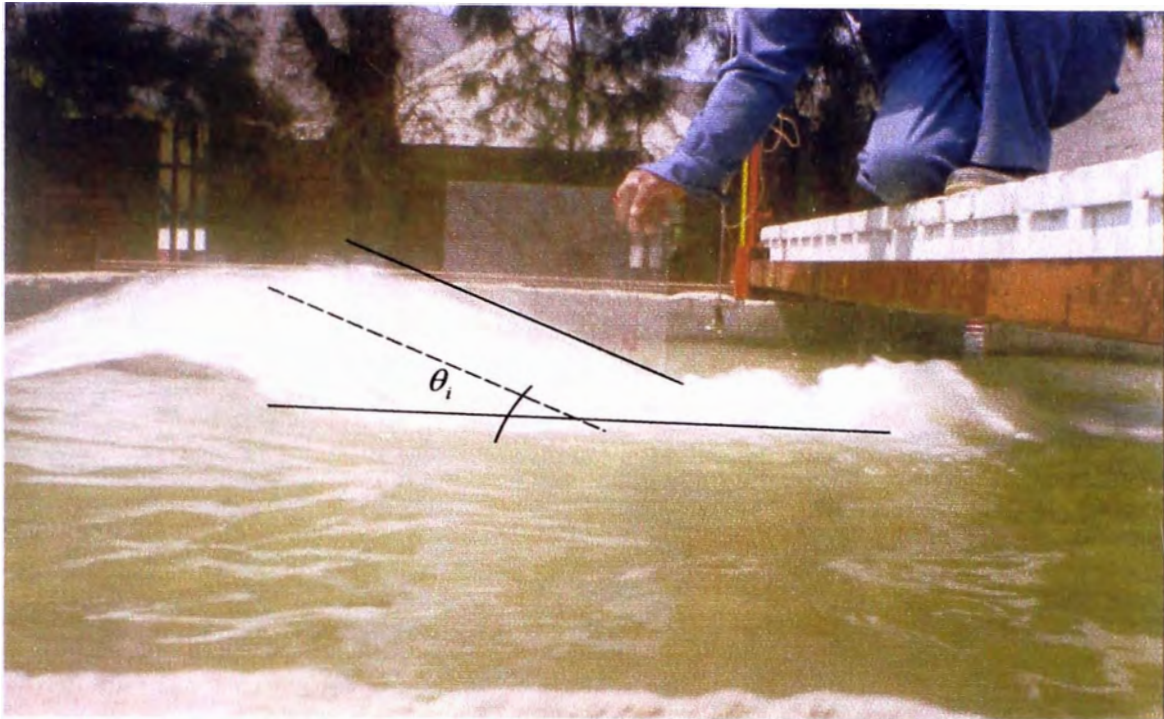
Fotografía N° 15: Fase I - Prueba 10. ($Q = 0.06 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_{CA} = 0.10 \text{ m}$, $d_{50} = 1,60 \text{ mm}$)
Vista del levantamiento topográfico del pozo de erosión. La profundidad de este fue de 0.410 m.



Fotografía N° 16: Fase I - Prueba 11. ($Q = 0.06 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_{CA} = 0.25 \text{ m}$, $d_{50} = 1.60 \text{ mm}$)
Vista de la toma de velocidad en la zona de impacto (sección 0+120 y en -0.60 cm del eje).



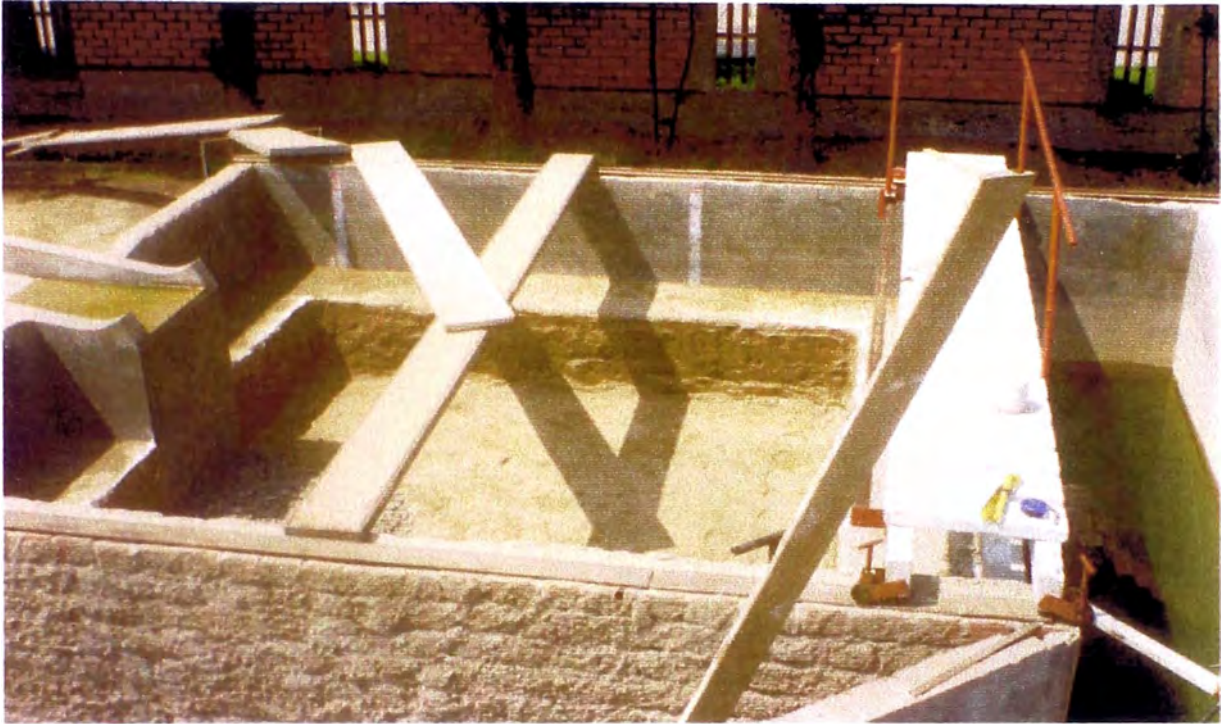
Fotografía N° 17: Fase I - Prueba 11. ($Q = 0.06 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_{CA} = 0.25 \text{ m}$, $d_{50} = 1.60 \text{ mm}$)
Vista del pozo de erosión después de 2 horas de prueba. La profundidad de erosión fue de 0.349 m.



Fotografía N° 18: Fase I - Prueba 12. ($Q = 0.06 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_{CA} = 0.50 \text{ m}$, $d_{50} = 1.60 \text{ mm}$)
Con el transportador de acrílico y nivelado se obtiene el ángulo con el que incide el chorro al colchón de agua.



Fotografía N° 19: Fase I – Prueba 12. ($Q = 0.06 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_{CA} = 0.5 \text{ m}$, $d_{50} = 1.60 \text{ mm}$)
Vista de la erosión superficial que ha originado el chorro después de 2 horas de prueba. Esta fue de 0.076 m .



Fotografía N° 20: Vista del proceso de llenado del cuenco con el material (grava media – $d_{50} = 17.88 \text{ mm}$) para iniciar la Fase II.



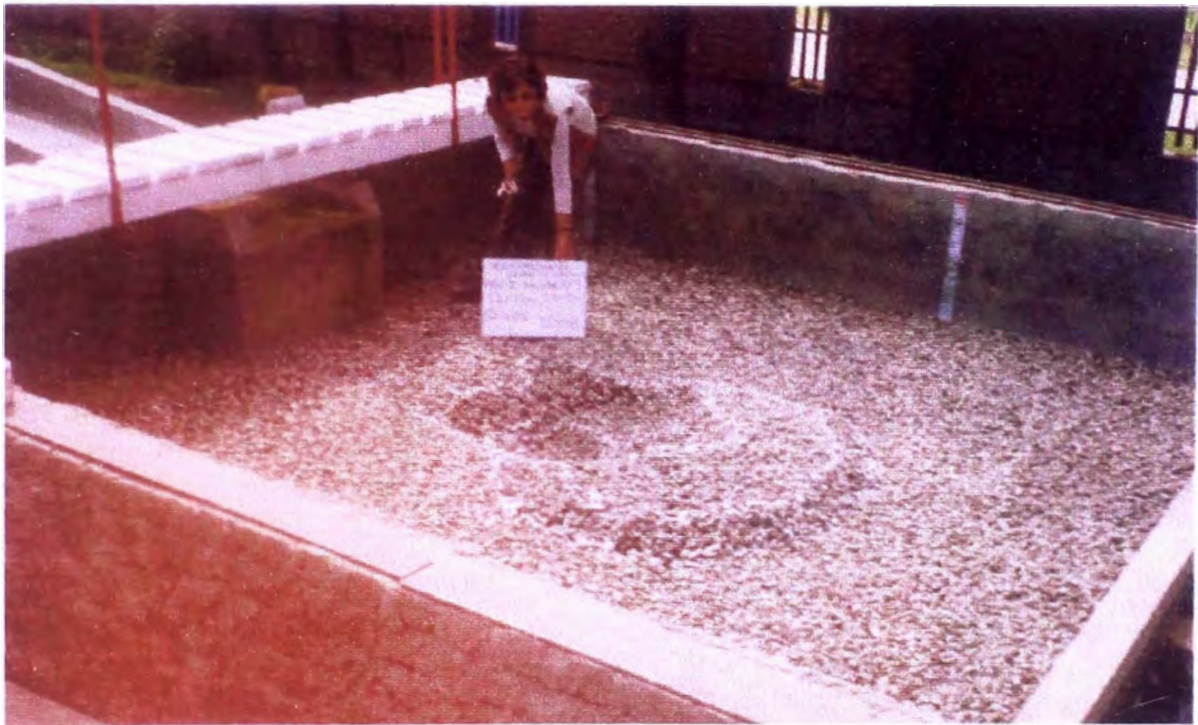
Fotografía N° 21: Fase II - Prueba 1 ($Q = 0.02 \text{ m}^3/\text{s}$ $h_{CA} = 0.05 \text{ m}$, $d_{50} = 17.88 \text{ mm}$).
Vista de la poza de erosión después de dos horas de prueba. La profundidad fue de 0.155 m.



Fotografía N° 22: Fase II - Prueba 2 ($Q = 0.02 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_{CA} = 0.10 \text{ m}$, $d_{50} = 17.88 \text{ mm}$).
Vista de la poza de erosión, después de dos horas de prueba. La profundidad de erosión fue de 0.150 m.



Fotografía N° 23: Fase II - Prueba 3 y 4 : ($Q = 0.02 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_{CA} = 0.25 \text{ m}$ y 0.50 m , $d_{50} = 17.88 \text{ mm}$). Vista de la poza de erosión, después de dos horas de prueba. No hubo proceso de erosión.



Fotografía N° 24: Fase II - Prueba 5:($Q = 0.04 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_{CA} = 0.05 \text{ m}$, $d_{50} = 17.88 \text{ mm}$). Vista de la poza de erosión, después de dos horas de prueba. La profundidad de erosión fue de 0.273 m .



Fotografía N° 25: Fase II - Prueba 6: ($Q = 0.04 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_{CA} = 0.10 \text{ m}$, $d_{50} = 17.88 \text{ mm}$).
Vista de la poza de erosión después de dos horas de prueba. La profundidad de erosión fue de 0.251 m.



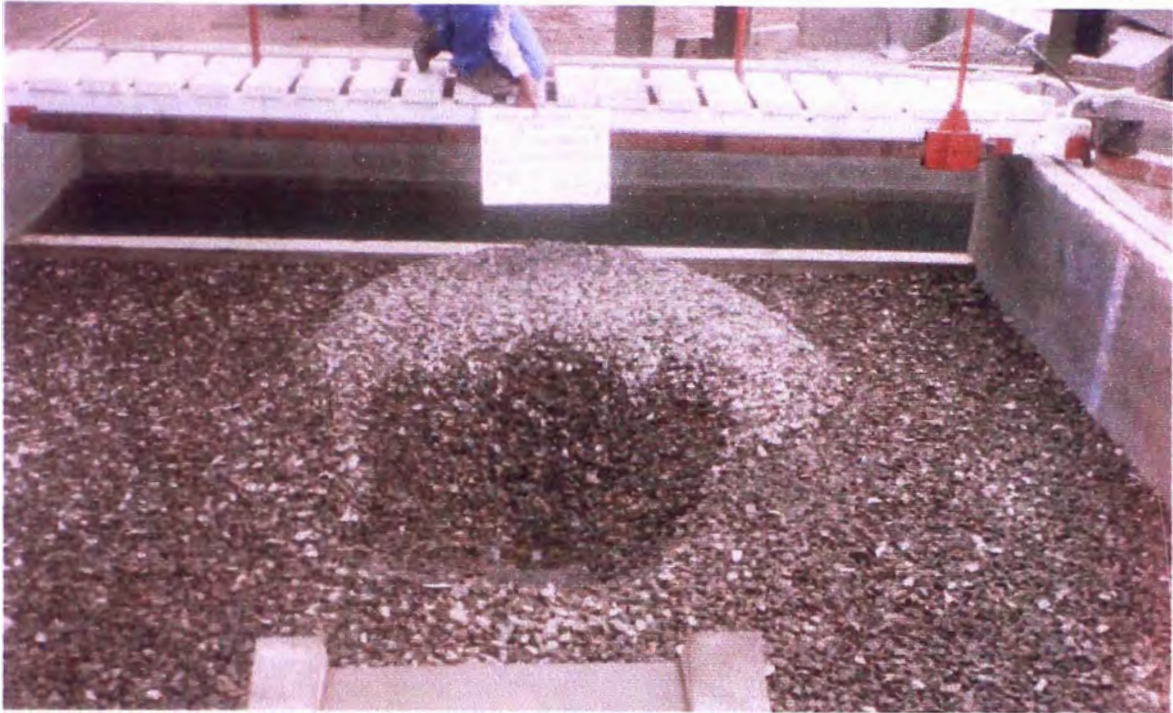
Fotografía N° 26: Fase II - Prueba 7: ($Q = 0.04 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_{CA} = 0.50 \text{ m}$, $d_{50} = 17.88 \text{ mm}$)
Vista de la poza de erosión después de dos horas de prueba. No se produjo erosión.



Fotografía N° 27: Fase II - Prueba 8:($Q = 0.04 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_{CA} = 0.25 \text{ m}$, $d_{50} = 17.88 \text{ mm}$).
Vista de la poza de erosión después de dos horas de prueba. La profundidad de erosión fue de 0.162 m .



Fotografía N° 28: Fase II - Prueba 9:($Q = 0.06 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_{CA} = 0.05 \text{ m}$, $d_{50} = 17.88 \text{ mm}$).
Vista de la poza de erosión después de dos horas de prueba. La profundidad de erosión fue de 0.347 m .



Fotografía N° 29:Fase II - Prueba 10:($Q = 0.06 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_{CA} = 0.10 \text{ m}$, $d_{50} = 17.88\text{mm}$).
Vista de la poza de erosión después de dos horas de prueba. La profundidad de erosión fue de 0.352 m



Fotografía N° 30:Fase II - Prueba 11:($Q = 0.06 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_{CA} = 0.25 \text{ m}$, $d_{50} = 17.88 \text{ mm}$).
Vista de la poza de erosión después de dos horas de prueba. La profundidad de erosión fue de 0.30 m.



Fotografía N° 31:Fase II-Prueba 12:($Q = 0.06 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_{CA} = 0.50 \text{ m}$, $d_{50} = 17.88 \text{ mm}$).
Vista del cuenco. Después de dos horas de prueba, no se produjo erosión.



Fotografía N° 32: Fase II - Prueba 3 y 4 : ($Q = 0.02 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_{CA} = 0.25 \text{ m}$ y 0.50 m , $d_{50} = 17.88 \text{ mm}$). Vista de la poza de erosión, después de dos horas de prueba. No hubo proceso de erosión.



Fotografía N° 33: Fase II - Prueba 5: ($Q = 0.04 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_{CA} = 0.05 \text{ m}$, $d_{50} = 17.88 \text{ mm}$). Vista de la poza de erosión, después de dos horas de prueba. La profundidad de erosión fue de 0.273 m .



Fotografía N° 34: Fase III - Prueba 3: ($Q = 0.02 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_{CA} = 0.25 \text{ m}$, $d_{50} = 49.08 \text{ mm}$).
Vista del cuenco después de dos horas de prueba. No se produjo erosión.



Fotografía N° 35: Fase III - Prueba 4: ($Q = 0.02 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_{CA} = 0.50 \text{ m}$, $d_{50} = 49.08 \text{ mm}$).
Vista del cuenco después de dos horas de prueba. De modo similar a la prueba anterior no se produjo erosión.



Fotografía N° 36: Fase III-Prueba 5: ($Q = 0.04 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_{CA} = 0.50 \text{ m}$, $d_{50} = 49.08 \text{ mm}$).
Vista del cuenco después de dos horas de prueba. No se produjo erosión.



Fotografía: Fase III-Prueba 6: ($Q = 0.04 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_{CA} = 0.05 \text{ m}$, $d_{50} = 49.08 \text{ mm}$).
Vista de la poza de erosión después de dos horas de prueba. La profundidad de erosión fue de 0.137 m .



Fotografía N° 38: Fase III-Prueba 7:($Q = 0.04 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_{CA} = 0.10 \text{ m}$, $d_{50} = 49.08 \text{ mm}$).
Vista de la poza de erosión después de dos horas de prueba. La profundidad de erosión fue de 0.217 m.



Fotografía N° 39: Fase III-Prueba 8:($Q = 0.04 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_{CA} = 0.25 \text{ m}$, $d_{50} = 49.08 \text{ mm}$).
Vista de la poza de erosión después de dos horas de prueba. La profundidad de erosión fue de 0.062 m.



Fotografía N° 40: Fase III- Prueba 9: ($Q = 0.06 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_{CA} = 0.05 \text{ m}$, $d_{50} = 49.08 \text{ mm}$).
Vista de la poza de erosión después de dos horas de prueba. La profundidad de erosión fue de 0.166 m .



Fotografía N° 41: Fase III-Prueba 10:($Q = 0.06 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_{CA} = 0.50 \text{ m}$, $d_{50} = 49.08 \text{ mm}$).
Vista del cuenco después de dos horas de prueba. No se produjo erosión.



Fotografía N° 42: Fase III-Prueba 11:($Q = 0.06 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_{CA} = 0.25 \text{ m}$, $d_{50} = 49.08\text{mm}$).
Vista de la poza de erosión después de dos horas de prueba. La profundidad de erosión fue de 0.128 m .



Fotografía N° 43: Fase III-Prueba 12:($Q = 0.06 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_{CA} = 0.10 \text{ m}$, $d_{50} = 49.08\text{mm}$).
Vista de la poza de erosión después de dos horas de prueba. La profundidad de erosión fue de 0.171 m .