

51
2Ej

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA



DISTRIBUCION DE PRESIONES
EN CIMACIOS TIPO CREAGER

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO CIVIL
P R E S E N T A
JESUS GALLEGOS SILVA



CIUDAD UNIVERSITARIA

1987



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

C O N T E N I D O

CAPITULO I.-		
	INTRODUCCION	3
CAPITULO II.-		
	ANTECEDENTES	11
CAPITULO III.-		
	MEDICIONES EN MODELO	
	3.1).- Localización del modelo	32
	3.2).- Descripción del modelo	36
	3.3).- Análisis Dimensional	42
	3.4).- Mediciones Experimentales	61
	3.5).- Resultados Experimentales	67
CAPITULO IV.-		
	COMPARACION TEORICA	
	4.1).- Teoría de los flujos con potencia?	96
	4.2).- Redes de flujo	109
	a).- Distribución de velocidades	112
	b).- Distribución de presiones	112
	4.3).- Comparación Teórica	123
CAPITULO V.-		
	CONCLUSIONES	126
	BIBLIOGRAFIA	132

DISTRIBUCION DE PRESIONES

EN CIMACIOS

TIPO CREAGER.

PRIMER CAPITULO

I N T R O D U C C I O N

I).- INTRODUCCION

La obra de excedencias en un aprovechamiento superficial es la estructura que permite descargar los volúmenes de agua que exceden a la capacidad útil ó de control en un almacenamiento, para ser conducidos fuera del vaso y llevados aguas abajo nuevamente al río, evitando el daño a otras estructuras y con el máximo de seguridad. Estas funciones se realizan normalmente utilizando vertedores y sólo en casos especiales de obras pequeñas, se -- utilizan sifones. Por ésta razón, las obras de excedencia son a menudo vertedores de excedencias.

Dentro de las componentes de la obra de excedencias se encuentra la estructura de control. La estructura de control regula las descargas del almacenamiento. La regulación puede efectuarse mediante una sección de control constituida por un simple umbral, un cimacio, un orificio ó una tubería, que pueden descargar libremente ó sumergidos y estar controlados o no por compuertas ó válvulas. En cualquier caso, es muy importante lograr la mayor eficiencia de la estructura de control, con un coeficiente de descarga lo más grande posible para la descarga máxima y evitar el despegue de la lámina vertiente.

Para el caso de los vertedores de cimacio, la forma del perfil puede interpretarse mediante el principio del proyectil. De acuerdo a éste principio, se supone que la componente horizontal de la velocidad del flujo es constante y que la única fuerza

actuante sobre la lámina vertiente es la gravedad.

Los primeros diseños de perfiles de vertedores fueron elaborados con ésta teoría de la parábola simple pero no resultaban satisfactorios dado que se generaban presiones negativas en la cresta de los vertedores que ocasionaba graves daños. Desde 1868 a 1888, Bazin hizo las primeras investigaciones comprensivas de laboratorio, de formas de perfiles. El uso de los datos de Bazin en el diseño produciría una forma de cresta que coincidiría con la superficie inferior de la lámina vertiente aerada sobre un vertedor de cresta afilada. Teóricamente, la adopción de tal perfil, conocido como el Perfil Bazin, no causaría presiones negativas sobre la cresta. En la actualidad, sin embargo, se ha observado que existe fricción debido a la rugosidad sobre la superficie del vertedor. Por tal razón las presiones negativas sobre éste perfil no se pudieron evitar. La presencia de presiones negativas conduciría al peligro de daños por cavitación.

Por lo visto anteriormente se comprende la necesidad de lograr diseños de cimacios que no presenten problemas de presiones negativas ó subatmosféricas. Por tal razón el Perfil de Bazin fué modificado varias veces y surgieron así varias propuestas de diseño.

La determinación de la forma que debe asignarse al perfil de un vertedor preocupó a investigadores como Creager quien, partiendo de los datos de Bazin y otras realizadas por él mismo, en el año de 1917, sugirió la idea de dar al cimacio la forma del

perfil inferior de la vena líquida cayendo de un vertedor de ---
cresta delgada.

El fundamento de dicha idea está en buscar, como ya se ha mencionado, que no se presenten depresiones sobre el cimacio, las cuales pueden ocasionar desprendimientos de la lámina vertical, vibraciones y, en consecuencia, erosiones que afecten sensiblemente el funcionamiento de la estructura vertedora ó inclusive ponerla en peligro de falla. En realidad, la presencia de una pared rugosa modifica las condiciones de frontera del flujo, provocando una reducción en la velocidad de la lámina y con ello un incremento en las presiones sobre el cimacio, lo cual dá un cierto margen de seguridad al trabajo de la estructura.

Las experiencias de Bazin y Creager llevaron a éste último a encontrar un perfil vertedor que cumpliera con la condición establecida anteriormente. De hecho, las mediciones realizadas por los dos investigadores se limitaron a una zona cercana a la cresta vertedora, por lo que los puntos que Creager dá para zonas alejadas de ella son extrapolaciones de los datos de que disponía. Debido a esto, el Perfil Creager penetra un poco en la frontera inferior de la vena libre.

Se han realizado una serie de experimentos tendientes a definir el perfil inferior de la vena libre aún en zonas suficientemente alejadas de la cresta del cimacio. Tal es el caso del Perfil Scimeni, el criterio adoptado por el Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los Estados Unidos de Norteamérica, el Perfil ---

Lane-Davis, el Perfil Smetana, el Perfil De Marchi y el Perfil de Escande, entre otros.

Los perfiles antes vistos se consideran aereados, es decir, el espacio presente debajo de la lámina vertiente debe estar sujeta a total presión atmosférica. De no existir aereación suficiente la lámina vertiente expulsaría al aire debajo de ella provocando una disminución de presión en ése sitio. Esta reducción de presión causará efectos indeseables tales como :

- a).- Incremento de la diferencia de presión en el vertedor.
- b).- Cambio en la forma del perfil de la lámina vertiente diferente a la de diseño.
- c).- Incremento del gasto, seguido por oscilaciones del flujo en la lámina vertiente, situación inaceptable cuando se pretende utilizar al vertedor como estructura de aforo.
- d).- Comportamiento inestable del modelo.

El presente trabajo tiene como objetivo primordial el de comparar los resultados experimentales obtenidos en el Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, y los propuestos por el U.S. Army Corps of Engineers, referentes a la distribución de presiones en cimacios tipo Creager (con descarga libre y al centro del claro), con los obtenidos en forma teórica por medio de los flujos con potencial.

Para el desarrollo de ésta tésis se ha dividido en cinco capítulos, que comprende cada uno lo siguiente :

En el primer capítulo, como se vió a manera de introducción, se menciona brevemente la historia de los cimacios. En él se describe el problema básico que preocupó a varios investigadores para adoptar la forma del perfil del cimacio que tuviera un comportamiento adecuado para dar lugar, posteriormente, al Perfil de Cimacio Tipo Creager.

Se mencionan también los efectos causados sobre el cimacio por la presencia de presiones inferiores a la atmosférica.

En el segundo capítulo, de antecedentes, se menciona la manera de obtener la geometría de las secciones de las crestas vertedoras por dos criterios diferentes : el primero, el propuesto por el U.S. Bureau of Reclamation (U.S.B.R.) ó Perfil Creager (que toma en cuenta las velocidades a la llegada) y, el segundo, el del U.S. Army Corps of Engineers (Perfiles Tipo WRS) en el que la velocidad a la llegada se considera despreciable.

Se mencionan los resultados que han obtenido tanto el U.S.B.R., como el U.S. Army Corps of Engineers en lo que respecta a las distribuciones de presión sobre el cimacio al estar sujetos a diferentes condiciones de operación. Dichos resultados se presentan en forma de gráficas y algunas son adimensionadas. Se incluye también el valor de las presiones resultantes en un cimacio operando bajo la carga de diseño, que juega un papel muy importante en el análisis de estabilidad del mismo.

El tercer capítulo, mediciones en modelo, se presentan las pruebas efectuadas en el modelo de cimacio tipo Creager, del Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería de la --- U.N.A.M., sujeto a diferentes relaciones de carga .

Se incluye también el tema de Análisis Dimensional, que sirvió de apoyo en la obtención de los resultados mostrados al final de éste capítulo y, parte de la ponencia presentada en el IX Congreso Nacional de Hidráulica referente a la forma de obtener el perfil de la superficie libre en cimacios tipo Creager .

En el cuarto capítulo, de comparación teórica, se comparan los resultados obtenidos experimentalmente en el capítulo anterior y los propuestos por el U.S. Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station (Perfiles tipo WES), con los obtenidos usando la teoría de los flujos con potencial, para diferentes relaciones de carga .

Por último, en el quinto capítulo, se presentan las conclusiones, de carácter general, sobre éste tema .

SEGUNDO CAPITULO

A N T E C E D E N T E S

II).- ANTECEDENTES

Desde que Creager efectuó sus primeras investigaciones tendientes a definir la forma del perfil de un cimacio (Perfil Creager), muchos investigadores y dependencias estudiaron el Perfil para diferentes condiciones geométricas y de operación.

Se han estudiado en forma extensa las secciones de las crestas en los laboratorios hidráulicos del Bureau of --- Reclamation, y se han publicado datos sobre la forma en que se pueden determinar las secciones para las crestas vertedoras.

De ésta forma, para cualquier talud de la cara aguas arriba del cimacio y cualquier profundidad del canal de acceso, el perfil en la zona del cuadrante aguas abajo tiene la ecuación general :

$$\frac{y}{H_d} = -k \left(\frac{x}{H_d} \right)^n \text{-----} 2.a$$

Donde :

x e y.- son coordenadas de un sistema cartesiano, como se indica en la figura 2.1

H_d.- carga de diseño elegida.

n y k.- son coeficientes experimentales que dependen del talud del paramento aguas arriba y de la velocidad de llegada.

El U.S.B.R. recomienda los valores de n y k obtenidos de

las figuras 2.2 y 2.3 en función de la relación carga de velocidad de llegada / carga de diseño (h_0/H_d) y talud del paramento aguas arriba del cimacio. En el caso de cimacios altos $P/H \geq 1$, la carga de velocidad de llegada es despreciable y $h_0/H_d = 0$

Para el perfil en la zona del cuadrante aguas arriba, puede recurrirse a las gráficas propuestas por el U.S.B.R., y -- que se muestran en la figura 2.4

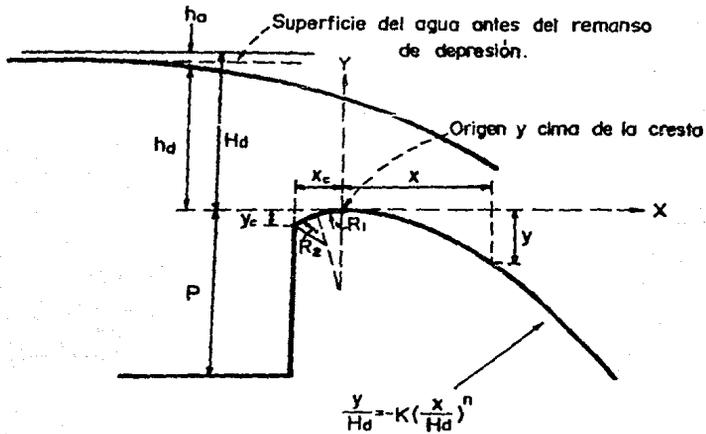


Fig.2.1 - Elementos de las secciones de las crestas con la forma de la lámina vertical.

Las gráficas que se muestran, sirven para diseñar perfiles de cimacio con velocidades de llegada desde prácticamente cero hasta aquellas que dan una carga de velocidad de $0.2H_d$ y para paramentos aguas arriba del cimacio con talud de 3:3, 2:3, 1:3

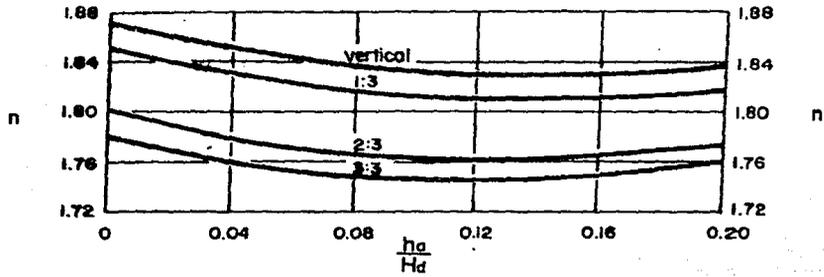


Fig. 2.2.-Valores de "n".

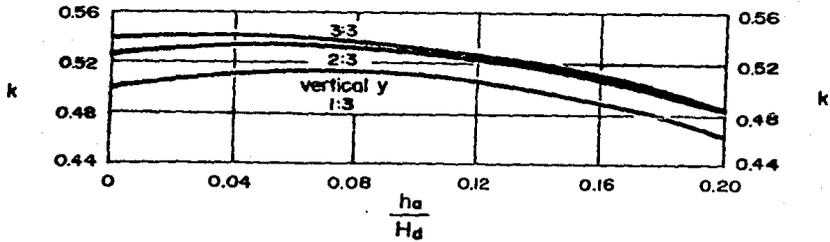


Fig. 2.3.-Valores de "k".

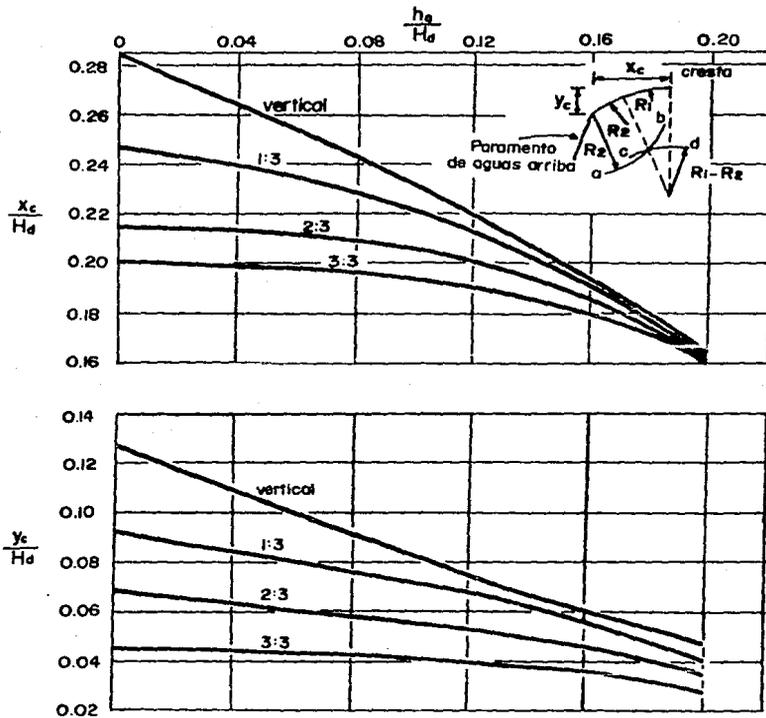


Fig. 2.4 - Valores de x_c y y_c .

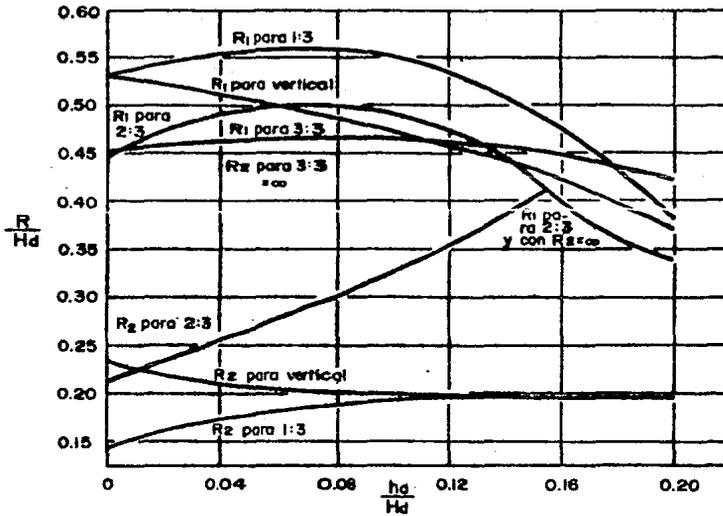


Fig. 2.4 (cont.)-Valores de R_1 y R_2

y para paramento vertical ; sin embargo, se recomienda utilizar éstas gráficas sólo cuando la velocidad de llegada es considerable.

En caso de tener paramentos con taludes diferentes a los especificados en las gráficas, pueden hacerse interpolaciones -- para obtener la información requerida.

Para el caso de cimacios altos ($P/H \geq 1$), la carga de diseño H_d se confunde con la carga sobre la cresta h_d . En el caso de velocidad de llegada apreciable (cimacios bajos ó $P/H < 1$) se recomienda inclinar el paramento aguas arriba del cimacio hasta 45° a fin de reducir los problemas de estabilidad estructural.

El Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos de Norteamérica utiliza perfiles de cimacio un poco distintos que los del tipo U.S.B.R.. Dichos perfiles se conocen como Perfiles Tipo WES y están en función de la velocidad de llegada, del talud y de la relación P / H_d , donde P es el desnivel entre la cresta del cimacio y el fondo del canal de acceso, en metros ; H_d carga de diseño del cimacio (en m).

Así se tiene, para el caso en el que la velocidad de llegada se considera despreciable, talud vertical y $P / H_d > 1$. Para este caso el perfil del cuadrante de aguas abajo tiene la ecuación:

$$x^{1.85} = 2H_d^{0.85}y$$

Donde :

x e y.-son coordenadas de un sistema cartesiano como el indicado en la figura 2.5

Hd.-carga de diseño del cimacio, en m.

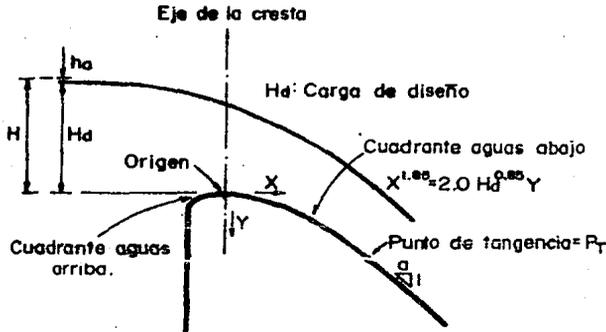


Fig.2.5.-Geometría de un cimacio.

Para el perfil del cuadrante aguas arriba del cimacio, se recomienda la fórmula :

$$y = 0.724 \frac{(x + 0.270 H_d)^{1.85}}{H_d^{0.85}} + 0.126 H_d - 0.4315 H_d^{0.375} (x + 0.270 H_d)^{0.625}$$

donde las variables son las mismas ya especificadas antes. La figura 2.6 muestra el croquis ilustrativo.

Esta forma elimina en gran parte la zona de separación que ocurre inmediatamente aguas abajo del talud vertical.

Por razones de estabilidad estructural ó de tipo geométrico, puede ser necesario abandonar la forma del perfil en la zona del cuadrante aguas abajo y continuarlo con una recta tan--

gente al perfil e inclinación de talud $a:1$. El punto de tangencia (P.T.) entre el perfil y la recta, se determina igualando la derivada de la ecuación (2.a) con la tangente $(1/a)$ del ángulo de inclinación de la recta y la horizontal, esto es:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{kn}{Hd^{n-1}} x_r^{n-1} = \frac{1}{a} \quad \text{--- 2.b}$$

de donde :

$$x_r = \frac{Hd}{(kan)^{1/(n-1)}} \quad \text{--- 2.c}$$

La ordenada y_r se obtiene substituyendo x_r en la ec. (2.a).

La figura 2.7 permite determinar las coordenadas del punto de tangencia para el Perfil Tipo WES mostrado en la figura (2.5).

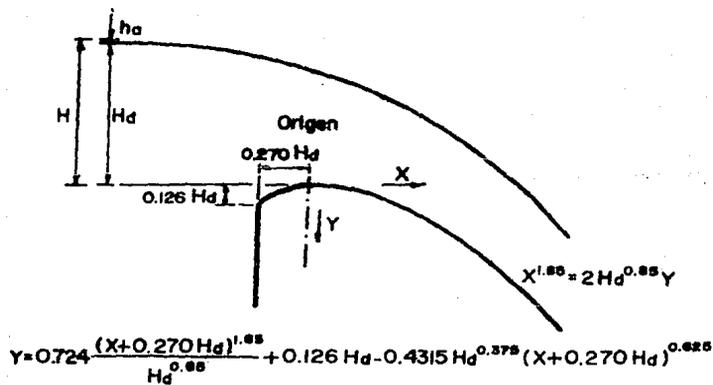


FIG. 2.6 - Ecuación del cuadrante aguas arriba, para el sistema coordinado mostrado.

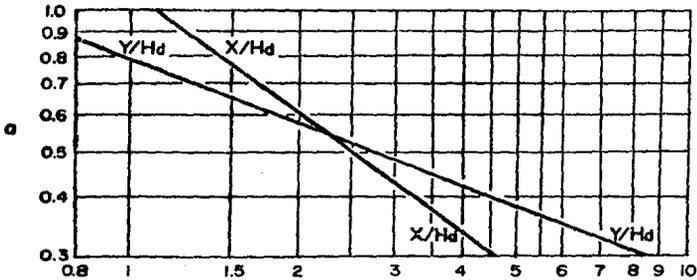


Fig. 2.7.- Coordenadas del punto de tangencia Pt. Talud aguas arriba vertical y velocidad de llegada despreciable ($P/H_d > 1$).

Para el caso del Diseño del Perfil de Cimacio Tipo Creager y teniendo talud aguas arriba vertical con velocidad de llegada considerable, de las figuras (2.2 y 2.3) se tendrán los siguientes rangos de variación de los valores de n y k :

$$n=1.83-1.87 \quad ; \quad k=0.467-0.512$$

Dichos valores, como puede verse, dependen de la relación h_o/H_d . Por lo que, tomando cualquier valor de éstos parámetros (dentro de su respectivo rango) y sustituyendo en la ecuación :

$$\frac{y}{H_d} = -k \left(\frac{x}{H_d} \right)^n$$

Comparando ésta ecuación con la que propone el U.S. Army Corps of Engineers :

$$x^{1.83} = 2.H_d^{0.83} y$$

se puede decir que son muy parecidas. Sin embargo, el primer criterio de diseño toma en cuenta las velocidades a la llegada y el segundo no.

Por ésta razón, posteriormente se utilizarán las gráficas de Cimacios Tipo WES, tanto de superficie libre del --- agua como de distribución de presiones, dado que la diferencia entre éstos dos criterios no es muy importante.

Ahora bien, para relaciones de la profundidad del canal de acceso P a la carga de diseño mayores que uno, se consideran despreciables los efectos de la velocidad de llegada.

Cuando el perfil del cimacio se diseña exactamente en la forma de la capa inferior de un desborde libre, la presión sobre la cresta del cimacio bajo la altura de diseño debería ser teóricamente nula. Sin embargo, por razones prácticas, tal perfil ideal está modificado generalmente de modo que presiones bajas se desarrollarán bajo la altura de diseño. Como el cimacio debe ser operado bajo alturas diferentes de la altura de diseño, la presión aumentará bajo las alturas más bajas y disminuirá bajo las alturas más grandes. Suponiendo un flujo irrotacional bidimensional, la presión sobre la cresta del cimacio puede ser determinada seguramente analíticamente mediante un método numérico gráficamente por análisis de malla del flujo ó instrumentalmente por una analogía electrónica. Una determinación más exacta de la presión, sin embargo, dependerá de los ensayos de modelo.

Las pruebas efectuadas por el U.S. Bureau of Reclamation,

han demostrado que las presiones menores que la atmosférica sobre una cresta que tiene la forma que toma libremente la lámina vertiente, no excede de, aproximadamente, la mitad de la carga de proyecto, cuando ésta no es menor de, más o menos, el 75 % de la carga máxima. En la mayor parte de las condiciones de proyecto de los vertedores pequeños, éstas presiones negativas serán pequeñas, y se pueden tolerar porque no alcanzan valores absolutos que puedan producir cavitación. Sin embargo, debe tenerse cuidado, al darle la forma a la cresta, cuando se vayan a producir éstas presiones negativas, porque las irregularidades producidas por salientes bruscos, depresiones ó proyecciones amplificarán las presiones negativas a una magnitud en las que se produzcan cavitaciones.

La presión negativa sobre la cresta se puede descomponer en un sistema de fuerzas que obran hacia arriba y hacia abajo de la corriente. Estas fuerzas deben tomarse en cuenta al analizar la estabilidad estructural de la presa.

En la figura 2.8 se muestra un diagrama aproximado de las fuerzas de las presiones subatmosféricas, cuando la carga de proyecto usada para determinar la forma de la cresta es del 75 % de la carga máxima. Estos datos se obtuvieron del promedio del resultado de pruebas efectuadas en vertedores de forma ideal con velocidad de llegada despreciable. Se puede suponer, para relaciones de presiones de cargas intermedias, que varían en forma lineal, considerando que no se producen presiones subatmosféri--

cas cuando $H_d/H=1$

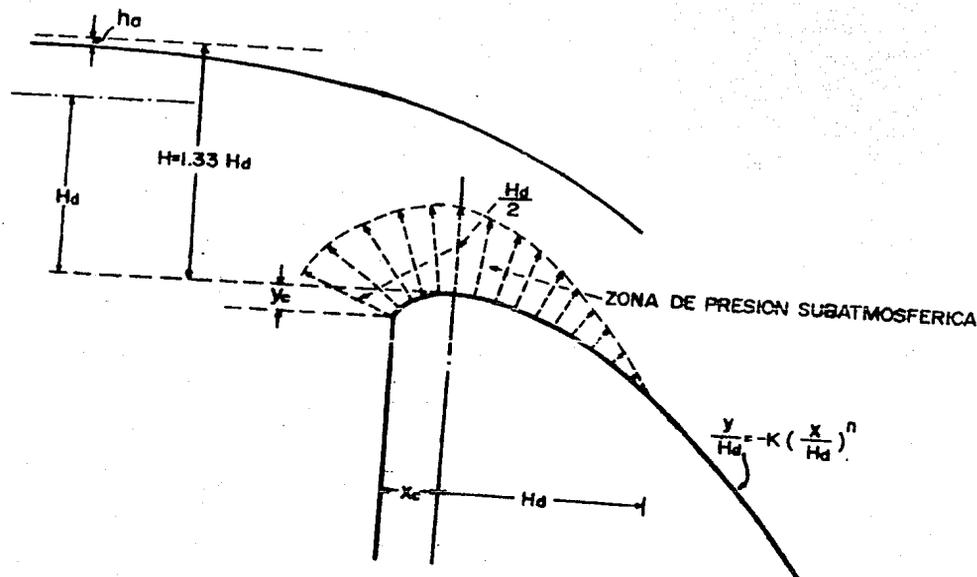


Fig.2.8.- Presiones subatmosféricas en la cresta para $H_d/H=0.75$

Cuando las crestas de los cimacios están controladas por compuertas y éstas están abiertas parcialmente funcionarán como orificios. Con toda la carga sobre la compuerta, y está sólo un poco abierta, la trayectoria de la lámina de descarga libre será igual a la de un chorro al salir de un orificio. Para un orificio vertical, la curva del chorro se puede representar por la ecuación de la parábola :

$$-y = \frac{x^2}{4H}$$

en la que H es la carga sobre el centro de la abertura. Para un orificio inclinado un ángulo θ a partir de la vertical, la ecuación será :

$$-y = x \tan \theta + \frac{x^2}{4H \cos^2 \theta}$$

Si se quieren evitar las presiones subatmosféricas a lo largo del contacto con la cresta, la sección del cimacio aguas abajo de la compuerta debe coincidir con el perfil de la trayectoria.

Los experimentos han demostrado, que cuando las compuertas se operan con aberturas pequeñas con cargas elevadas, se producen presiones negativas a lo largo de la cresta en la región que queda inmediatamente abajo de la compuerta, si la sección del cimacio es más delgada que la que tendría si se ajustara a la de la trayectoria libre. Las pruebas demostraron que las presiones subatmosféricas serían iguales a, aproximadamente, la décima parte de la carga de proyecto si el cimacio tiene la forma del perfil ideal de la lámina vertiente para la carga máxima y si la compuerta se opera con aberturas pequeñas. El diagrama de las fuerzas para ésta condición se muestra en la figura 2.9

La adopción del perfil de la trayectoria de un chorro en vez del de la lámina vertiente aguas abajo del umbral de la compuerta, da por resultado un cimacio más ancho y una disminu--

ción en la eficiencia de la descarga cuando la compuerta está completamente abierta. Cuando la eficiencia de la descarga no tiene importancia y, cuando por necesidades de estabilidad estructural, es necesario construir un cimacio más ancho, se puede adoptar el perfil de la trayectoria del chorro para evitar presiones subatmosféricas en zonas a lo largo de la cresta. Cuando al cimacio se le dá la forma ideal de la lámina vertiente para la carga máxima, el área de presión subatmosférica se puede disminuir colocando el umbral de la compuerta aguas abajo, de la cresta del cimacio. En ésta forma, queda un orificio inclinado aguas abajo, con lo que el chorro tendrá una trayectoria más inclinada que se ajusta más a la forma de la lámina vertiente.

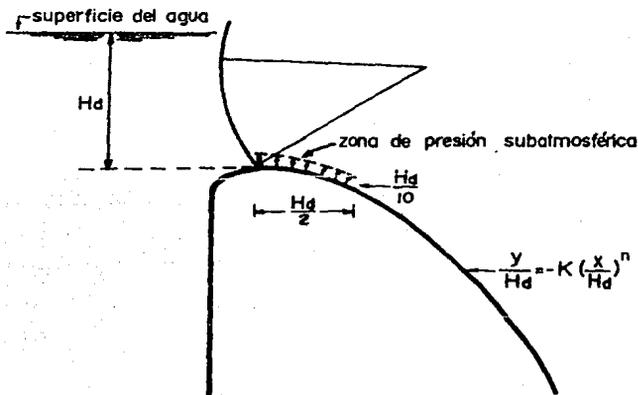


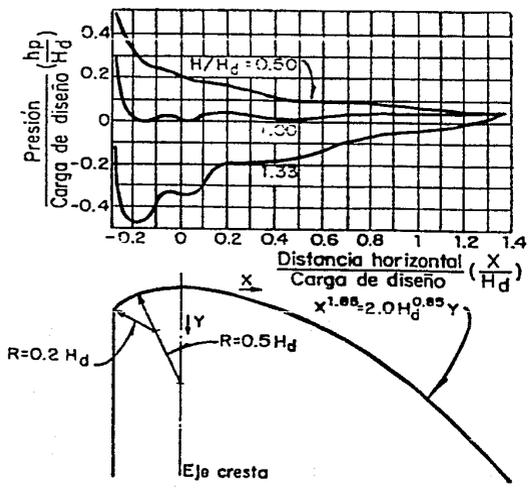
Fig.2.9.- Presiones subatmosféricas que se producen en las descargas debajo de las compuertas.

Las distribuciones de presión sobre la cresta de un cimacio con pilas y sin ellas bajo tres cargas diferentes, basado sobre ensayos CW 801 de las formas Tipo WES (Waterways Experimental Station), se muestran en dibujos adimensionados (figuras 2.10a y 2.10b). Las presiones para relaciones intermedias, se pueden obtener por interpolación.

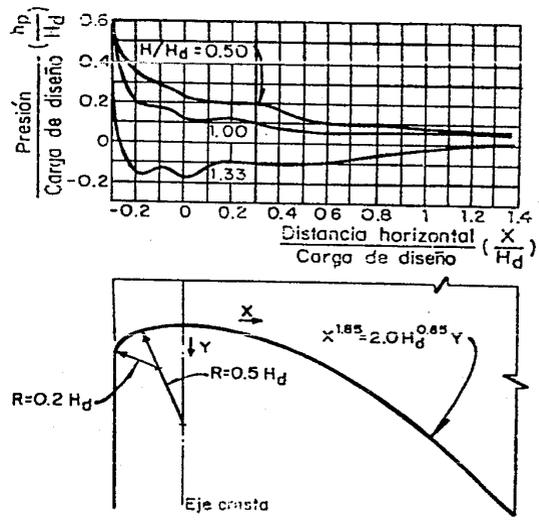
Por causa de la conversión de la energía estática a cinética a medida que el agua fluye sobre el cimacio, la presión hidrostática sobre la cara aguas arriba de la cresta del cimacio es reducida actualmente. Esta reducción en la presión no es apreciable, pero donde el brazo del momento es largo, como en presas altas, el efecto sobre la estabilidad puede ser importante considerarlo. El método usual de análisis, asumiendo distribución de la presión en línea recta cerca de la cresta, resultará en un sobrediseño del cimacio, particularmente para presas altas. Tal sobrediseño es un procedimiento aceptado, siempre y cuando se provea un factor adicional de seguridad.

Con base a pruebas desarrolladas por el U.S. Bureau of Reclamation y la oficina del Waterways Experimental Station, se han valuado las presiones resultantes en un cimacio operando bajo la carga de diseño. Los resultados se muestran en la figura 2.11 y se utilizan en el análisis de estabilidad del cimacio.

Las fuerzas R_2 y R_3 que aparecen en la figura 2.11 son resultantes vertical y horizontal respectivamente, la primera, de todas las presiones verticales que actúan en toda la superfi-



a).- Presiones sobre el cimacio, sin pilas



b).- Presiones sobre el cimacio, con pilas y a lo largo del centro del claro

Fig.2.10.- Presiones sobre el cimacio.

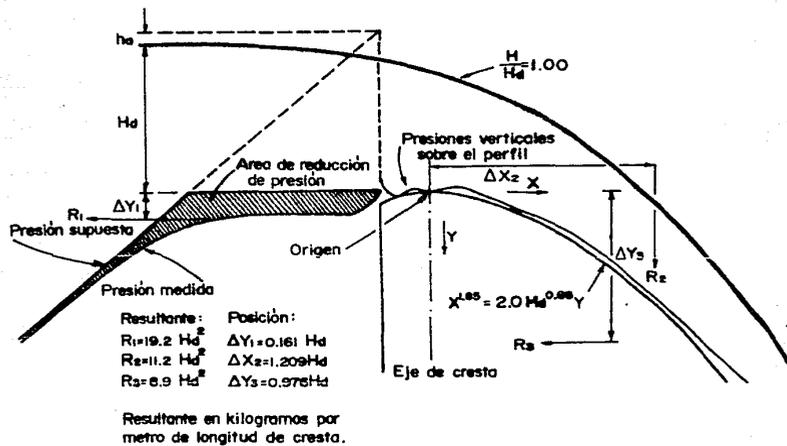


Fig. 2.11.- Fuerzas resultantes, por metro de longitud de cresta, en cimacio sin pías.

cie curva del cimacio, la segunda, de todas las presiones horizontales que actúan sólo en la superficie curva del cimacio, de la cresta hacia aguas abajo. La fuerza horizontal R_1 que aparece también en la figura 2.11, es una fuerza tal que debe considerarse con la posición y sentido indicados, conjuntamente con la fuerza resultante del diagrama de presión hidrostática que siempre se considera, para tomar en cuenta el efecto horizontal que actúa desde la cresta del cimacio hasta la base del mismo, pero considerando la cara aguas arriba del cimacio y desde la misma cresta.

Cuando se diseña un cimacio para una carga H_d menor a la carga máxima de operación, se dice que es deprimido. Para este tipo de cimacios se hacen las consideraciones de diseño indicadas en la figura 2.12, donde el valor de C_r debe tomarse de la siguiente manera:

$C_r = 0.5$ para cimacios sin pilas y con relación
1.33

$C_r = 0.6$ para cimacios con pilas y con relación
1.33

Para relaciones de H/H_d menores de 1.33 puede suponerse que tanto C_r como el diagrama de presiones varían linealmente -- hasta cero cuando la relación anterior es igual a 1.

Debido a la tendencia que tiene la lámina vertiente a separarse de un perfil deprimido, la carga máxima no debe ser --

mayor que 1.33 veces la carga de diseño .

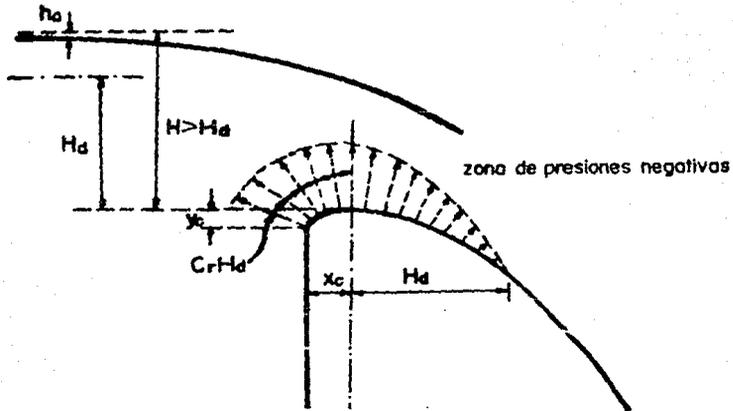


Fig. 212 - Distribución de presiones negativas, supuestas para diseño, para cargas reales H superiores a la carga de diseño H_d , considerando velocidad de llegada despreciable.

Para evitar el efecto de cavitación, las presiones negativas desarrolladas en un perfil deprimido no debe llegar a la presión de vaporización del agua .

TERCER CAPITULO

M E D I C I O N E S
E N
M O D E L O

III).- MEDICION EN MODELO

3.1).- Localización

El Laboratorio de Hidráulica, de la Facultad de Ingeniería de la U.N.A.M., se encuentra localizado en las instalaciones del edificio principal de ésta Facultad.

Dentro del Laboratorio de Hidráulica se encuentra ubicado el Salón de Modelos Aerodinámicos. En dicho Salón se construyó un Modelo de Cimacio Tipo Creager, con el cual se trabajó para el desarrollo de ésta tesis.

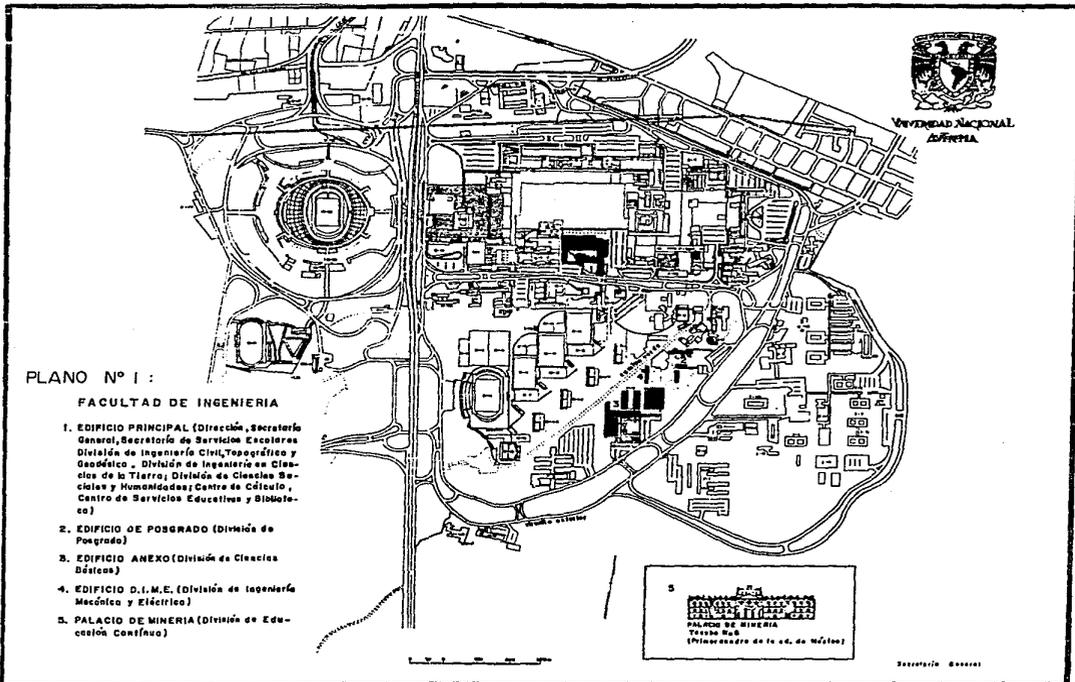
Dicho modelo se construyó con el objeto de realizar diversas investigaciones de tipo experimental.

Cabe hacer la aclaración de que se le ha dado el nombre de modelo, por el hecho de ser una instalación experimental, pero no porque simule la escala de algún prototipo, por lo que para su construcción se trató como obra hidráulica de dimensiones reducidas.

En los Planos N° 1 y 2, puede verse la ubicación del Edificio Principal de la Facultad de Ingeniería de la U.N.A.M., así como también la del Salón de Modelos Aerodinámicos.



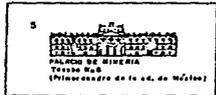
UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA



PLANO N° 1 :

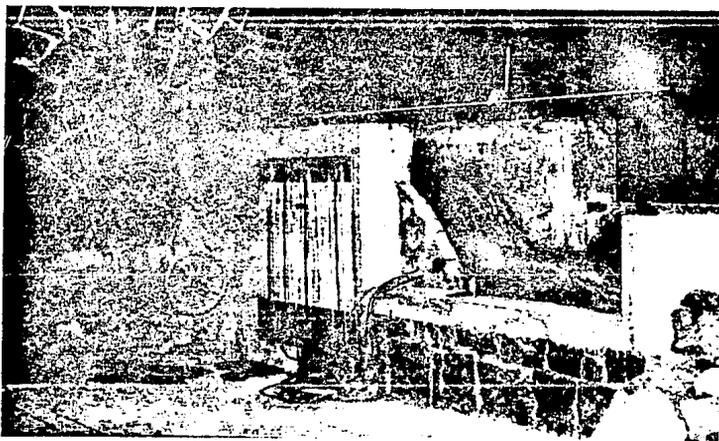
FACULTAD DE INGENIERIA

1. EDIFICIO PRINCIPAL (Dirección, Secretaría General, Secretaría de Servicios Escolares, División de Ingeniería Civil, Topográfica y Geodésica, División de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, División de Ciencias Sociales y Humanidades, Centro de Cálculo, Centro de Servicios Educativos y Biblioteca)
2. EDIFICIO DE POSGRADO (División de Posgrado)
3. EDIFICIO ANEXO (División de Ciencias Básicas)
4. EDIFICIO D.I.M.E. (División de Ingeniería Mecánica y Eléctrica)
5. PALACIO DE MINERIA (División de Educación Continua)

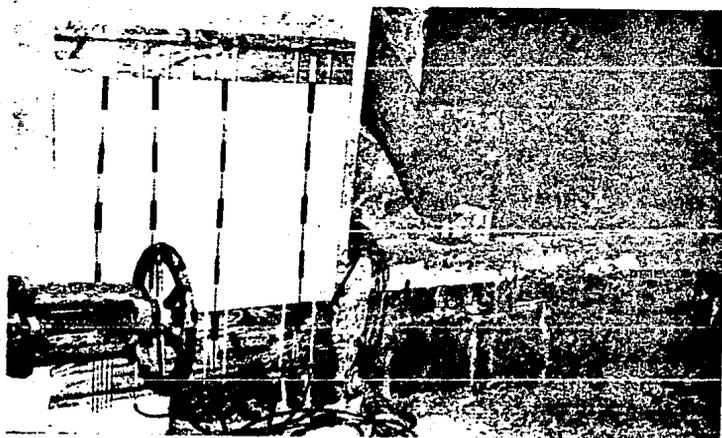


PALACIO DE MINERIA
Tercer Piso
(Primera planta de la ed. de México)

Dirección General



Fotografía No.1.- Vista general del modelo de cimacio.



Fotografía No.2.- Otra vista del modelo y tablero de piezómetros.

3.2).- Descripción del Modelo

A continuación se describen las partes que constituyen el Modelo de Cimacio Tipo Creager así como también se muestran las características más importantes del mismo.

Para la descripción del modelo se subdividirá en diferentes partes, de acuerdo al sentido del flujo, de la siguiente manera :

- A).- Alimentación.- consta de una tubería de fierro fundido de 10" de diámetro, con una capacidad máxima de 90 lts/seg.
- B).- Almacenamiento.- consiste en un tanque cuyas dimensiones son : 1.30 X 0.7 X 1.60 metros, y sirve para almacenar el agua que llega al modelo, proporcionando de ésta forma una carga Hv sobre el vertedor .
- C).- Dispositivos Tranquilizadores.- son dos y se encuentran localizados uno aguas arriba y otro en la parte de aguas abajo del cimacio .

Sirven para evitar, en la medida de lo posible, la formación de olas que pueden provocar variaciones u oscilaciones en los niveles de la superficie del agua tanto en el cimacio como en el vertedor Cipolletti. Dichas variaciones pueden

ocasionar oscilaciones tanto a la hora de cuantificar el gasto (Q) que está vertiendo como al tomar las lecturas en los piezómetros ubicados a lo largo del cimacio.

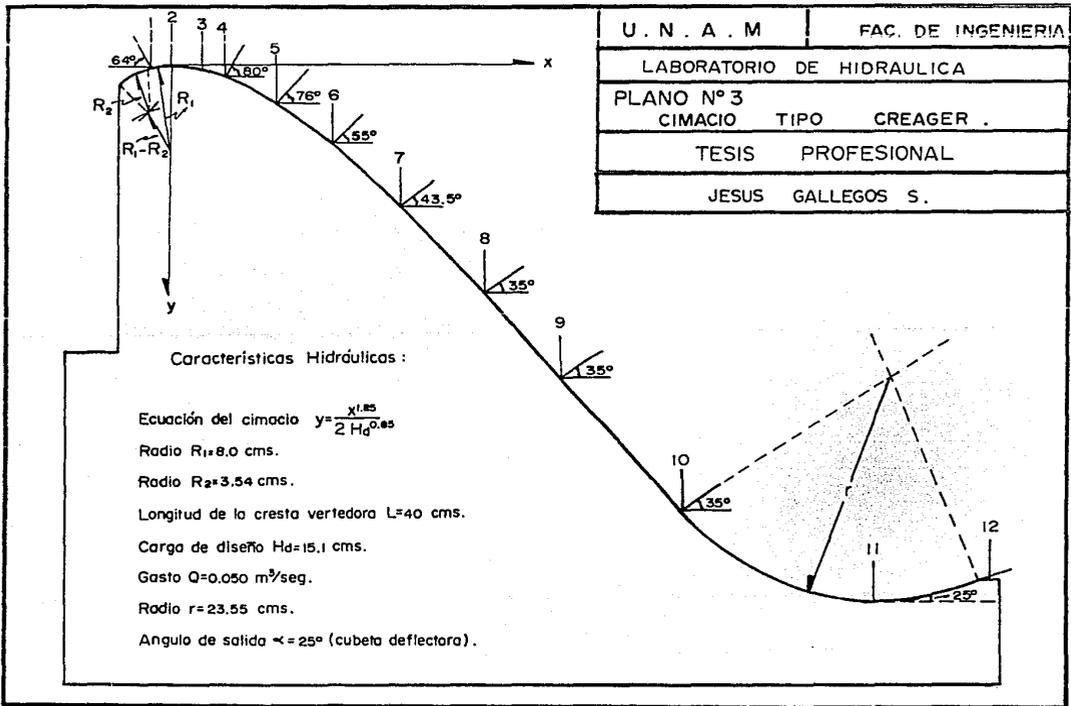
D).- Canal de Acceso.- sirve para conducir el agua hasta el vertedor, que capte el agua de almacenamiento y la conduzca hasta la cresta del cimacio con velocidad pequeña. La velocidad del agua en el canal de acceso y la profundidad de éste P (30 cm.) respecto de la cresta vertedora tienen influencia importante en la descarga y en el diseño del perfil del cimacio.

E).- Cimacio.- en el Plano N° 3 se muestra el Perfil del Cimacio y se muestran algunas de las características más importantes del mismo.

Como puede verse, en el plano, se han colocado la ubicación de los piezómetros (12) sobre el Perfil y el ángulo que forma la tangente con respecto a la normal en el punto de intersección de cada piezómetro con el Perfil del Cimacio.

F).- Piezómetros.- en el Plano N° 4 se muestra la localización de los piezómetros sobre el cimacio.

Dichos piezómetros son de tubo de vidrio de 1.20 metros de longitud y de 0.58 centímetros de diámetro.



Características Hidráulicas :

Ecuación del cimacio $y = \frac{x^{1.85}}{2 H_d^{0.85}}$

Radio $R_1 = 8.0$ cms.

Radio $R_2 = 3.54$ cms.

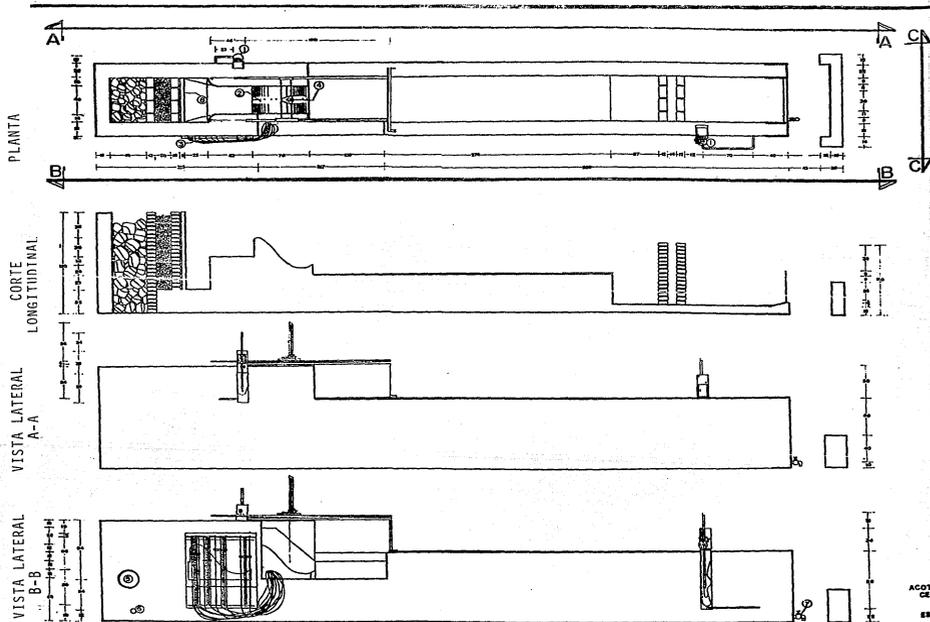
Longitud de la cresta vertedora $L = 40$ cms.

Carga de diseño $H_d = 15.1$ cms.

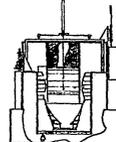
Gasto $Q = 0.050$ m³/seg.

Radio $r = 23.55$ cms.

Angulo de salida $\alpha = 25^\circ$ (cubeta deflectora).



VISTA FRONTAL C-C



VERTEDOR CIPOLETTI



NOTAS.

- 1 LIMBIETRO
- 2 PERRO DE CHACIO CREAGER
- 3 PEZOMETROS
- 4 VERNIER
- 5 BRIDA DE ENTRADA DE 10"
- 6 BRIDA DE DESCRUBA DE 3"
- 7 VALVULA DE GLOBO DE 2"
- 8 MALLA DEL N° 2

FACULTAD DE INGENIERIA

UNAM

LABORATORIO DE HIDRAULICA

PLANO N° 4

MODELO: CREAGER DE PRESIONES

TESIS PROFESIONAL

JESUS CALLEGOS SILVA

tro, conectados con mangueras de plástico hacia la plantilla del Perfil del Cimacio .

G).- Limnímetros.- en todo el modelo, utilizado como conjunto, se cuenta con 3 limnímetros para la determinación de lecturas. Dos de ellos son de gancho, uno aguas arriba del cimacio que sirve para determinar la carga (Hv) sobre él y, el otro, aguas abajo del cimacio que mide la carga registrada sobre el vertedor Cipolletti .

Por último, el restante limnómetro, es de punta y con la ayuda de él se pueden determinar los tirantes a lo largo del Perfil del Cimacio .

H).- Rápida.- el Perfil del Cimacio continúa con una estructura, denominada rápida de gran pendiente (0.75:1) y relativamente corta (25 cm.), que remata en otra superficie de curvatura contraria a la de la cresta .

I).- Estructura terminal.- consiste en una cubeta de lanzamiento que sirve para disipar la energía cinética que adquiere el agua en su descenso y evitar la erosión aguas abajo de ésta estructura .

J).- Canal de Salida.- continúa después de la estructura terminal. Es de sección rectangular y sus dimensiones son $L=6.06\text{ m}$, $b=0.71\text{ m}$.

Conduce el agua hacia un vertedor Tipo Cipolletti.

K).- Vertedor Cipolletti.- en la figura 3.1 se muestra la geometría del vertedor.

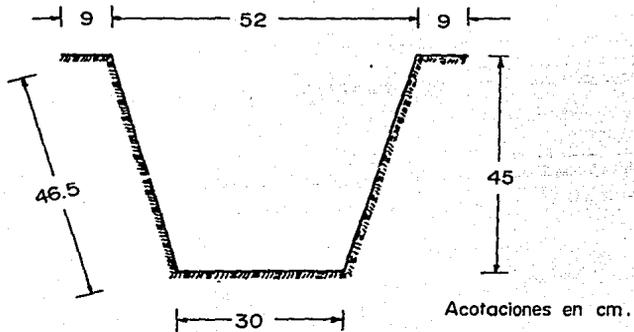


FIGURA 3.1

3.3).- Análisis Dimensional

A).- Introducción :

Para resolver problemas de Ingeniería Hidráulica se utilizan diferentes procedimientos ó técnicas, entre las que destacan los modelos matemáticos e hidráulicos. En los primeros un fenómeno físico es representado, en forma más o menos simplificada por un conjunto de ecuaciones que permiten describir el comportamiento de dicho fenómeno. Con los segundos se estudia a escala, con ayuda de un modelo físico, las condiciones del flujo de un prototipo, las que dependen de las fronteras y estructuras por las que fluye; además se estudian los efectos de la corriente sobre dichas fronteras y estructuras.

Los modelos físicos al igual que los modelos matemáticos son herramientas de las que dispone el ingeniero para resolver diferentes problemas que se le presenten. Entre las ventajas de los modelos físicos se encuentran las siguientes :

- a).- Se reproducen con exactitud las condiciones de frontera por muy complejas que sean éstas; lo cual no siempre es posible incluirlas en los modelos matemáticos.
- b).- Se reproducen los efectos no lineales, los que frecuentemente no es posible hacerlos intervenir en los modelos matemáticos.
- c).- Permiten la visualización en conjunto de todos

los fenómenos a lo largo de todo el espacio del modelo y en forma continua en el tiempo .

- d).- En el estudio de obras hidráulicas de cualquier tipo, se visualizan rápidamente las modificaciones que deben hacerse a cada componente de ella, para que el conjunto funcione satisfactoriamente desde el punto de vista hidráulico .

Las variables que intervienen en un modelo hidráulico ó en general en estudios hidráulicos conviene relacionarlas entre sí para formar expresiones adimensionales, es por ello que el Análisis Dimensional es una herramienta que proporciona información acerca del fenómeno en estudio y que a la vez es útil para llevar a cabo lo siguiente :

- a).- Reducir el número de variables, de un problema, agrupándolas en números ó parámetros adimensionales las cuales permiten dar una interpretación y presentación en forma de gráficas a los resultados experimentales .
- b).- Determinar las dimensiones de los coeficientes empíricos .
- c).- Comprobar cualitativamente las ecuaciones .
- d).- Establecer y realizar experimentos generalizando los resultados .
- e).- Formular leyes de similitud de considerable importancia en la investigación experimental .

El representar un fenómeno físico con un modelo matemático implica homogeneidad de dimensiones en ambos miembros de la igualdad.

Entre las principales ventajas que se pueden obtener al trabajar con números adimensionales se pueden mencionar las siguientes :

- 1).- Permiten obtener ó verificar una expresión matemática .
- 2).- Permite reducir el número de variables de un problema simplificándolo en forma importante .
- 3).- Al estudiar un fenómeno hidráulico en un modelo y lograr diferentes valores para los números adimensionales no se necesitan variar todas las variables que intervienen en cada uno de ellos, ya que algunas son difíciles de modificar, como puede ser el caso de la viscosidad (exige cambio de fluido), gravedad, valor de la presión dentro de cierto rango, etc.
- 4).- Si un fenómeno se estudia en un modelo hidráulico, las relaciones obtenidas entre los parámetros adimensionales se pueden extrapolar a prototipos de diferente tamaño ó a otros modelos .

B).- Unidades de referencia :

En toda ecuación que se utilice para describir un fenómeno

no físico las variables que intervienen en ella están relacionadas entre sí. Cada variable además de tener un valor numérico tiene una dimensión, es decir, una combinación de unidades con la cual se indica la forma como se definió la variable.

En Ingeniería las variables que se utilizan están expresadas en función de un limitado número de dimensiones básicas que son : M = masa , L = longitud y T = tiempo ó en forma equivalente F = fuerza , L y T ; ambas están ligadas por la Segunda Ley de Newton, que en función de dimensiones se escribe como :

$$\left[F \right] \quad \left[M L T^{-2} \right] \quad \text{---} \quad \textcircled{A}$$

Los paréntesis rectangulares indican que se trata de una igualdad entre dimensiones y además se observa en la ecuación A que tres de las dimensiones son independientes. En problemas donde intervengan la temperatura ó variables eléctricas además de las dimensiones mencionadas se introducen estas nuevas variables las cuales se representan como Θ = temperatura, Q = carga eléctrica.

El sistema de dimensiones que generalmente se utiliza para resolver problemas con ayuda del análisis dimensional es el de $[M, L, T]$; en la tabla 1 se indican las dimensiones que representan a diferentes variables físicas utilizadas en hidráulica y mecánica de fluidos .

Las variables que intervienen en un problema se clasifican en dos tipos : variables dependientes y variables independien

tes. La variable dependiente es la que interesa determinar; en hidráulica es común que ésta sea la velocidad ó la presión, ó alguna variable derivada de éstas dos ; como : empuje, gasto, etc. Las variables independientes intervienen en un problema y en función de las cuales interesa determinar la variable dependiente. En hidráulica son variables que generalmente describen la geometría del flujo ó representan las propiedades del fluido.

Como ejemplo se puede mencionar el siguiente :

$$V = \sqrt{2gH}$$

- V.- variable dependiente
- 2.- parámetro
- g.- aceleración de la gravedad
- H.- variable independiente

$$V = f (g, H)$$

C).- Teorema de Buckingham-Vaschy ó Teorema Π :

Matriz de exponentes.- Si se colocan en un renglón las variables que intervienen en un problema y en una columna sus dimensiones, se podrá formar la matriz de exponentes escribiendo en el cruce respectivo el exponente de la unidad correspondiente.

Definiéndose el rango de la matriz como el orden de la mayor matriz cuadrada cuyo determinante sea nulo.

El problema básico que permite reducir el número de va-

riables de un problema es el Teorema de Buckingham-Vaschy, ó Teorema π , que se enuncia de la siguiente manera :

"Toda ecuación dimensionalmente homogénea* en la que intervienen n magnitudes físicas, A_1, A_2, \dots, A_n , que se expresan en función de V_1, V_2, \dots, V_m magnitudes fundamentales, puede reducirse a una relación entre $\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_{n-m}$ números adimensionales".

Para formar los parámetros adimensionales se pueden seguir el Método de Buckingham, ó el de inspección.

La forma de aplicar adecuadamente el análisis dimensional, para obtener una ecuación entre parámetros adimensionales ó su representación gráfica, contempla los siguientes pasos :

- 1).- Se identifican todas las variables asociadas con el fenómeno por estudiar. Esto exige de un conocimiento previo del fenómeno aún no cuantificado.
- 2).- Se les asignan sus dimensiones fundamentales a cada una de las variables correspondientes. En la tabla 1 se muestran las principales variables con sus respectivas dimensiones, ya sea que se escoja la masa ó fuerza como dimensión fundamental.

*Una ecuación es dimensionalmente homogénea cuando se verifica independientemente de la elección de sus unidades fundamentales de medida.

VARIABLE	MASICO			GRAVITACIONAL		
	M	L	T	F	L	T
Aceleración	0	1	-2	0	1	-2
Angulo	0	0	0	0	0	0
Area	0	2	0	0	2	0
Cantidad de movimiento	1	1	-1	1	0	1
Compresibilidad	-1	1	-2	-1	2	0
Densidad	1	-3	0	1	-4	-2
Energía	1	-2	-2	1	1	0
Frecuencia	0	0	-1	0	0	-1
Fuerza	1	1	-2	1	0	0
Gasto	0	3	-1	0	3	-1
Impulso	1	1	-1	1	0	1
Longitud	0	1	0	0	1	0
Masa	1	0	0	1	-1	2
Módulo de elasticidad	1	-1	-2	1	-2	0
Par	1	2	-2	1	1	0
Peso específico	1	-2	-2	1	-3	0
Potencia	1	2	-3	1	1	-1
Presión	1	-1	-2	1	-2	0
Tensión Superficial	1	0	-2	1	-1	0
Tiempo	0	0	1	0	0	1
Velocidad	0	1	-1	0	1	-1
Viscosidad Dinámica	1	-1	-1	1	-2	-1
Viscosidad Cinemática	0	2	-1	0	2	-1
Volumen	0	3	0	0	3	0

TABLA 1.- Variables más comunes y sus dimensiones

3).- Se aplica alguno de los métodos para obtener los parámetros adimensionales. Al hacerlo se pueden obtener varias combinaciones de números adimensionales; a su vez cada combinación contiene $(n-m)$ números adimensionales. De todas las combinaciones se escoge la que contenga números adimensionales con algún significado físico, como puede ser, por ejemplo, los números de Reynolds, Froude, Euler, Cauchy, Mach, Strouhal. En la tabla 2 se indican los números adimensionales que comúnmente son utilizados en hidráulica.

4).- Se escoge uno ó varios prototipos ó se construye un modelo hidráulico para medir en él las variables, seleccionadas en el paso 1, con lo que se logra determinar los coeficientes y exponentes que afectarán la relación entre los números adimensionales obtenidos en el paso 3.

D).- Procedimiento para formar parámetros adimensionales :

Para formar números adimensionales existen varios métodos, que se pueden estudiar en la literatura especializada, por lo que en ésta tesis se mencionarán únicamente dos, que son :

a).- Método de Buckingham.

b).- Método de inspección.- Consiste en la formación in-

dependiente de números adimensionales que cumplen con la condición de que en ellos se hagan intervenir a todas las variables, previamente seleccionadas, participantes en el fenómeno.

Ambos llegan a los mismos resultados, y el indicado en segundo lugar toma en cuenta lo establecido por el Teorema II en el sentido de que el número de parámetros adimensionales que se deben formar es igual a $n-m$.

Las principales recomendaciones y pasos a seguir que se pueden dar para cada uno de éstos métodos se describen a continuación:

ii).- Método de Buckingham

Para aplicar éste método se utiliza el siguiente procedimiento:

- 1).- Se seleccionan y anotan todas las variables que intervienen en el problema, indicando para cada una de ellas sus dimensiones fundamentales. Como ejemplo, supóngase un fenómeno en que intervienen cinco variables que se denominarán X, Y, Z, U y W las que se expresan en función de tres dimensiones: Masa, Longitud y Tiempo (M, L, T). Cada número adimensional por obtener tendrá la forma:

$$\pi_i = X^\alpha Y^\beta Z^\gamma U^\delta W^\epsilon \text{---} \textcircled{B}$$

NOMBRE	SIMBOLO	DEFINICION
No. de Euler	E	$V / \sqrt{2\Delta p / \rho}$
No. de Froude	F	V / \sqrt{gh}
No. de Reynolds	R	$VD\rho/\mu$
No. de Mach	M	$V / \sqrt{E/\rho}$
No. de Weber	W	$V / \sqrt{\sigma/\rho l}$
No. de Karman	K	$k / \sqrt{gRS} / \nu$
No. de Strouhal	S	V/nD
No. de Thoma	T	$(h-h_v)/(V^2/2g)$

DONDE:

V --- Velocidad	μ --- Viscosidad dinámica
p --- Presión	ν --- Viscosidad cinemática
ρ --- Densidad	E --- Módulo de elasticidad
g --- Gravedad	σ --- Tensión Superficial
h --- Carga de presión	l --- Longitud
h_v --- Carga vaporización	D --- Diámetro
k --- Rugosidad	R --- Radio hidráulica
s --- Pendiente	n --- Frecuencia

TABLA 2.- Números adimensionales utilizados comúnmente en hidráulica.

donde $\alpha, \beta, \gamma, \sigma$ y ϵ , representan el exponente que afecta a cada variable. Tomando en cuenta el Teorema Π se conoce el número de parámetros adimensionales; en el ejemplo son dos, cuya relación entre ellos está dada por la expresión:

$$\Pi_1 = f(\Pi_2) \text{ --- } \textcircled{C}$$

2).- Se separan todas las variables sin dimensiones ya que por sí mismas son parámetros adimensionales; un ejemplo de estas variables son : la pendiente ó un ángulo .

3).- Se forma una matriz con los exponentes asociados a las dimensiones de cada variable; para proceder en forma ordenada se acostumbra anotar en la parte superior como encabezado de cada columna, el símbolo de cada variable, bajo las cuales se señala con una letra griega el exponente al que la variable debe estar elevada. Al lado izquierdo de cada renglón se anotan las dimensiones fundamentales que intervienen en las variables. A manera de ejemplo, se indica la forma que debe tener esta matriz. Ver tabla 3 .

En la tabla 3, los términos α_{ij} de la matriz indican el exponente que afecta a la dimensión fundamental correspondiente a cada variable. Por ejemplo, si la variable X fuera el peso específico cuyas dimensiones son : $[M L^{-2} T^{-2}]$, $\alpha_{11}=1$, $\alpha_{21}=-2$

y $a_{31} = -2$ por ser los exponentes de M, L y T respectivamente.

Variable	X	Y	Z	U	W
Exponente	α	β	γ	δ	ϵ
Dimensión					
Masa (M)	a_{11}	a_{12}	a_{13}	a_{14}	a_{15}
Longitud (L)	a_{21}	a_{22}	a_{23}	a_{24}	a_{25}
Tiempo (T)	a_{31}	a_{32}	a_{33}	a_{34}	a_{35}

Tabla 3.- Matriz de exponentes.

Para que se cumpla la ecuación B, la suma de los exponentes que afecta a cada dimensión debe ser igual a cero, lo que permite obtener el siguiente sistema de ecuaciones:

$$a_{11}\alpha + a_{12}\beta + a_{13}\gamma + a_{14}\delta + a_{15}\epsilon = 0$$

$$a_{21}\alpha + a_{22}\beta + a_{23}\gamma + a_{24}\delta + a_{25}\epsilon = 0 \quad \text{--- (D)}$$

$$a_{31}\alpha + a_{32}\beta + a_{33}\gamma + a_{34}\delta + a_{35}\epsilon = 0$$

En el sistema de ecuaciones D se tienen m ecuaciones con n incógnitas, en que $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ y ϵ son las incógnitas. Para resolver el sistema se deben escoger como conocidas (n-m) incógnitas seleccionadas independientemente.

En esa forma se pueden obtener un conjunto de números adimensionales (dos, en el ejemplo expuesto) por cada combinación de variables independientes seleccionadas. Si se obtuvieran todas las combinaciones posibles se observaría que muchos pará--

metros dimensionales se repiten, otros no tienen significado físico y otros sí (ver tabla 2). Cuando se trata de obtener la relación de una de las variables en función de las restantes se recomienda escoger entre las incógnitas independientes aquella que está relacionada con dicha variable.

Por ejemplo, si interesa encontrar una expresión en que W dependa de X, Y, Z y U , entre las variables que podrán ser conocidas se escoge siempre a ϵ .

Otra recomendación para seleccionar a las incógnitas independientes es la de escoger aquellas que están relacionadas con alguna variable que determina la condición de escurrimiento ó movimiento de un fluido como puede ser la viscosidad, tensión superficial, etc. Para continuar con el ejemplo, supóngase que la variable X representa la viscosidad dinámica; por tanto se escogerá como segunda incógnita independiente a α .

4).- Se resuelve el sistema de ecuaciones D y se encuentran los valores de las incógnitas dependientes en función de las libremente escogidas. Por ejemplo, se obtiene el valor de β, γ y δ en función de α y ϵ .

5).- En la ecuación B se sustituyen las incógnitas dependientes en función de las libremente escogidas. En el ejemplo β, γ y δ se escriben en función de α y ϵ . con ello se obtiene una expresión de la forma :

$$\pi_i = X^\alpha Y^{b_1\alpha+b_2\epsilon} Z^{c_1\alpha+c_2\epsilon} U^{d_1\alpha+d_2\epsilon} W^\epsilon \text{ ————— } \textcircled{E}$$

donde $b_1, b_2, \dots, d_1, d_2$ son valores que se obtienen al resolver el sistema de ecuaciones D.

- 6).- Se separan todas las variables afectadas por el mismo exponente con lo que se obtienen cada uno de los parámetros adimensionales. En el ejemplo se llega a:

$$\pi_1 = [X Y^{b_1} Z^{c_1} U^{d_1}]^\alpha \text{---} \textcircled{F}$$

$$\pi_2 = [Y^{b_2} Z^{c_2} U^{d_2} W]^E \text{---} \textcircled{G}$$

- 7).- Se asigna cualquier valor a los exponentes independientes, por ejemplo, 1, -1, -2, 2, etc., de tal forma que el número adimensional resultante adquiera una representación conocida, o sea fácil de manejar. Así por ejemplo si π_1 fuera el recíproco del Número de Reynolds ó Froude, etc., α se seleccionaría igual a -1.

F).- Método por inspección

1).- Este paso es idéntico al paso 1 del Método de Buckingham.

2).- Idéntico al paso 2 del Método de Buckingham.

3).- Se identifica la variable dependiente, si la hubiera, y se coloca en el numerador de un quebrado y a un lado se anotan sus dimensiones y exponentes correspondientes. Si no se desea expresar alguna varia

ble en especial en función de las restantes, se escoge simplemente una de las variables, de preferencia entre aquellas en que intervengan las tres dimensiones fundamentales.

- 4).- Se eliminan las dimensiones de la variable seleccionada en el paso anterior, empezando por la dimensión de masa ; para ello, de las restantes variables se selecciona una en cuyas dimensiones aparezca la dimensión masa y se coloca en el denominador, elevándola a la potencia necesaria para suprimir la unidad de masa .

Se escoge otra dimensión, la de tiempo y se repite lo señalado para la masa colocando la variable con esa unidad en el numerador ó denominador según convenga ; por último, con la dimensión de longitud se procede de idéntica manera que para las otras dos.

- 5).- Formado el primer parámetro adimensional, se escoge una de las variables que no intervenga en él y se repite el procedimiento descrito en el paso 4 a fin de obtener un segundo parámetro adimensional .

- 6).- El número de parámetros adimensionales que se deben formar es el indicado por el Teorema Π , es decir $n-m$, por tanto los pasos 4 y 5 se repiten $(n-m)$ veces. Hay que procurar que algunos de los parámetros obtenidos sean iguales a los números adimensionales utilizados en hidráulica (ver tabla 2) ó tengan significado fisi-

co para el especialista del problema a resolver .

G).- Recomendaciones para formar parámetros adimensionales

A continuación se señalan algunas recomendaciones útiles para aplicar el análisis dimensional .

- 1).- Conviene que el número de variables seleccionadas no sea mayor que siete, ya que ello implica la formación de 4 parámetros adimensionales cuya representación gráfica se empieza a dificultar .
- 2).- Identificada la variable dependiente, debe aparecer en el numerador de solo uno de los parámetros a dimensionales .
- 3).- Las variables que representan las propiedades del fluido, excepto la densidad, tienen que aparecer so las en un parámetro adimensional .
- 4).- En el conjunto de parámetros adimensionales obtenidos deben estar todas las variables seleccionadas .
- 5).- Tratar de formar números adimensionales ya conocidos como, por ejemplo, el Número de Reynolds, Froude, etc., (ver tabla 2) .
- 6).- Para las variables que describen la geometría del problema y cuya dimensión sea una longitud se hacen adimensionales simplemente escogiendo a cualquiera de

ellas como longitud característica y dividiendo a las restantes variables entre ella.

7).- Las variables que no tengan ninguna dimensión forman por sí mismas un parámetro adimensional.

Por último cabe destacar que si se elige el Método de Buckingham, para formar los parámetros adimensionales, es necesario conocer con seguridad las variables que son más importantes en el fenómeno por estudiar, pues una apreciación errónea puede conducir, aún con el análisis dimensional, a aplicaciones falsas. La identificación de esas magnitudes físicas debe hacer se después de una análisis físico y de un completo entendimiento del problema.

Al analizar la bibliografía ya existente acerca del perfil de la superficie libre del agua sobre cimacios tipo Creager (Referencia 2), se observa que los resultados presentados --- vienen dados en gráficas adimensionadas que incluyen productos adimensionales de la forma :

$$\frac{y}{Hd} = f\left(\frac{x}{Hd}, \frac{H}{Hd}\right)$$

Por ésta razón y debido a que se compararán más adelante los resultados obtenidos en forma experimental con los de la referencia, se construirán gráficas que involucren a los mismos productos adimensionales.

Se puede dar solución al problema definiéndolo de la manera siguiente (Referencia 8) :

En la figura 3.2 se presentan las variables que intervienen en el problema de descarga libre de un cimacio tipo --- Creager.

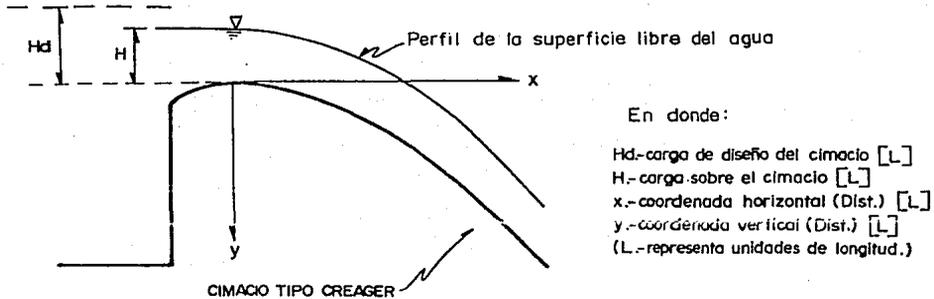


Fig.3.2.-Definición de variables.

Si planteamos el problema como :

$$y = f(H_d , H , x)$$

Podemos reducir y ligar mediante el análisis dimensional y con un manejo adecuado para el procesamiento posterior de resultados, se puede escribir en forma adimensional la función como :

$$\frac{y}{H} + 1 = f\left(\frac{H}{H_d} , \frac{x}{H_d} + 1\right)$$

De donde se puede observar que intervienen las cuatro variables del problema, formando tres productos adimensionales.

Por otra parte, para el caso de distribución de presiones

las gráficas que se construirán tendrán los mismos productos --
adimensionales que los mostrados en la referencia 2 y que son :

$$\frac{H_p}{H_d} = f\left(\frac{H}{H_d}, \frac{x}{H_d}\right)$$

Presentándose de ésta forma por las mismas razones ex-
puestas anteriormente.

3.4).- Mediciones Experimentales .

Por lo que se refiere al procedimiento experimental, se llevaron a cabo una serie de mediciones en el modelo de cimacio sujeto a diferentes relaciones de carga. Dichas relaciones fueron :

A).- $H/H_d = 0.25$

D).- $H/H_d = 1.00$

B).- $H/H_d = 0.50$

E).- $H/H_d = 1.25$

C).- $H/H_d = 0.75$

F).- $H/H_d = 1.37$

Donde :

H.- carga proporcionada al cimacio .

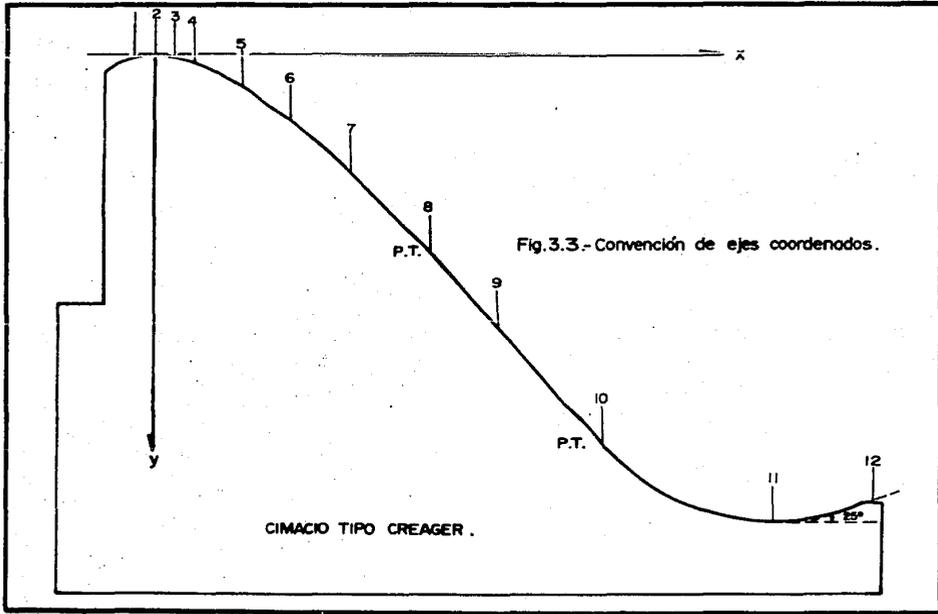
H_d.- carga de diseño del cimacio (15.7 cm.).

Cabe hacer la aclaración de que en el presente trabajo, se efectuaron las mediciones en un cimacio con descarga libre y al centro del claro; por lo que, los resultados que se presentarán más adelante serán válidos para éste tipo de condiciones.

La forma en la que se llevaron a cabo las mediciones se menciona a continuación :

En primer lugar se tomó la ubicación de los 12 piezómetros en un plano coordenado " X-Y ", quedando como referencia el piezómetro N° 2 que corresponde al nivel de la cresta del cimacio. Dichas lecturas se efectuaron por medio de 2 limnímetros de punta, la convención que se utilizó para los ejes coordenados se muestra en la figura 3.3

De igual forma, en el almacenamiento ó embalse se tomó,



por medio de un limnómetro de gancho, la lectura referente al nivel del agua justo antes de desbordar por el cimacio, a partir de la cual se refirieron las cargas sobre el vertedor. Dicha lectura resultó ser de 19.32 cm.

Por otro lado, en el tablero correspondiente a los piezómetros y después de haberlos purgado, se tomaron las lecturas de referencia (ó taras) a partir de las cuales se tomarían las cargas de presión ($H_p = P/\gamma$) correspondientes a cada relación de carga.

Una vez que ya se tenían todas las referencias, se procedió a proporcionar al cimacio una relación inicial de carga de $H/H_d = 0.25$, tomándose las lecturas en cada piezómetro tanto con los limnómetros de punta como en el tablero de piezómetros.

De igual forma se llevaron a cabo las demás pruebas en el modelo siguiendo el mismo procedimiento descrito en el párrafo anterior, pero variando la relación H/H_d hasta alcanzar un valor igual a 1.37. En la figura 3.4 se muestra la secuencia a seguir en un diagrama de flujo.

El resumen de las mediciones efectuadas en el cimacio se presentan en la tabla 4, para diferentes relaciones de carga.

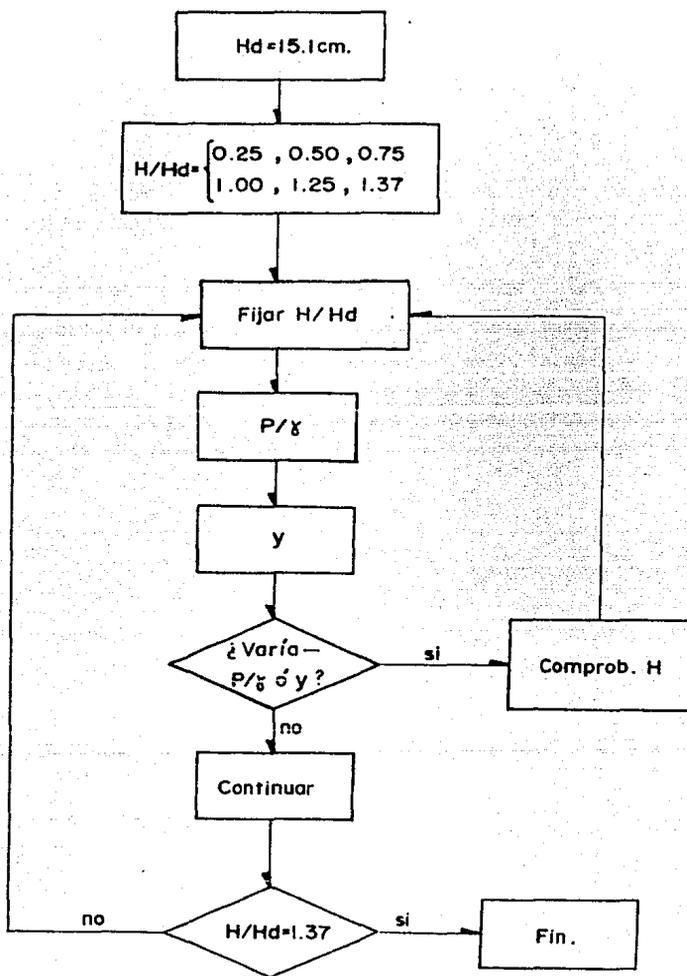


Fig.3.4.- Diagrama de flujo " Mediciones Experimentales".

Piezóm. Nº:	Lect.-Limnfm. Eje x :	Tara Limnfmetro	Tara Piezóm.	H/Hd=0.25		H/Hd=0.50	
				Hlimn.	Hpiez.	Hlimn.	Hpiez.
1	182.40	207.80	14.00	244.20	10.50	274.30	9.50
2	179.80	213.20	13.35	239.50	11.20	266.40	10.50
3	178.40	212.80	13.40	234.20	11.70	261.90	10.90
4	176.70	210.10	13.70	229.40	12.30	254.80	11.70
5	175.20	204.10	14.30	222.20	13.00	246.30	12.40
6	167.50	161.10	18.55	172.60	17.70	192.90	17.30
7	161.10	104.00	24.35	115.80	24.40	127.40	24.80
8	153.60	8.10	33.60	19.00	33.40	30.80	33.30
		143.20		131.80		119.60	
9	148.10	244.50	44.50	236.50	44.50	226.40	44.80
10	141.50	346.80	55.00	343.00	55.50	332.70	54.80
11	123.00	441.50	63.30	437.30	64.20	428.60	61.90
12	111.20	417.60	61.10	412.40	66.00	403.00	75.20
	(m.m.)	(mm.)	(cm.)	(mm)	(cm.)	(mm.)	(cm.)

Tabla 4 - Mediciones experimentales en el modelo.

Piezómetro N°:	H/Hd=0.75		H/Hd=1.00		H/Hd=1.25		H/Hd=1.37	
	H _{limn.}	H _{piez.}						
1	303.30	10.00	329.40	12.60	355.00	19.20	362.70	21.10
2	296.00	11.10	322.60	13.20	349.60	17.30	358.70	20.20
3	291.40	11.30	318.00	13.10	344.00	16.40	355.10	18.40
4	286.00	12.00	310.90	13.30	339.10	16.30	346.20	18.50
5	277.50	12.40	304.50	13.40	331.90	15.50	333.80	16.90
6	226.30	16.80	253.90	17.00	282.60	17.80	285.40	18.30
7	159.80	25.10	194.20	25.60	228.90	26.40	230.90	26.70
8	56.10	33.50	95.60	33.10	123.00	32.70	144.70	32.70
	91.40		47.40		20.50		19.60	
9	195.80	45.00	158.50	44.40	110.70	43.60	129.80	43.60
10	311.30	50.40	285.80	44.60	235.30	38.60	239.30	38.30
11	417.00	55.00	399.60	46.40	381.50	37.60	362.70	32.60
12	393.50 (mm.)	84.10 (cm.)	381.20 (mm.)	89.50 (cm.)	363.70 (mm.)	91.60 (cm.)	342.60 (mm.)	91.20 (cm.)

Tabla 4 (cont.) - Mediciones experimentales en el modelo.

3.5).- Resultados Experimentales

A continuación se mencionan los resultados obtenidos a partir de las mediciones efectuadas en el modelo .

En primer lugar se presentará el perfil del cimacio, tanto el medido como el de diseño propuesto por el U.S. Army Corps of Engineers. Ambos perfiles se muestran en una misma gráfica, figura 3.5

En segundo lugar se presentarán en gráficas adimensionadas la superficie libre del agua sobre el cimacio (Figs. 3.6 y 3.7), tanto las experimentales como las propuestas por el Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los Estados Unidos, de ésta última para relaciones de $H/H_d = 0.5, 1.0$ y 1.3 exclusivamente.

Se incluye también parte de la ponencia presentada en el IX Congreso Nacional de Hidráulica referente a la forma de obtener el perfil de la superficie libre en cimacios tipo Creager por medio de ecuaciones obtenidas en forma experimental (Figs. 3.8 a 3.10). Tal investigación se efectuó también en el Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería de la U.N.A.M., y estuvo a cargo del Ing. Luis Fco. León Vizcaino.

Cabe aclarar que aunque el tema de tesis está enfocado básicamente a la distribución de presiones en cimacios tipo Creager, se presentan gráficas adimensionadas de la superficie

libre del agua porque guardan cierta relación con el tema, debido a que la aplicación de dichas ecuaciones pueden ser tanto para diseño como para el análisis de flujo con potencial, ya que permiten conocer la frontera superior, que generalmente se desconoce a priori al cálculo .

Es importante hacer notar, que todos los resultados que se presentarán abarcarán única y exclusivamente hasta el piezómetro N° 8 debido a que, justamente en este lugar, se tiene el Punto de Tangencia (P.T.) donde termina el perfil del cimacio y dá comienzo la rápida, debido a que el desarrollo que se pretende llevar a cabo es únicamente sobre el cimacio .

A).- Experimentales

P	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
x	-2.60	0	1.40	3.10	4.60	12.30	18.70	26.20	31.70	38.30	56.80	68.60
y	0.54	0	0.04	0.31	0.91	5.21	10.92	20.51	30.64	40.87	50.34	47.95

(x,y) en cms.

B).- De diseño (U.S.Army Corps of Engineers).

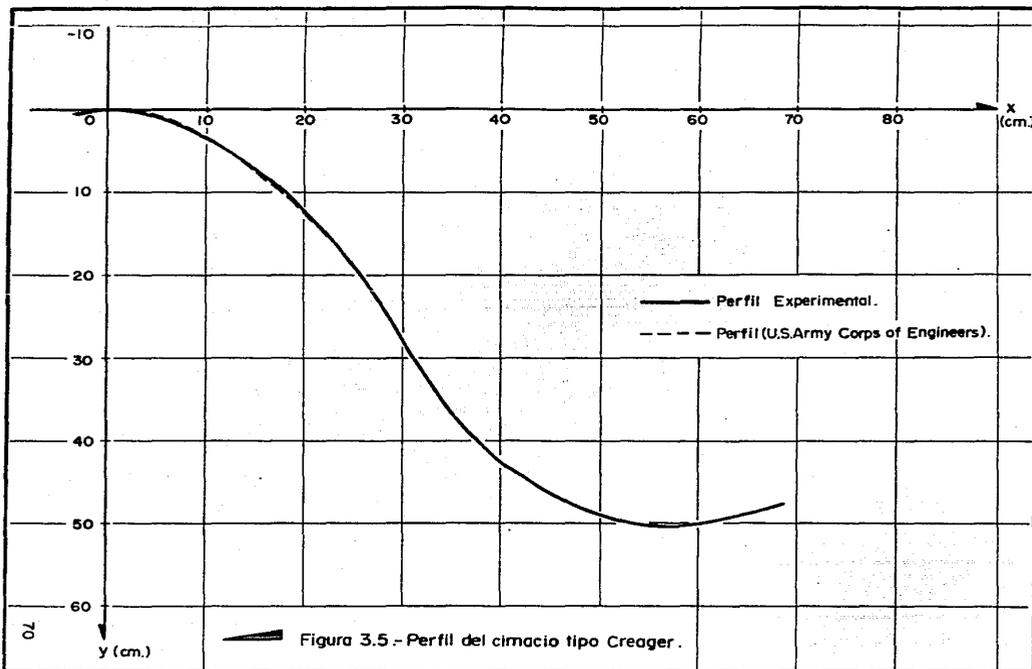
a).- $x^{1.85} = 2Hd^{0.85}y \longrightarrow y = \frac{x^{1.85}}{2Hd^{0.85}}$ (Perfil del cuadrante aguas abajo)

b).- $y = 0.724 \frac{(x+0.27 Hd)^{1.85}}{Hd^{0.85}} + 0.126Hd - 0.4315 Hd^{0.375}(x+0.27 Hd)^{0.625}$
(Perfil del cuadrante aguas arriba)

Coord. P	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
x	-2.500	-0.500	0.000	1.500	3.000	5.000	10	15	20	26
y	0.482	0.015	0.000	0.105	0.379	0.977	3.522	7.450	12.698	20.630

(x,y) en cms.

Tabla 5 - Coordenadas del cimacio tipo Creager.



H/Hd=0.25

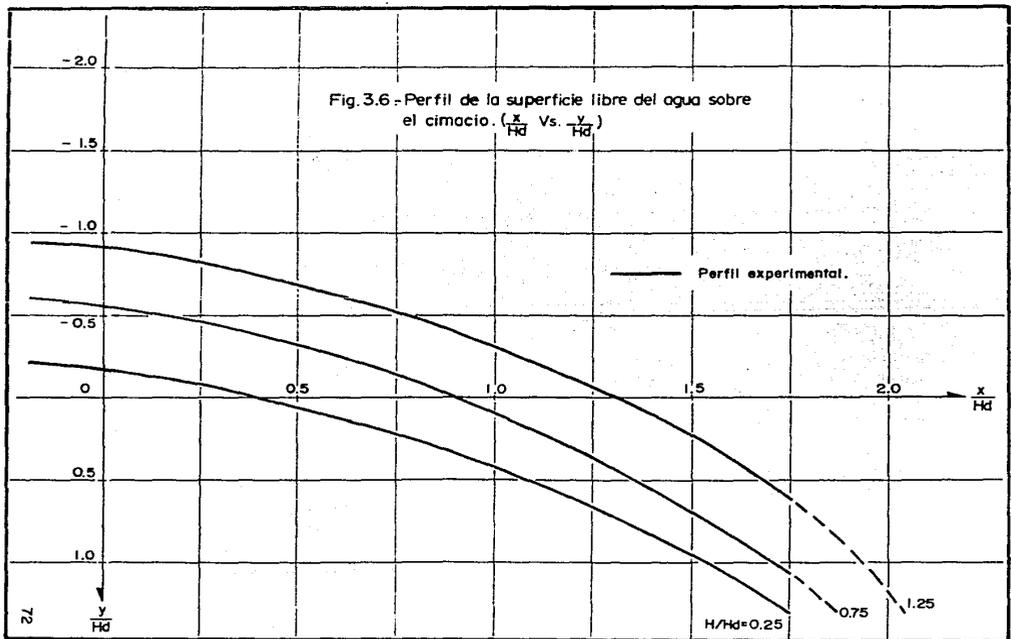
H/Hd=0.75

H/Hd=1.25

P	x	x/Hd	y	y/Hd	y	y/Hd	y	y/Hd
1	- 2.60	-0.172	- 3.10	-0.205	- 9.01	-0.596	-14.18	-0.939
2	—	—	- 2.63	-0.174	- 8.28	-0.548	-13.64	-0.903
3	1.40	0.092	- 2.11	-0.139	- 7.82	-0.517	-13.08	-0.866
4	3.10	0.205	- 1.62	-0.107	- 7.28	-0.482	-12.59	-0.833
5	4.60	0.304	- 0.90	-0.059	- 6.43	-0.425	-11.87	-0.786
6	12.30	0.814	4.06	0.268	- 1.31	-0.086	- 6.94	-0.459
7	18.70	1.238	9.74	0.645	5.34	0.353	- 1.57	-0.103
8	26.20	1.735	19.42	1.286	15.71	1.040	9.02	0.597
9	31.70	2.099	29.89	1.979	26.15	1.731	18.04	1.194
10	38.30	2.530	40.54	2.684	37.70	2.496	30.50	2.019
11	56.80	3.760	49.97	3.309	48.27	3.196	45.12	2.988
12	68.60	4.540	47.48	3.144	45.92	3.041	43.34	2.870

(x,y) en cms.

Tabla 6 - Superficie libre del agua .



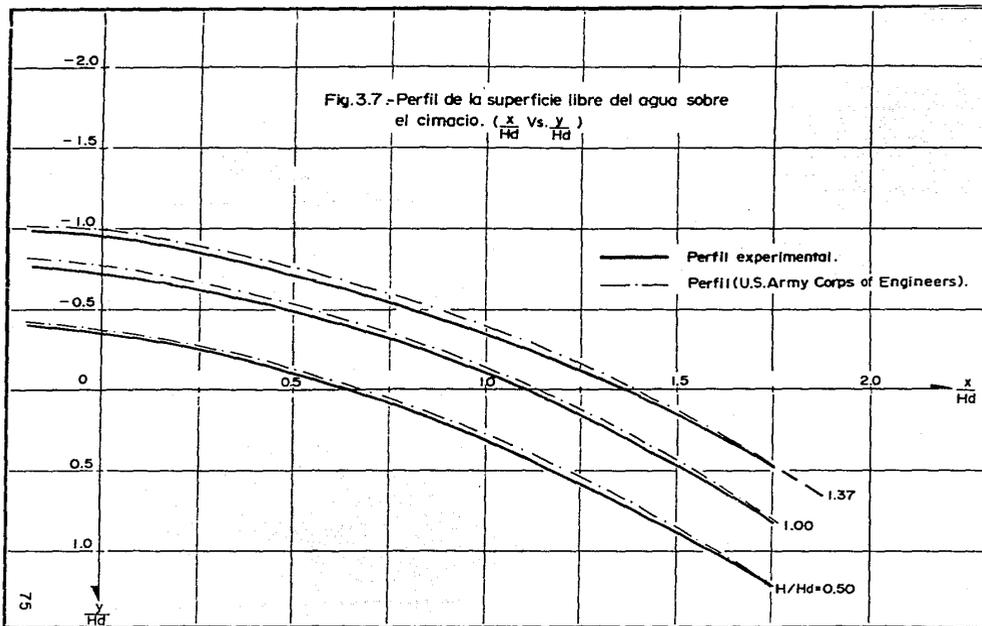
P	H/Hd=0.50				H/Hd=1.00		H/Hd=1.3	
	x	x/Hd :	y	y/Hd	y	y/Hd	y	y/Hd
1	- 2.60	-0.172	- 6.110	-0.404	-11.62	-0.769	-14.95	-0.990
2	—	—	- 5.320	-0.352	-10.94	-0.725	-14.55	-0.963
3	1.40	0.092	- 4.870	-0.322	-10.48	-0.694	-14.19	-0.939
4	3.10	0.205	- 4.160	-0.275	- 9.77	-0.647	-13.30	-0.880
5	4.60	0.304	- 3.310	-0.219	- 9.13	-0.605	-12.06	-0.798
6	12.30	0.814	2.030	0.134	- 4.07	-0.270	- 7.22	-0.478
7	18.70	1.238	8.580	0.568	1.90	0.126	- 1.77	-0.117
8	26.20	1.735	18.240	1.207	11.76	0.779	6.85	0.453
9	31.70	2.099	28.920	1.915	22.87	1.515	17.87	1.183
10	38.30	2.530	39.550	2.619	35.60	2.358	28.82	1.908
11	56.80	3.760	49.140	3.254	46.98	3.110	41.16	2.725
12	68.60	4.540	46.580	3.084	45.14	2.990	39.15	2.592

(x,y) en cms.

Tabla 7 - Superficie libre del agua.

H/Hd=0.50		H/Hd=1.00		H/Hd=1.33	
x/Hd	y/Hd	x/Hd	y/Hd	x/Hd	y/Hd
-1.00	-0.490	-1.000	-0.933	-1.000	-1.210
-0.80	-0.484	-0.800	-0.915	-0.800	-1.185
-0.60	-0.475	-0.600	-0.893	-0.600	-1.115
-0.40	-0.460	-0.400	-0.865	-0.400	-1.110
-0.20	-0.425	-0.200	-0.821	-0.200	-1.060
0.00	-0.371	0.000	-0.755	0.000	-1.000
0.20	-0.300	0.200	-0.681	0.200	-0.919
0.40	-0.200	0.400	-0.586	0.400	-0.821
0.60	-0.075	0.600	-0.465	0.600	-0.705
0.80	0.075	0.800	-0.320	0.800	-0.569
1.00	0.258	1.000	-0.145	1.000	-0.411
1.20	0.470	1.200	0.055	1.200	-0.220
1.40	0.705	1.400	0.294	1.400	-0.002
1.60	0.972	1.600	0.563	1.600	0.243
1.80	1.269	1.800	0.857	1.800	0.531

Tabla 8.- Superficie libre del agua (Perfil U.S. Army Corps).



Como se indicó anteriormente, puede obtenerse el perfil de la superficie libre del agua en cimacios tipo Creager, por medio de ecuaciones obtenidas en forma experimental. Dichas ecuaciones fueron el resultado de diversas investigaciones realizadas en el Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería de la U.N.A.M.

El procedimiento que se siguió y los resultados a los que se llegó se menciona y se muestran a continuación.

Las mediciones efectuadas se llevaron a cabo en dos cimacios tipo Creager con cargas de diseño (H_d) diferentes. Uno con carga de diseño $H_d = 15.1$ cm. (el mismo que se utilizó en el desarrollo de ésta tesis) y el otro con carga $H_d = 4.5$ cm.

En la primera estructura se midieron los valores de (x, y) para cada relación de (H/H_d) en un rango de 0.25 a 1.5 a intervalos de 0.25 y para verificar que sucede cerca del despeque de la lámina inferior, se midió también para H/H_d 0.9 y -- 1.10.

En la otra estructura, se trabajó en un rango de H/H_d de 0.25 a 1.75 y fué con el objeto de eliminar los posibles errores de medición que generan las ondas laterales que se presentan en cimacios con descargas considerablemente mayores. Esto se hizo con el objeto de afinar los valores experimentales obteniéndose para relaciones de H/H_d valores semejantes a los propuestos en el manual de la CFE.

Los resultados experimentales se presentan resumidos en la tabla 9 para distintas relaciones de H/Hd .

Al depurar los resultados, mediante un análisis de errores de precisión y graficándolos en un plano $(\frac{x}{H_d} + 1, \frac{y}{H} + 1)$, para cada relación de H/Hd, se puede observar en la figura 3.8 la tendencia que presentan los valores experimentales. Esta gráfica se presenta como una primera solución al problema planteado, ya que conocida la carga de diseño del cimacio y la carga que opera sobre el mismo, es posible, proponiendo valores de x, obtener el perfil que adquiere la superficie libre, valores de y. Se puede observar que dicha gráfica tiene una aproximación suficiente para cálculos prácticos .

En base a los valores experimentales, se procedió a realizar ajustes lineales y se observó que para relaciones de H/Hd menores o iguales que uno las curvas se comportan como potenciales del tipo :

$$\frac{y}{H} + 1 = K_1 \left(\frac{x}{H_d} + 1 \right)^{N_1} \dots \dots \dots (1)$$

Donde los valores de K_1 , N_1 varían en forma también potencial en función de H/Hd de la forma :

$$K_1 = A \left(\frac{H}{H_d} \right)^B ; \quad N_1 = C \left(\frac{H}{H_d} \right)^D \dots \dots (1a.)$$

Donde los valores A, B, C y D son constantes obtenidas de los ajustes de los resultados obtenidos experimentalmente con correlación de 0.995 y valen :

$$A=0.197176 ; \quad B= -0.39224 ; \quad C=2.19883 ; \quad D= -0.20651$$

Por otra parte se observó que los mejores ajustes para

relaciones de H/H_d mayores que uno son de tipo exponencial de la forma :

$$\frac{Y}{H} + 1 = K_2 e^{N_2 \left(\frac{X}{H_d} + 1\right)} \dots \dots \dots (2)$$

Donde los valores de K_2 , N_2 varían también exponencialmente en función de H/H_d de la forma :

$$K_2 = a \exp^{b\left(\frac{H}{H_d}\right)} ; \quad N_2 = c \exp^{d\left(\frac{H}{H_d}\right)} \dots \dots (2a.)$$

Donde los valores a , b , c y d son constantes obtenidas de los ajustes con correlación de 0.987 y valen :

$$a = 0.061604 ; \quad b = 0.383805 ; \quad c = 1.59751 ; \quad d = -0.409022$$

Las tablas 10 y 11 muestran las tabulaciones de las ecuaciones (1) y (2) respectivamente, y en las figuras 3.9 y 3.10 se presentan los ajustes obtenidos para distintas relaciones de H/H_d calculados con las mismas ecuaciones, indicando los valores medidos para observar la dispersión, que como se puede ver es mínima con un error máximo del 6.2%, lo cual es bastante aceptable. En las mismas gráficas se incluyen los valores recomendados por la CFE, y como se puede ver son semejantes a los obtenidos experimentalmente.

En resumen, para calcular la superficie libre del agua sobre un cimacio tipo Craeger con cualquier condición de carga, se procede de la siguiente manera :

- 1).- Conocido H_d y la carga H sobre el cimacio, se calcula H/H_d .
- 2).- Si $H/H_d \leq 1$ se utilizan las ecuaciones (1a.) para cal-

cular los valores de K_1 y N_1 . Se proponen valores de (x) y con la ecuación (1) se calculan los valores de (y) , obteniéndose así las coordenadas de la superficie libre.

Si $H/H_d > 1$ se utilizan las ecuaciones (2) y (2a.) y se procede análogamente.

X H_d^{+1}	Valores de $\frac{Y}{H} + 1$											
	H/H_d	0.250	0.370	0.500	0.620	0.750	0.900	1.000	1.100	1.250	1.330	1.500
1.0	0.297	0.303	0.262	0.264	0.244	0.222	0.233	0.232	0.244	0.231	0.251	0.260
1.1	0.422	0.387	0.333	0.303	0.288	0.264	0.277	0.262	0.280	0.256	0.274	0.279
1.2	0.555	0.489	0.400	0.374	0.345	0.318	0.317	0.303	0.315	0.289	0.303	0.304
1.3	0.706	0.609	0.488	0.446	0.404	0.367	0.362	0.343	0.351	0.323	0.333	0.336
1.4	0.929	0.711	0.600	0.535	0.481	0.419	0.411	0.383	0.386	0.365	0.368	0.361
1.5	1.124	0.903	0.715	0.624	0.555	0.493	0.466	0.444	0.422	0.406	0.400	0.381
1.6	1.373	1.071	0.844	0.749	0.650	0.567	0.533	0.505	0.475	0.440	0.437	0.425
1.7	1.666	1.258	0.977	0.839	0.748	0.642	0.604	0.565	0.528	0.490	0.481	0.455
1.8	1.933	1.456	1.155	0.982	0.837	0.728	0.677	0.626	0.582	0.540	0.525	0.491
1.9	2.271	1.684	1.328	1.125	0.955	0.814	0.766	0.697	0.644	0.599	0.577	0.504
2.0	2.635	1.906	1.506	1.268	1.074	0.913	0.855	0.777	0.706	0.657	0.629	0.511
2.1	3.000	2.183	1.688	1.410	1.222	1.037	0.944	0.867	0.786	0.741	0.688	0.615
2.2	3.444	2.471	1.911	1.589	1.340	1.135	1.055	0.959	0.875	0.824	0.755	0.691
2.3	3.933	2.801	2.133	1.768	1.518	1.271	1.166	1.060	0.955	0.899	0.814	0.750
2.4	4.422	3.138	2.400	1.982	1.681	1.407	1.288	1.171	1.053	0.974	0.888	0.801
2.5	4.955	3.522	2.666	2.196	1.859	1.543	1.422	1.292	1.151	1.058	0.963	0.860
2.6	5.497	3.906	2.977	2.429	2.051	1.703	1.555	1.414	1.257	1.158	1.051	0.915
2.7	6.182	4.333	3.280	2.693	2.259	1.876	1.700	1.545	1.373	1.275	1.140	1.000
2.8	6.822	4.783	3.600	2.965	2.466	2.046	1.866	1.686	1.497	1.392	1.237	1.070
2.9	7.480	5.228	3.946	3.232	2.703	2.246	2.033	1.838	1.631	1.509	1.348	1.155
3.0	8.244	5.714	4.311	3.511	2.937	2.444	2.211	1.989	1.773	1.626	1.459	1.250
3.1	8.946	6.213	4.666	3.804	3.204	2.654	2.411	2.181	1.906	1.776	1.570	1.351
3.2	9.684	6.723	5.066	4.126	3.444	2.864	2.611	2.343	2.057	1.910	1.703	1.452
3.3	10.475	7.276	5.444	4.436	3.711	3.086	2.811	2.525	2.217	2.061	1.829	1.581
3.4	11.337	7.816	5.866	4.769	3.992	3.308	3.033	2.717	2.460	2.219	1.963	1.710
3.5	12.012	8.321	6.204	5.002	4.102	3.657	3.300	2.987	2.756	2.438	2.049	1.981

8

Tabla 9.- Resumen de Valores Experimentales

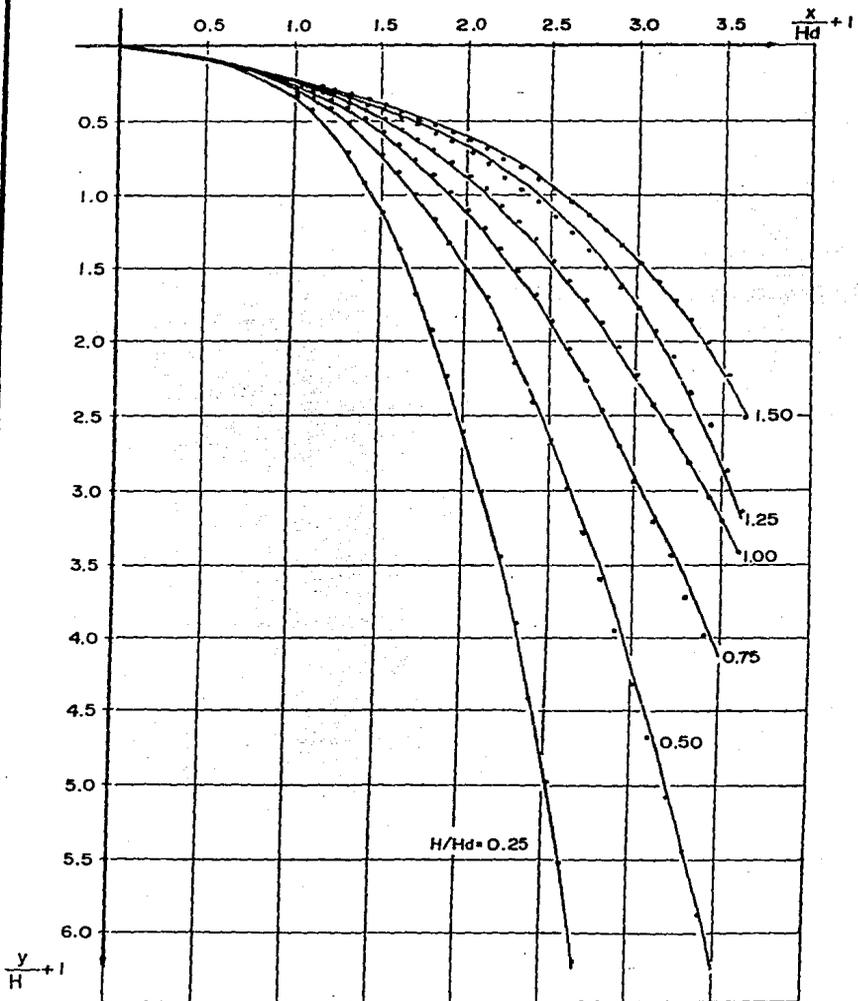


Figura.3.8.- Tendencia de los valores experimentales para distintas relaciones H/Hd .

ECUACION DE LA SUPERFICIE LIBRE DE UN CIMACIO CREAGER

La ecuación es:

$$[Y/H + 1] = K1 \cdot X/H + 1 + 13 \cdot (N1) \quad \text{PARA VALORES } H/HD \leq 1$$

$$K1 = 0.197176 \cdot (H/HD) + (-.39224) \quad ; \quad N1 = 2.198930 \cdot (H/HD) + (-.20631)$$

H/Hd X/Hd + 1	0.25	0.50	0.75	1.00
Valores de Y/H + 1				
1	.33963	.25978	.220729	.197176
1.1	.446942	.329573	.275766	.243147
1.2	.579193	.410989	.357772	.294413
1.3	.732142	.503534	.407134	.351072
1.4	.90534	.608699	.483992	.413204
1.5	1.11513	.726950	.568932	.488984
1.6	1.36463	.85276	.660933	.574216
1.7	1.65098	.994555	.761367	.673246
1.8	1.97829	1.14977	.869998	.788031
1.9	2.22286	1.31893	.986982	.888678
2	2.50819	1.50213	1.11247	.983249
2.1	2.90899	1.70006	1.24662	1.080777
2.2	3.41393	1.91307	1.38956	1.11631
2.3	3.9987	2.14147	1.54143	1.23073
2.4	4.40698	2.38566	1.70236	1.33168
2.5	4.96644	2.646	1.8725	1.47862
2.6	5.57875	2.92285	2.05193	1.6118
2.7	6.22156	3.21657	2.24085	1.75126
2.8	6.92034	3.52749	2.43931	1.89795
2.9	7.66933	3.85097	2.64743	2.04922
3	8.46939	4.20232	2.86539	2.20781
3.1	9.32296	4.56689	3.09423	2.37287
3.2	10.2311	4.94999	3.33189	2.54444
3.3	11.1956	5.35194	3.57987	2.72256
3.4	12.2181	5.77306	3.83728	2.90727
3.5	13.3083	6.21368	4.10561	3.09861

Tabla IO - Tabulación de la ecuación (1).
(H/Hd ≤ 1)

ECUACION DE LA SUPERFICIE LIBRE DE UN CIMACIO CHEAGER

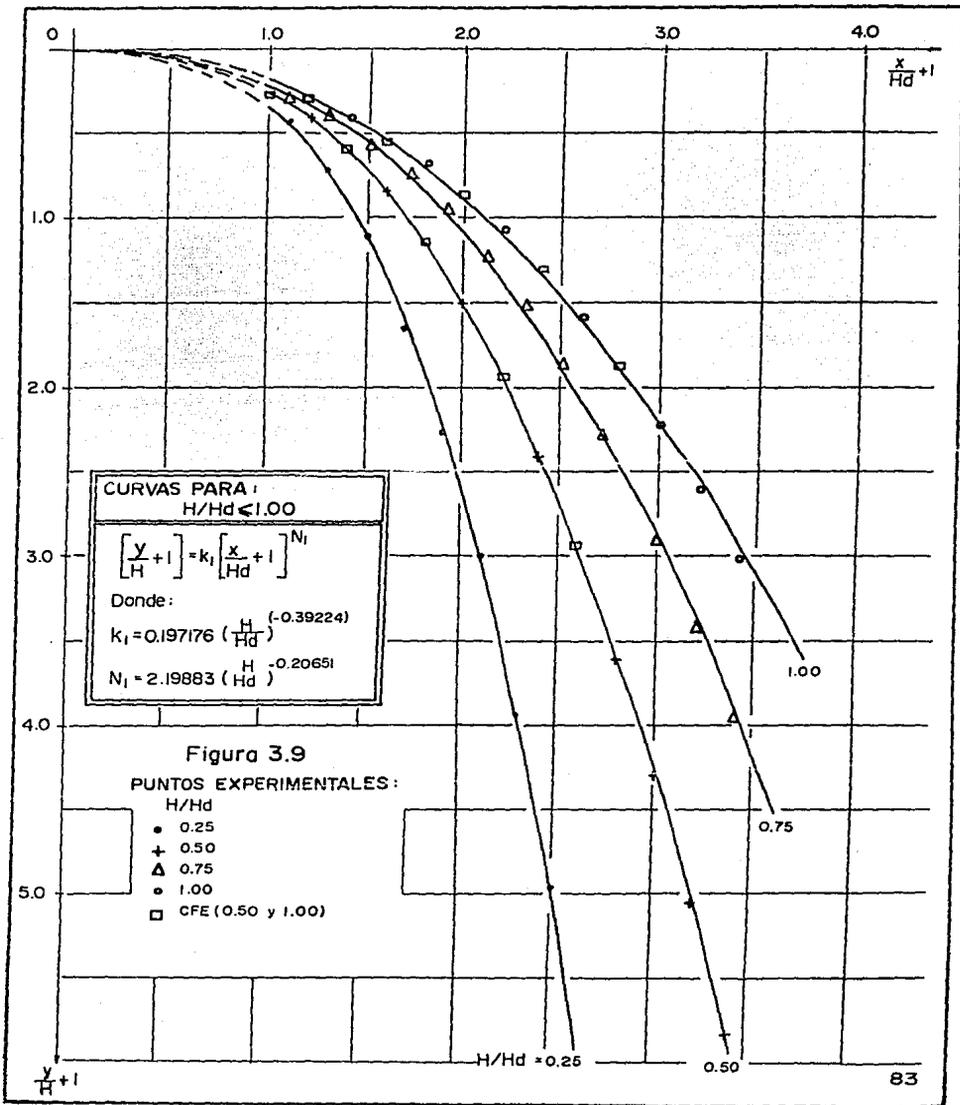
La ecuación es:

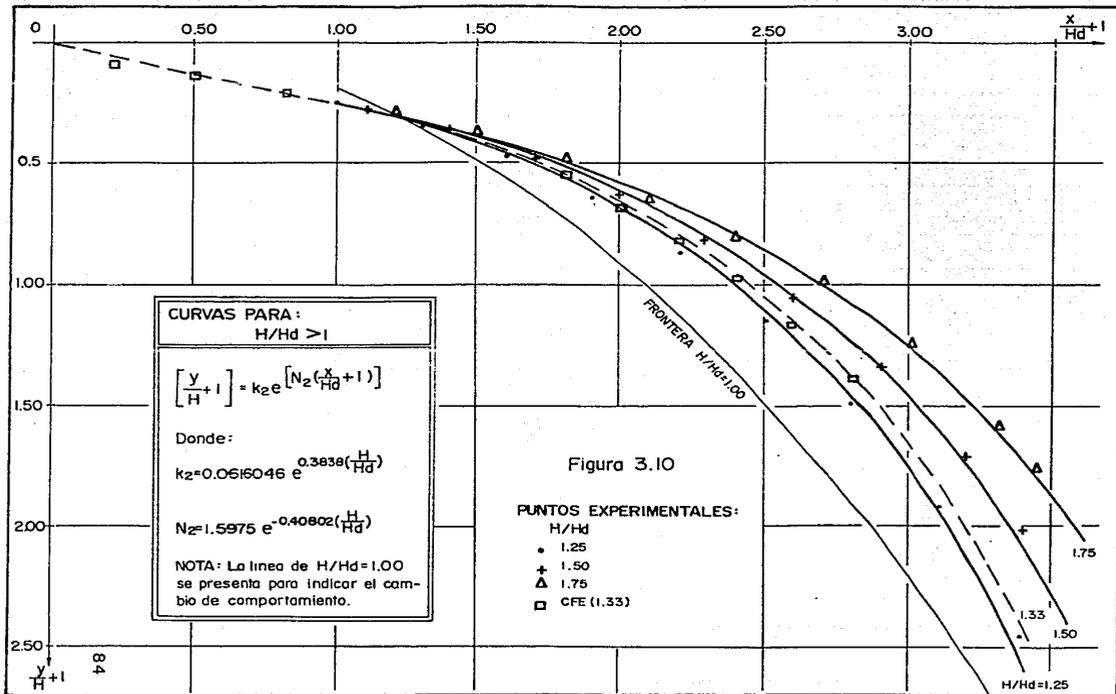
$$[Y/H + 1] = K2 \cdot X/H + 1 + 13 \cdot (N2) \cdot (X/H + 1) \quad \text{PARA VALORES } H/Hd > 1$$

$$K2 = 0.061604 \cdot \exp \{ 0.383805 \cdot (H/Hd) \} \quad ; \quad N2 = 1.59751 \cdot \exp \{ -1.40822 \cdot (H/Hd) \}$$

H/Hd X/Hd + 1	1.25	1.50	1.75
Valores de Y/H + 1			
1	.239491	.239473	.268278
1.1	.282307	.28469	.283885
1.2	.314386	.312356	.309454
1.3	.345914	.342712	.333821
1.4	.388781	.376818	.367922
1.5	.418986	.41256	.401177
1.6	.461121	.432634	.437437
1.7	.507493	.486644	.476774
1.8	.558529	.544909	.520066
1.9	.614677	.597865	.567093
2	.676514	.653967	.61833
2.1	.744546	.719715	.674239
2.2	.819421	.789659	.73519
2.3	.891656	.8684	.801668
2.4	.992317	.950399	.914803
2.5	1.09233	1.04298	.953887
2.6	1.20218	1.14434	1.03923
2.7	1.32387	1.25555	1.13316
2.8	1.43613	1.3773	1.23338
2.9	1.60256	1.51144	1.34726
3	1.76372	1.65833	1.46943
3.1	1.94199	1.81949	1.68181
3.2	2.13629	1.99631	1.74659
3.3	2.35113	2.19032	1.96845
3.4	2.58756	2.40318	2.07638
3.5	2.84778	2.63673	2.26428

Tabla II - Tabulación de la ecuación (2).
(H/Hd > 1)





Por último, se presentan a continuación las gráficas, también adimensionadas, de distribución de presiones en el cimacio (Figs. 3.11 a 3.16) tanto las experimentales como las propuestas por el U.S. Army Corps of Engineers (Referencia 2.a), para $H/H_d = 0.5$, 1.0 y 1.3 para el caso de éstas últimas.

En el cuarto capítulo, de comparación teórica, se compararán los resultados anteriores con los que se obtendrán por medio de la teoría de los flujos con potencial (distribución de presiones teórica).

P	x/Hd	H/Hd=0.25		H/Hd=0.50		H/Hd=0.75	
		Hp	Hp/Hd	Hp	Hp/Hd	Hp	Hp/Hd
1	-0.172	3.500	0.231	4.500	0.298	4.000	0.264
2	—	2.150	0.142	2.850	0.188	2.250	0.149
3	0.092	1.700	0.112	2.500	0.165	2.100	0.139
4	0.205	1.400	0.092	2.000	0.132	1.700	0.112
5	0.304	1.300	0.086	1.900	0.125	1.900	0.125
6	0.814	0.850	0.056	1.250	0.082	1.750	0.115
7	1.238	-0.050	-0.003	-0.450	-0.029	-0.750	-0.049
8	1.735	0.200	0.013	0.300	0.019	0.100	0.006
9	2.099	0	0	-0.300	-0.019	-0.500	-0.033
10	2.530	-0.500	-0.033	0.200	0.013	4.600	0.304
11	3.760	-0.900	-0.059	1.400	0.092	8.300	0.549
12	4.540	-4.900	-0.324	-14.10	-0.933	-23.00	-1.523

Hp-en cm.

Tabla 12.- Presiones sobre el cimacio (experimentales).

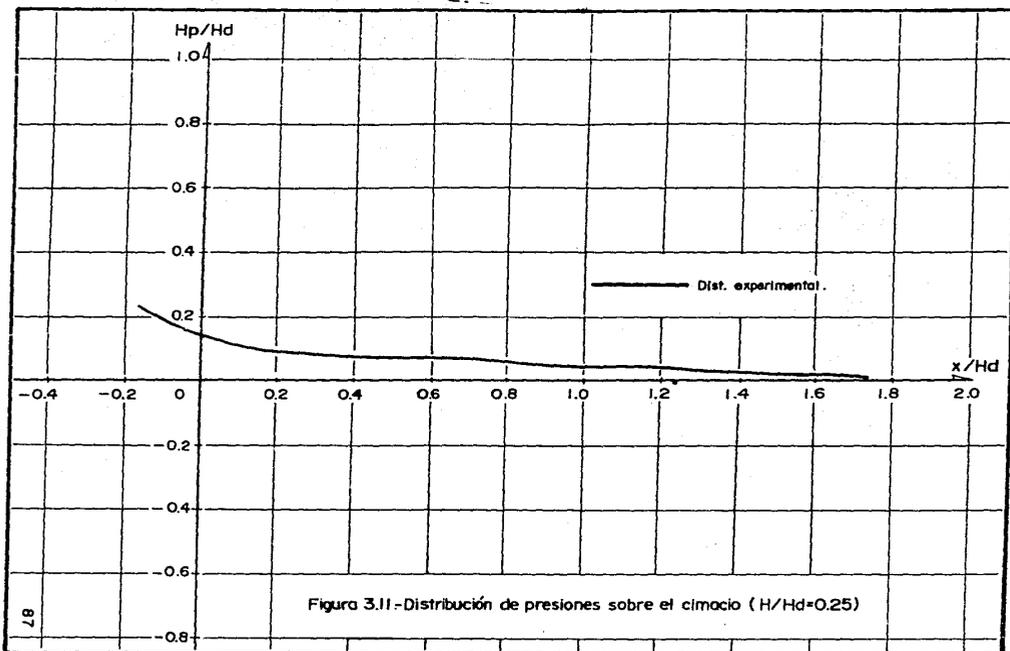
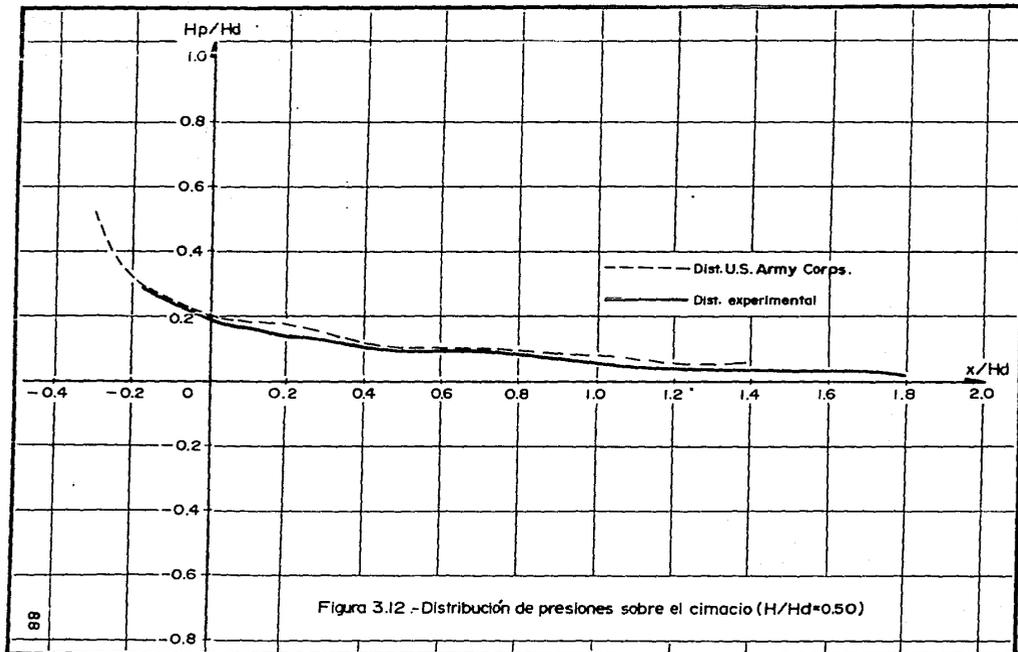
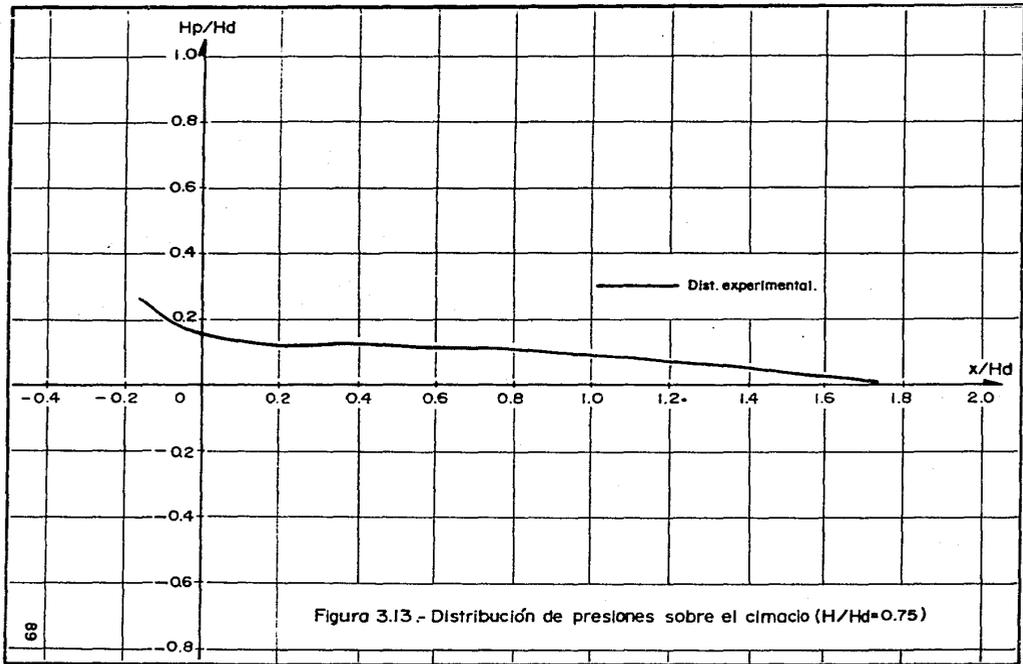


Figura 3.11 - Distribución de presiones sobre el cimacio ($H/H_d=0.25$)





P	x/Hd	H/Hd=1.00		H/Hd=1.25		H/Hd=1.3	
		Hp	Hp/Hd	Hp	Hp/Hd	Hp	Hp/Hd
1	0.172	1.400	0.092	-5.200	-0.344	-7.10	-0.470
2	—	0.150	0.009	-3.950	-0.261	-6.85	-0.453
3	0.092	0.300	0.019	-3.000	-0.198	-5.00	-0.331
4	0.205	0.400	0.026	-2.600	-0.172	-4.80	-0.317
5	0.304	0.900	0.059	-1.200	-0.079	-2.60	-0.172
6	0.814	1.550	0.102	0.750	0.049	0.25	0.016
7	1.238	-1.250	-0.082	-2.050	-0.135	-2.35	-0.155
8	1.735	0.500	0.033	0.900	0.059	0.90	0.059
9	2.099	0.100	0.006	0.900	0.059	0.90	0.059
10	2.530	10.40	0.688	16.40	1.086	16.7	1.105
11	3.760	16.90	1.119	25.70	1.701	30.7	2.033
12	4.540	-28.40	-1.880	-30.50	-2.019	-30.1	-1.993

Hp.-en cm.

Tabla 13.-Presiones sobre el cimacio (experimentales).

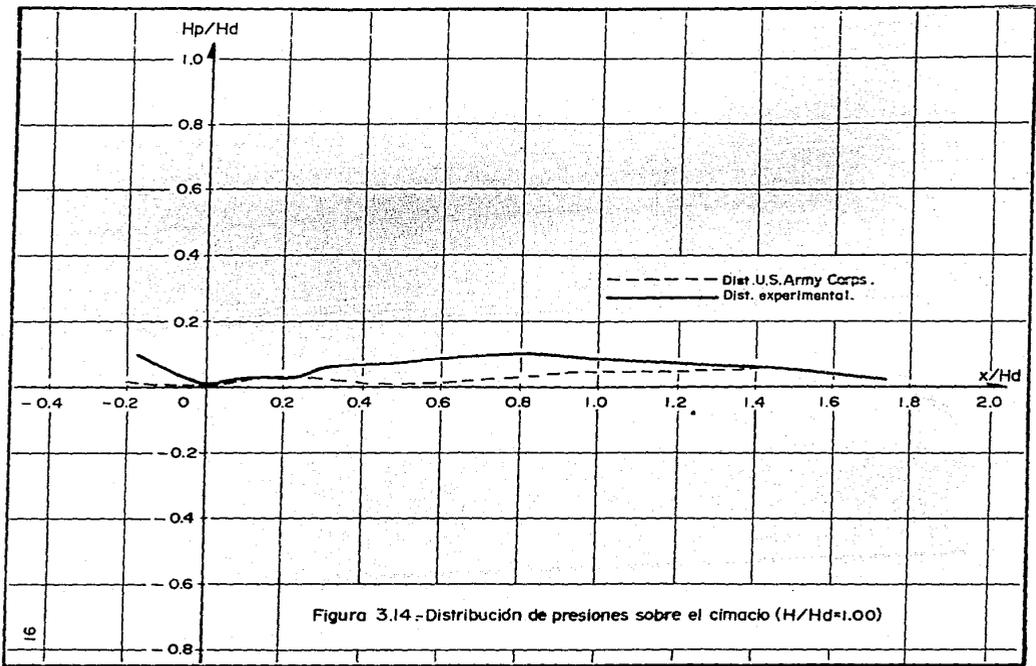


Figura 3.14 - Distribución de presiones sobre el cimacio ($H/H_d=1.00$)

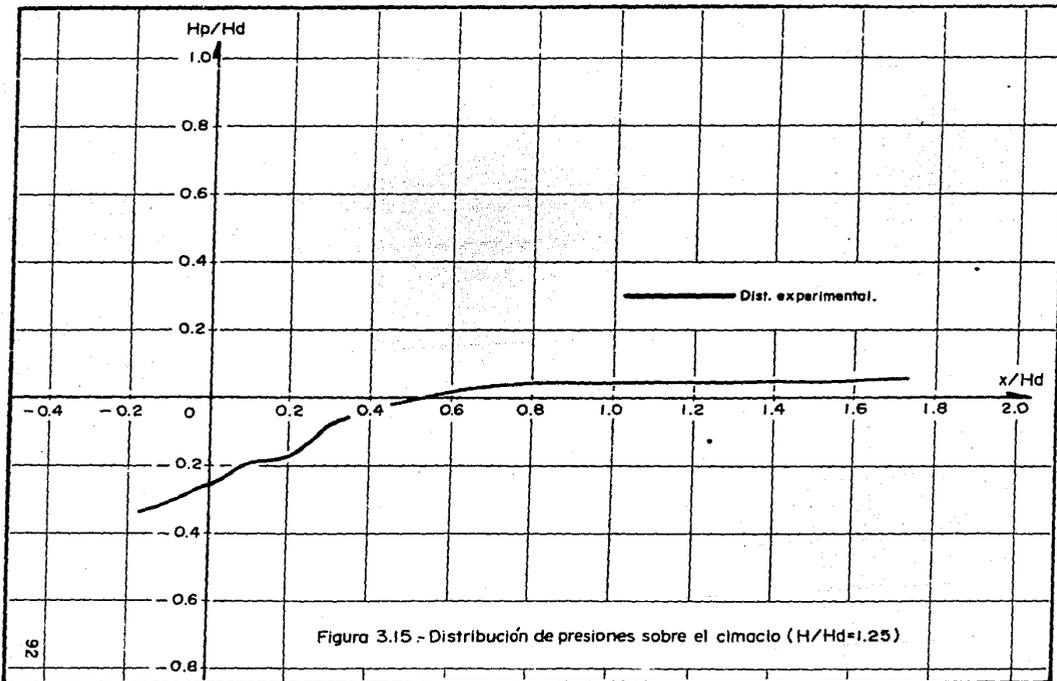


Figura 3.15 - Distribución de presiones sobre el cimacio ($H/H_d=1.25$)

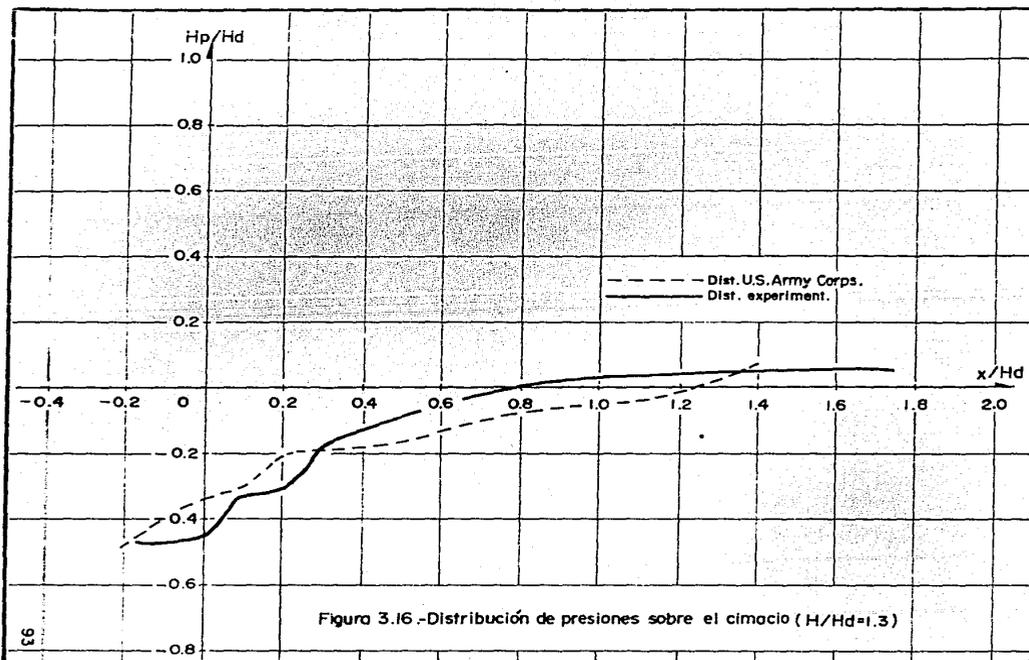


Figura 3.16.-Distribución de presiones sobre el cimacio ($H/H_d=1.3$)

CUARTO CAPITULO

**COMPARACION
TEORICA**

IV).- COMPARACION TEORICA

4.1).- Flujos con potencial

La teoría de los flujos con potencial estudia el comportamiento de escurrimientos altamente turbulentos, en los cuales los efectos viscosos no tienen importancia y de hecho se desprecian.

El análisis de los flujos con potencial puede hacerse por medio de un modelo matemático que se basa en lo siguiente; existe una función escalar $\phi(x,y,z)$ tal que la velocidad en cada punto es $v = \text{grad}\phi$, o sea:

$$v_x = \frac{\partial \phi}{\partial x} ; \quad v_y = \frac{\partial \phi}{\partial y} ; \quad v_z = \frac{\partial \phi}{\partial z}$$

Al calcular las componentes de $\text{rot } v$, usando las expresiones anteriores, se puede comprobar que:

$$\text{rot } v = \text{rot grad } \phi = 0$$

lo cual significa que la existencia de un potencial de velocidades está limitada a los flujos irrotacionales, por lo que en el modelo matemático ambos términos tienen el mismo significado para éstos casos.

Un flujo irrotacional no puede convertirse en rotacional si sobre las partículas actúan únicamente fuerzas de gravedad y de presión. Es más, como regla general, se puede producir un flujo (aproximadamente irrotacional) en fluidos reales, si el movimiento es resultado de fuerzas de presión y de gravedad, o

bien en aquellas zonas de un flujo a presión en la que los efectos viscosos carezcan de importancia.

Para el flujo incompresible (permanente ó no) y para el irrotacional es válida la ecuación de continuidad, $\text{div } v = 0$.

Si además se considera que el fluido es no viscoso ($\mu=0$) el esfuerzo tangencial τ vale cero en todos sus puntos. Por otra parte, con $v = \text{grad } \phi$, entonces :

$$\frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} (\text{grad } \phi) = \text{grad } \frac{\partial \phi}{\partial t}$$

y la ecuación de movimiento :

$$-\text{grad} \left(\frac{p}{\rho} + gz \right) + \frac{\partial}{\partial t} \left(-\frac{\tau}{\rho} \right) = -\text{grad} \left(\frac{v^2}{2} \right) + \text{rot } v \times v + \frac{\partial v}{\partial t}$$

se reduce a la forma :

$$\text{grad} \left(\frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} + gz + \frac{\partial \phi}{\partial t} \right) = 0$$

Debido a que la definición matemática de gradiente es independiente del sistema de ejes de coordenadas que se elija, la integración de la ecuación se puede efectuar en todo el campo de flujo y no necesariamente sobre una misma línea de corriente.

Por lo tanto :

$$\frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} + gz = C(t) - \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (4.1.a)$$

ó bien :

$$z + \frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} = C(t) - \frac{1}{g} \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (4.1.b)$$

donde $C(t)$ es una función que depende únicamente del tiempo.

La ecuación (4.1 b) es la ecuación del movimiento en un flujo irrotacional y es válida en todo el campo de un flujo ideal (no permanente) sin referirse necesariamente a una misma

línea de corriente particular. Es de gran utilidad en la teoría de las ondas irrotacionales. Para el flujo permanente, la ecuación (4.1.b) se simplifica a la forma:

$$z + \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2g} = H = \text{constante.}$$

Ecuación conocida como de Bernoulli e indica que la energía H es constante para todos los puntos de un campo de flujo permanente con potencial y no del todo necesario sobre una misma línea de corriente.

Ahora bien, de acuerdo con la definición de función potencial: $v = \text{grad } \phi$, y si S es el vector unitario tangente en cualquier punto a una línea de corriente, se puede escribir:

$$v = v \cdot S = \text{grad } \phi \cdot S$$

Esto es, por definición de derivada direccional, la magnitud de la velocidad es:

$$v = \frac{\partial \phi}{\partial s}$$

donde s representa la coordenada curvilínea a lo largo de la línea de corriente.

Por otra parte, la ecuación:

$$\phi(x, y, z) = H$$

representa una familia de superficies equipotenciales diferentes, de acuerdo con el valor que se le asigne a la constante. Todos los puntos contenidos en una de éstas superficies tienen el mismo valor del potencial ϕ .

Puesto que $\text{grad } \phi$ es un vector normal en cada punto a la superficie equipotencial ϕ , a su vez, representa al vector

velocidad, las líneas de corriente serán ortogonales a las superficies equipotenciales como se indica en la figura 4.1

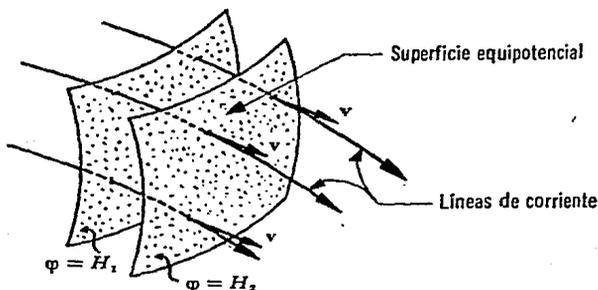


Fig. 4.1 - Ortogonalidad entre las sup. equip. y las líneas de corriente.

Si las superficies de corriente $\psi = \text{constante}$, $\chi = \text{cte.}$, se eligen de modo que sean ortogonales, éstas formarán con las superficies equipotenciales un triple sistema de superficies ortogonales :

$$\psi(x, y, z) = F$$

$$\chi(x, y, z) = G$$

$$\phi(x, y, z) = H$$

a partir de la cual se pueden determinar las características del flujo en cada punto.

La existencia del potencial ϕ en un flujo incompresible donde $\text{div } v = 0$, implica que $\text{div grad } \phi = 0$. Esto es, se cumple :

$$\nabla^2 \phi = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0$$

que es la ecuación de Laplace, por lo que la función potencial ϕ que la satisface es armónica.

Para un flujo bidimensional la ecuación de Laplace se reduce a :

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = 0$$

En el caso bidimensional, el sistema triortogonal de superficies $\psi = \text{cte.}$, $\chi = \text{cte.}$, $\phi = \text{cte.}$, se convierte en una doble familia de curvas sobre el plano "x-y", que corresponde a las intersecciones de las superficies equipotenciales y de corriente con el mismo; además, tiene por ecuación: $\phi = H$, $\psi = F$, en la que H y F son constantes. Las superficies $\chi = \text{cte.}$, corresponden a todos los planos paralelos al coordenado "x-y".

El sistema de curvas equipotenciales y de corriente son ortogonales entre sí y recibe el nombre de red de flujo.

Las líneas equipotenciales y de corriente, además de ser ortogonales, forman una malla de cuadrados si se eligen incrementos iguales para las funciones ϕ y ψ .

El gasto unitario entre dos líneas de corriente es proporcional a la diferencia de los valores de ψ para éstas dos líneas.

Sin ser necesario conocer los valores de ϕ y ψ en las fronteras, se puede trazar, mediante ajustes sucesivos hechos a mano, una red de flujo que se apoye en las líneas de corriente ó equipotenciales de frontera de la región estudiada, respetando únicamente la ortogonalidad de las mismas; y también se pueden elegir incrementos pequeños para las funciones con objeto de obtener una malla de cuadrados. Se debe satisfacer también que las diagonales de dicha malla formen a su vez otra de idénticas propiedades que la primera, pero inclinada a 45°; y además que cada

cuadrilátero elemental contenga un círculo inscrito en el mismo .

Los métodos utilizados para construir una red de flujo son, entre otros, los siguientes :

- A).- Métodos Gráficos.- el de Prasil, por ejemplo .
- B).- Métodos Numéricos.- Relajaciones, Ecuación de Laplace en diferencias finitas, método matricial, método del elemento finito .
- C).- Método de Solución Analítica.- Solución directa, solución indirecta, superposición de flujos .
- D).- Métodos Analógicos .

En éste trabajo se utilizó como Método Analógico la mesa Hele-Shaw del Laboratorio de Hidráulica (Fotografía N° 3), construyendo una serie de "tarrajas" (de cartón e impermeabilizadas) que permitieron simular tanto el perfil del cimacio como el de la superficie libre del agua sobre el mismo. Teniendo de ésta forma las fronteras ya definidas de la red .

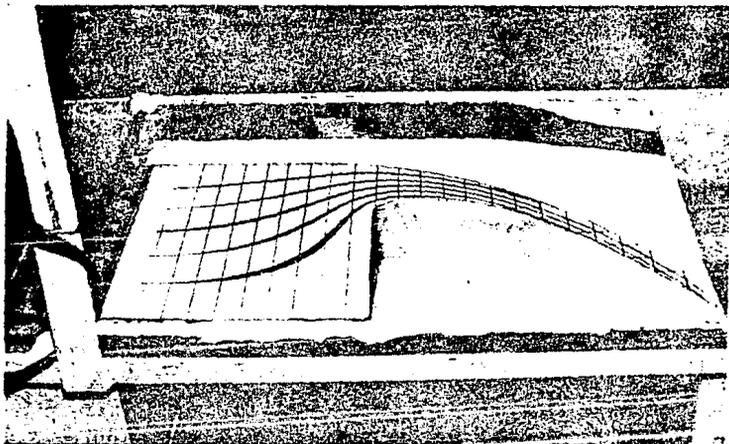
El cimacio utilizado, para este caso, fué para una carga de diseño $H_d = 10$ cm., y los perfiles correspondientes fueron para relaciones $H/H_d = 0.5, 1.0$ y 1.3

Con el objeto de observar el comportamiento de las líneas de corriente se construyeron tres dispositivos que contenían, cada uno, una serie de agujas por medio de las cuales se inyec

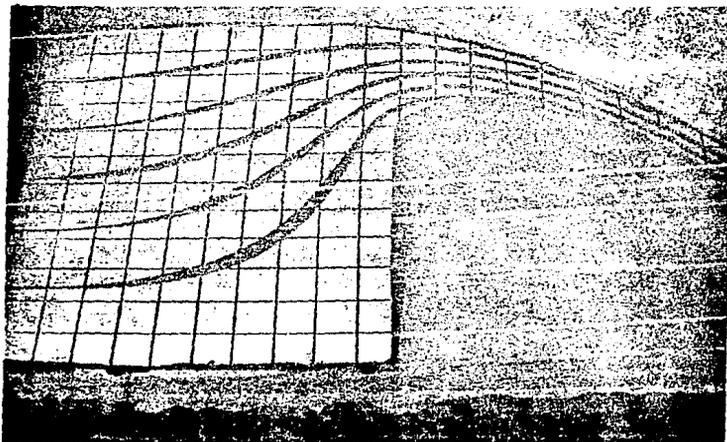
tó tinta al flujo, de ésta forma las líneas de corriente sobre el cimacio quedaban representadas por las trayectorias que forma ban los filamentos de tinta .

En las Fotografías N° 4 a 10 se pueden observar las líneas de corriente obtenidas para cada relación de H/H_d .

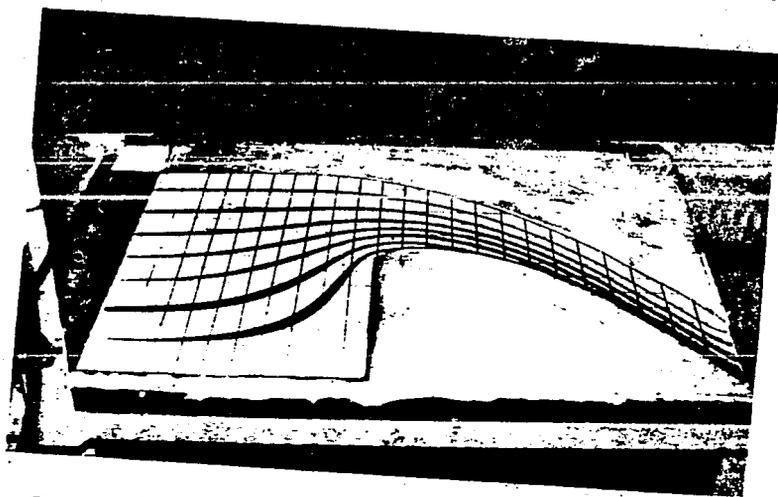
Teniendo las líneas de corriente ya definidas, se dibujaron las redes de flujo correspondientes .



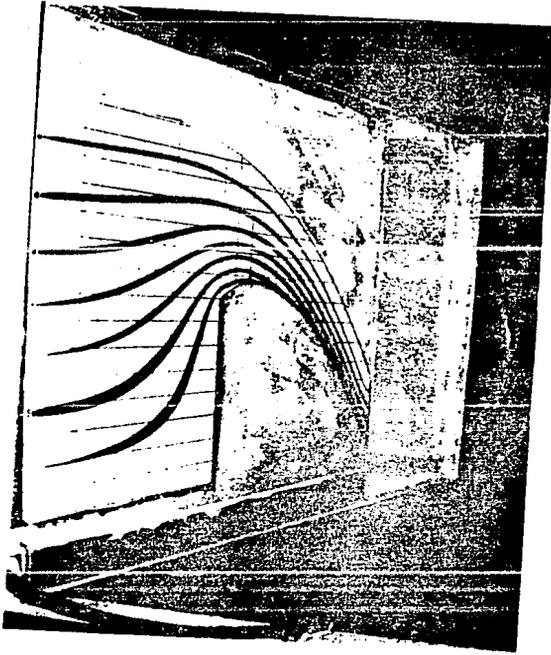
Fotografía No 4.- Líneas de corriente sobre el cimacio
para $H/H_d=0.5$



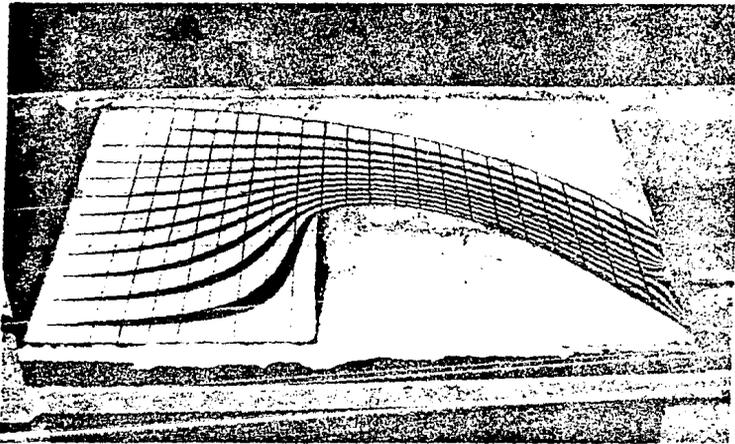
Fotografía No 5.- Detalle de las líneas de corriente
($H/H_d=0.5$).



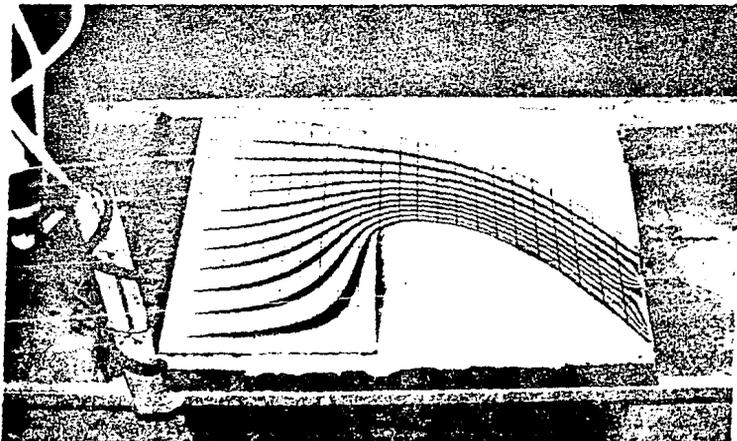
Fotografía No.6.-Líneas de corriente para $H/H_d = 1.0$



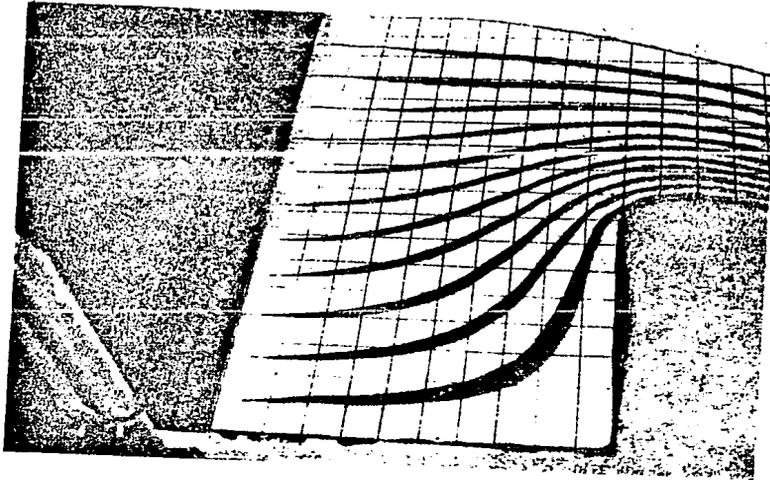
Fotografía No 7.- Otra toma de las líneas de corriente para $H/H_d=1.0$



Fotografía No 8.-Vista de las líneas de corriente para $H/H_d=1.3$



Fotografía No 9.-Otra vista para la misma condición.



Fotografía No 10.- Detalle del dispositivo alimentador
de tinta al flujo.

4.2).- Redes de flujo

Con base a las líneas de corriente obtenidas en la mesa Hele-Shaw, para cada relación de H/H_d , se copiaron éstas a la misma escala sobre papel albanene .

Posteriormente se trazaron las equipotenciales para, de esta forma, tener completas cada una de las redes de flujo .

Para el cálculo de la distribución de velocidades como la de presiones, se procedió de la siguiente manera :

Con la carga de diseño del cimacio $H_d = 10$ cm., y con la relación de H/H_d respectiva, se puede conocer la carga sobre el cimacio (H) .

Tomando un nivel de referencia arbitrario y con la carga H se obtiene la energía total H_T por unidad de peso para esa relación .

El gasto que pasa por unidad de ancho por cada canal (distancia que hay entre una línea de corriente y la siguiente) será :

$$q = \frac{C(i)H^{3/2}}{N.C.}$$

Donde:

q.-gasto por unidad de ancho que pasa por cada canal.

C.- coeficiente de descarga.(Fig.4.2)

H.-carga sobre el cimacio.

N.C.- número de canales.

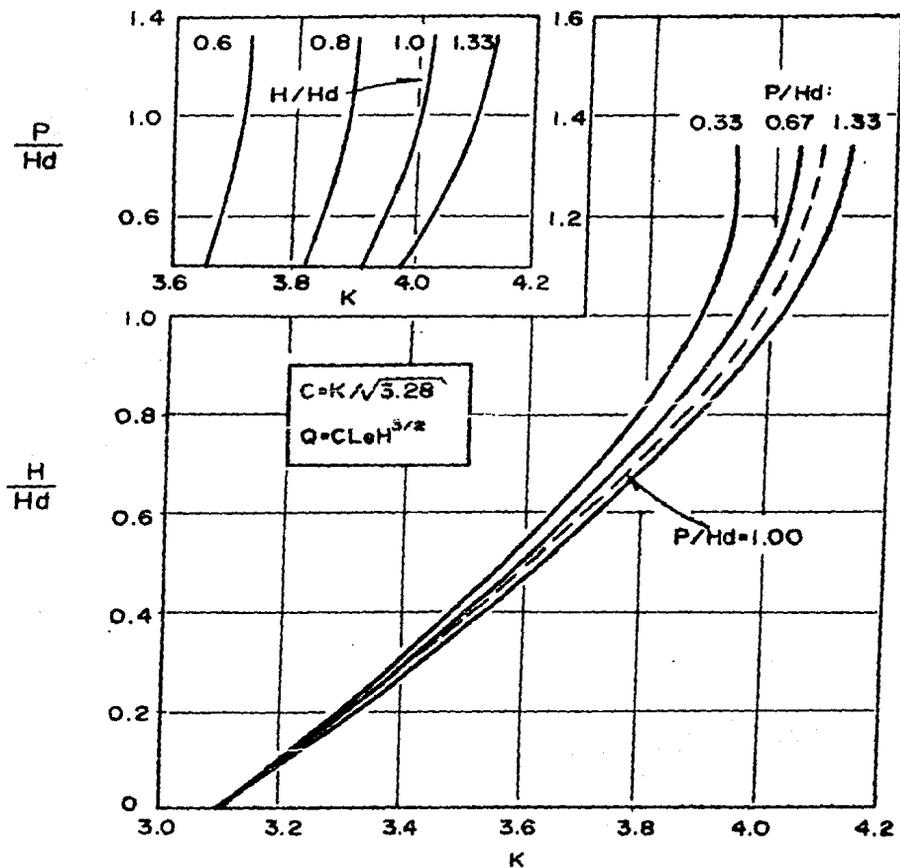


Fig.4.2.- Coeficientes de descarga para cimacios de cresta libre.

La velocidad, para cada sección, se calculará como :

$$V = \frac{q}{A}$$

Donde:

A.- área transversal del canal respectivo.

De la ecuación de Bernoulli se tiene :

$$H_T = Z + \frac{P}{\gamma} + \frac{V^2}{2g}$$

Donde: H_T = energía total.

Z - carga de posición del punto de interés.

$H_p = P/\gamma, V^2/2g$ - cargas de presión y velocidad.

Para tramos donde la obra sea prismática, la carga de presión $H_p = P/\gamma$ en un punto de la obra, será la proyección vertical h_{pL} de la longitud de la normal a la pared de la conducción desde la pared hasta la superficie del agua, d . Si hubiera curvatura vertical, a ese valor se le deberá añadir un término correctivo para obtener la carga de presión H_p , (Figura 4.3).

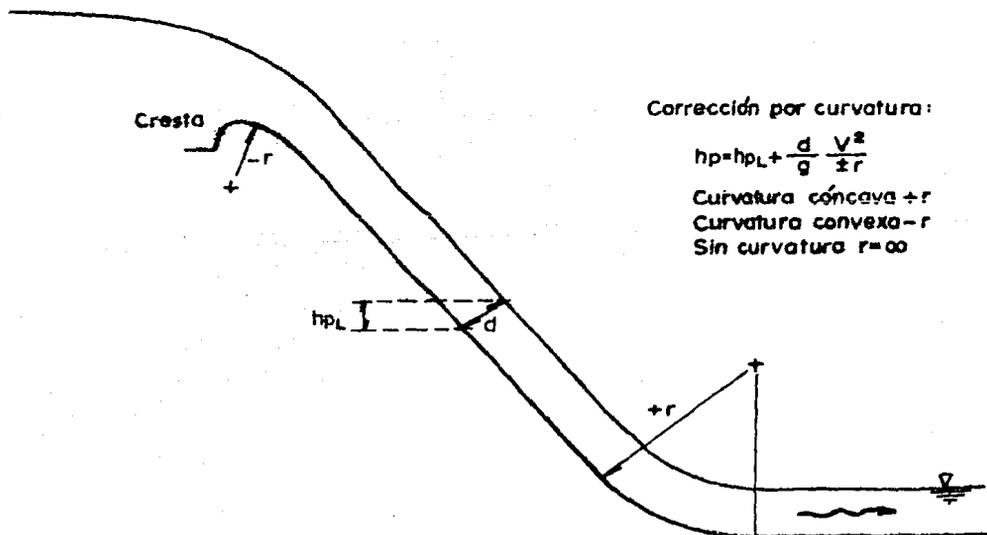


Fig. 4.3.- Esquema para mostrar la medición de h_{pL}, d y r .

4.2.a).- Distribución de velocidades

A continuación se presentan tanto las redes de flujo como la distribución de velocidades en distintas secciones, para las relaciones H/H_d mencionadas anteriormente, Figuras 4.4 a la 4.6

4.2.b).- Distribución de presiones

Con la distribución de presiones calculada se procedió a graficarlas en forma adimensional sobre un plano (x/H_d Vs H_p/H_d). Las Figuras 4.7 a la 4.9 muestran estos resultados.

H=0.05m

Q=0.022 m³/s/m

q=0.0044 m³/s/línea de corriente.

Canal.	1		2		3		4		5		6		7	
	V (m/s)	V ² /2g (m)												
C ₁	0.733	0.0274	1.100	0.0616	1.466	0.1096	1.466	0.1096	1.760	0.1578	1.760	0.1578	1.760	0.1578
C ₂	0.440	0.0098	0.550	0.0154	0.400	0.0081	0.977	0.0487	1.257	0.0805	1.257	0.0805	1.466	0.1096
C ₃	0.463	0.0110	0.677	0.0233	0.977	0.0487	0.977	0.0487	0.977	0.0487	1.100	0.0616	1.257	0.0805
C ₄	0.440	0.0098	0.628	0.0201	0.628	0.0201	0.733	0.0274	0.880	0.0394	1.100	0.0616	1.466	0.1096
C ₅	0.366	0.0068	0.463	0.0109	0.550	0.0154	0.733	0.0274	1.100	0.0616	1.466	0.1096	1.760	0.1578

Canal.	1		2		3		4		5		6		7	
	V (m/s)	V ² /2g (m)												
C ₁	0.476	0.0115	0.540	0.0148	0.666	0.0226	0.862	0.0378	1.075	0.0589	1.351	0.0930	1.666	0.1415
C ₂	0.588	0.0176	0.645	0.0212	0.833	0.0354	0.909	0.0421	1.020	0.0530	1.234	0.0776	1.428	0.1040
C ₃	0.729	0.0271	0.833	0.0353	0.909	0.0421	1.250	0.0796	1.428	0.1039	1.538	0.1206	1.818	0.1684
C ₄	1.020	0.0530	1.136	0.0658	1.369	0.0956	1.398	0.0996	1.408	0.1011	1.587	0.1284	1.724	0.1515
C ₅	1.333	0.0906	1.298	0.0859	1.538	0.1206	1.587	0.1284	2.000	0.2038	2.083	0.2212	2.222	0.2517
C ₆	1.282	0.0837	1.333	0.0906	1.428	0.1040	1.886	0.1814	2.040	0.2122	2.222	0.2517	2.380	0.2887
C ₇	0.926	0.0437	0.952	0.0462	1.369	0.0956	1.724	0.1515	1.666	0.1415	2.173	0.2406	2.380	0.2887

H=0.10 m

Q=0.070 m³/s/m

q=0.01 m³/s/línea de corriente.

Tabla 14.- Velocidades en distintas secciones sobre el cimacio para H/Hd=0.50 y 1.00

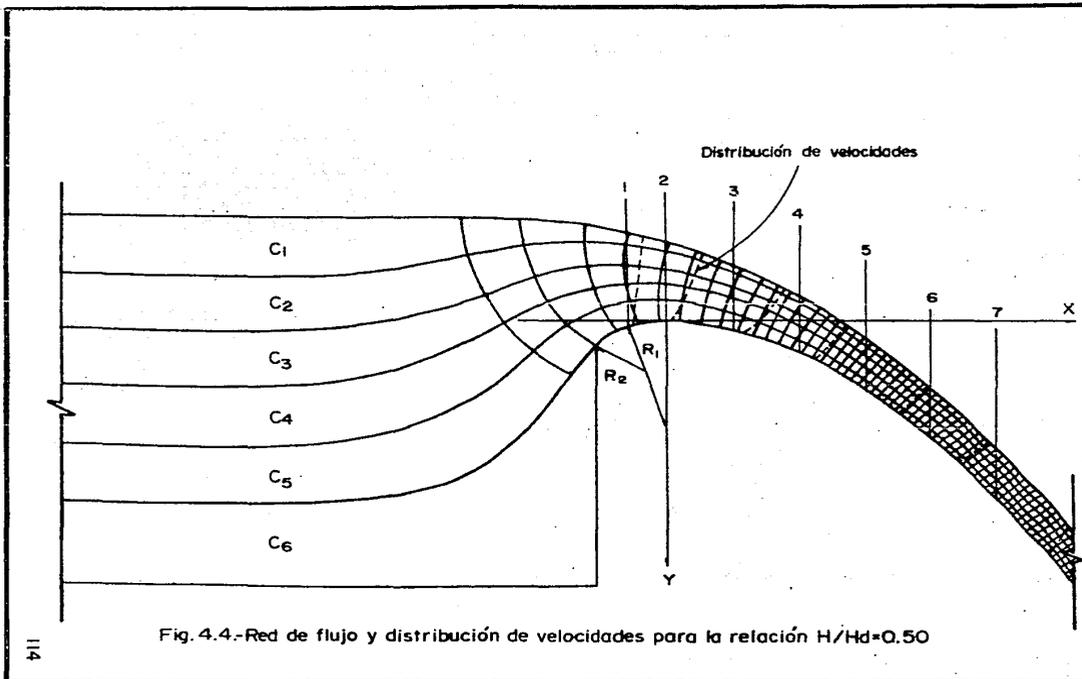
Ccanal.	1		2		3		4		5		6		7	
	V (m/s)	V ² /2g (m)												
C ₁	0.669	0.0228	0.718	0.0263	0.776	0.0307	0.808	0.0333	0.843	0.0362	0.881	0.0396	1.021	0.0531
C ₂	0.646	0.0213	0.692	0.0244	0.808	0.0330	0.970	0.0479	0.970	0.0479	0.989	0.0499	1.141	0.0663
C ₃	0.843	0.0362	0.923	0.0434	0.923	0.0434	1.212	0.0749	1.212	0.0749	1.154	0.0679	1.276	0.0830
C ₄	0.882	0.0396	1.021	0.0531	1.293	0.0852	1.385	0.0977	1.385	0.0977	1.426	0.1037	1.492	0.1135
C ₅	0.970	0.0480	1.021	0.0531	1.141	0.0663	1.212	0.0749	1.437	0.1052	1.616	0.1332	1.763	0.1585
C ₆	1.293	0.0852	1.492	0.1135	1.492	0.1135	1.539	0.1208	1.564	0.1247	2.155	0.2368	1.672	0.1425
C ₇	1.763	0.1585	1.763	0.1585	1.940	0.1918	2.063	0.2170	2.108	0.2266	2.255	0.2593	2.155	0.2368
C ₈	1.293	0.0852	1.385	0.0978	1.492	0.1135	1.616	0.1332	1.672	0.1425	1.763	0.1585	1.865	0.1773
C ₉	1.293	0.0852	1.492	0.1135	2.155	0.2368	2.425	0.2997	2.108	0.2266	1.865	0.1773	1.763	0.1585
C ₁₀	1.385	0.0978	1.616	0.1332	1.616	0.1332	1.940	0.1918	2.108	0.2266	1.979	0.1997	1.979	0.1997
C ₁₁	1.212	0.0749	1.212	0.0749	1.385	0.0978	1.492	0.1135	1.940	0.1918	2.425	0.2997	2.455	0.3071

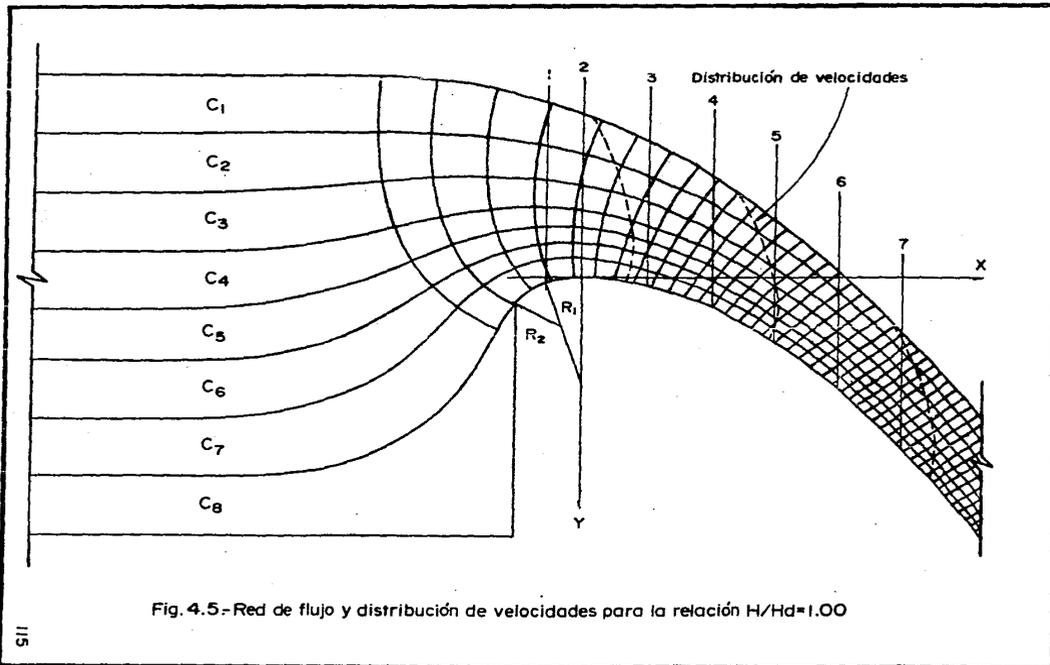
H=0.13 m

Q=0.1066 m³/s/m

q=0.0097 m³/s/línea
de corriente.

Tabla 14 (cont.)- Velocidades en distintas secciones sobre el cimacio para H/Hd=1.30





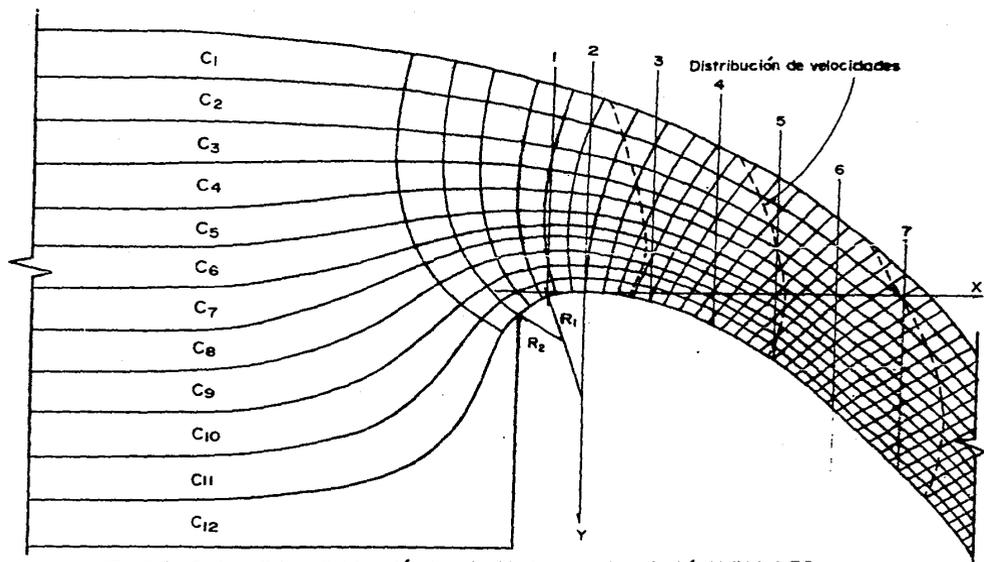


Fig.4.6.-Red de flujo y distribución de velocidades para la relación $H/H_d=1.30$

$H_T = 0.1802 \text{ m}$ $K = 3.6$
 $H = 0.05 \text{ m}$ $C = 1.987 \text{ m}^{3/2}/\text{s}$
 $P/Hd = 1.17$ $Q = 0.022 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$

x/Hd	V (m/s)	V ²	V ² /2g (m)	z (m)	h _{pt} (m)	d (m)	r (m)	H _p (m)	H _p /Hd	
									Teóricas	U.S.A.C.
-0.250	0.285	0.081	0.0041	0.121	0.0585	0.077	0.033	0.0392	0.392	0.40
-0.125	0.440	0.193	0.0098	0.127	0.0470	0.050	0.052	0.0280	0.280	0.24
0	0.578	0.335	0.0170	0.130	0.0380	0.038	0.081	0.0219	0.219	0.20
0.200	0.709	0.503	0.0250	0.127	0.0300	0.031	0.264	0.0230	0.239	0.18
0.400	0.862	0.744	0.0380	0.125	0.0240	0.025	0.302	0.0176	0.176	0.11
0.600	1.023	1.046	0.0530	0.111	0.0185	0.021	0.350	0.0119	0.119	0.10
0.800	1.157	1.340	0.0680	0.098	0.0155	0.019	0.350	0.0080	0.080	0.09
1.000	1.294	1.674	0.0850	0.080	0.0120	0.017	0.674	0.0043	0.043	0.08
1.200	1.375	1.890	0.0960	0.060	0.0110	0.016	0.674	0.0064	0.064	0.05
1.400	1.419	2.010	0.1020	0.037	0.0100	0.015	0.674	0.0052	0.052	0.05
1.600	1.517	2.300	0.1170	0.010	0.0080	0.014	0.674	0.0029	0.029	----

Tabla 15.- Presiones sobre el cimacio (Teóricas), H/Hd=0.50

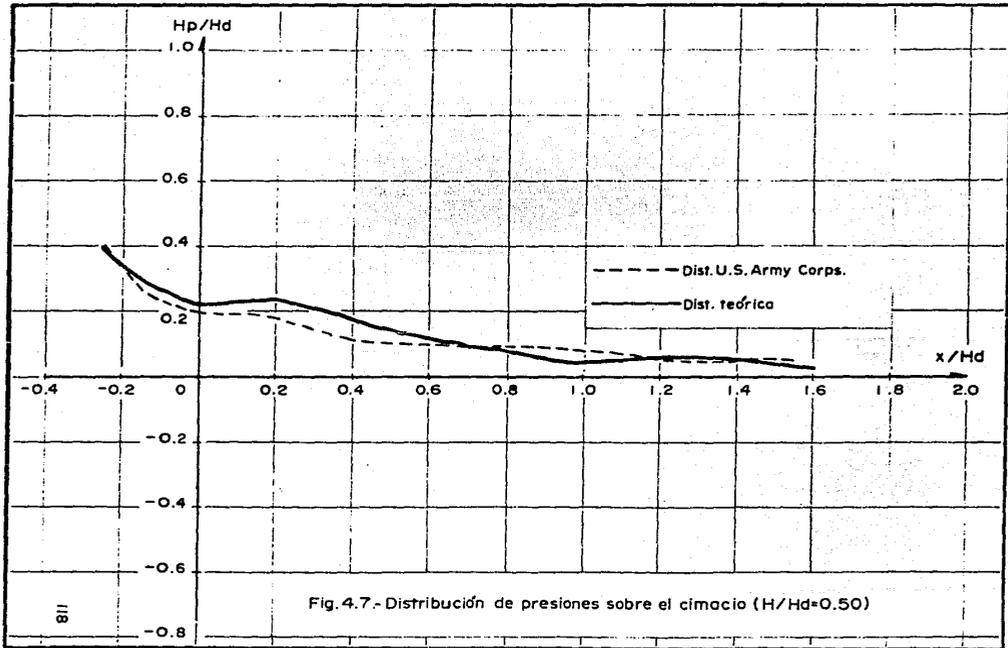
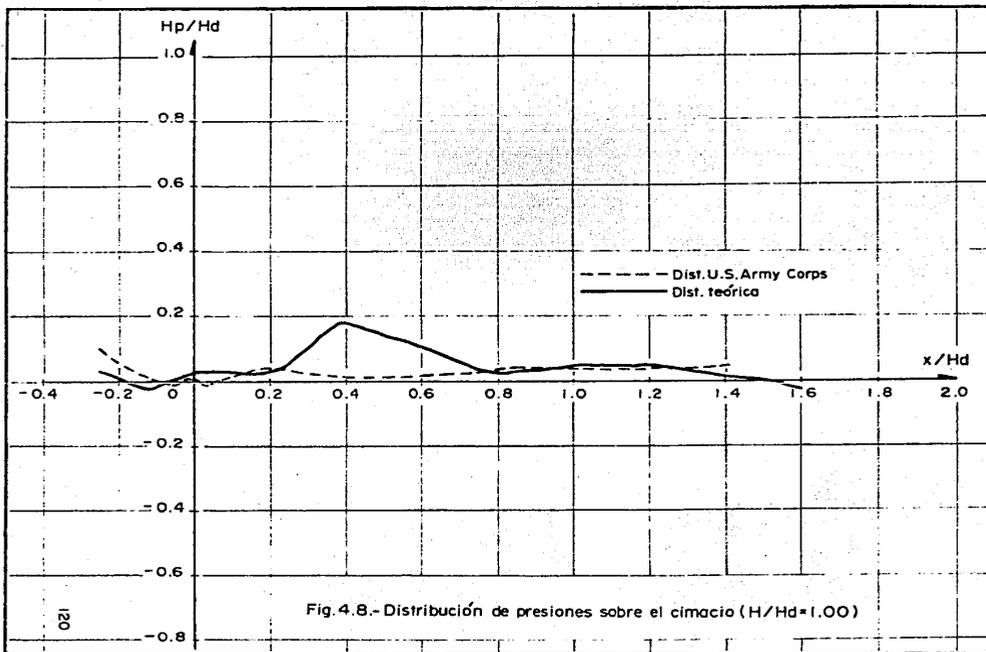


Fig. 4.7.- Distribución de presiones sobre el cimacio ($H/H_d=0.50$)

$H_f = 0.2347\text{m}$ $K = 4.02$
 $H = 0.10\text{m}$ $C = 2.22\text{ m}^3/\text{s}$
 $P/H_d = 1.17$ $Q = 0.070\text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$

x/Hd	V (m/s)	V ²	V ² /2g (m)	z (m)	h _p (m)	d (m)	r (m)	H _p (m)	H _p /Hd	
									Teórica	U.S.A.C.
-0.250	0.486	0.236	0.0120	0.121	0.1080	0.144	0.033	0.0030	0.030	0.10
-0.125	0.666	0.444	0.0220	0.127	0.0890	0.105	0.052	-0.0024	-0.024	-0.07
0	0.875	0.765	0.0390	0.130	0.0800	0.080	0.081	0.0029	0.029	0.00
0.200	1.044	1.091	0.0550	0.127	0.0650	0.067	0.264	0.0290	0.290	0.04
0.400	1.228	1.510	0.0760	0.125	0.0520	0.057	0.302	0.0187	0.187	0.01
0.600	1.420	2.040	0.1040	0.111	0.0400	0.049	0.350	0.0108	0.108	0.02
0.800	1.590	2.530	0.1290	0.098	0.0350	0.044	0.350	0.0021	0.025	0.04
1.000	1.790	3.220	0.1640	0.080	0.0240	0.039	0.674	0.0050	0.050	0.04
1.200	1.890	3.570	0.1820	0.060	0.0250	0.037	0.674	0.0050	0.050	0.04
1.400	2.000	4.000	0.2030	0.037	0.0230	0.035	0.674	0.0018	0.018	0.05
1.600	2.058	4.238	0.2160	0.010	0.0190	0.034	0.674	-0.0028	-0.028	----

Tabla 16.- Presiones sobre el cimacio (Teóricas), H/H_d=1.00



$$H_T = 0.2676 \text{ m}$$

$$K = 4.12$$

$$H = 0.13 \text{ m}$$

$$C = 2.275 \text{ m}^{3/2}/\text{s}$$

$$P/Hd = 1.17$$

$$Q = 0.1066 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$$

x/Hd	V (m/s)	V ²	V ² /2g (m)	z (m)	h _{pL} (m)	d (m)	r (m)	H _p (m)	H _p /Hd	
									Teóricas	U.S.A.C.
-0.250	0.590	0.350	0.0178	0.121	0.1350	0.180	0.033	-0.059	-0.596	-0.40
-0.125	0.918	0.840	0.0430	0.127	0.1130	0.116	0.052	-0.078	-0.780	-0.45
0	1.076	1.159	0.0590	0.130	0.0990	0.099	0.081	-0.045	-0.453	-0.34
0.200	1.225	1.501	0.0760	0.127	0.0845	0.087	0.264	0.034	0.340	-0.20
0.400	1.332	1.775	0.0900	0.125	0.0750	0.080	0.302	0.027	0.270	-0.18
0.600	1.412	1.993	0.1010	0.111	0.0660	0.075	0.350	0.022	0.221	-0.14
0.800	1.501	2.250	0.1140	0.098	0.0565	0.071	0.350	0.009	0.099	-0.08
1.000	1.591	2.531	0.1290	0.080	0.0490	0.067	0.674	0.023	0.233	-0.04
1.200	1.712	2.956	0.1506	0.060	0.0420	0.062	0.674	0.014	0.142	-0.01
1.400	1.903	3.623	0.1840	0.037	0.0355	0.056	0.674	0.004	0.048	0.05
1.600	2.090	4.368	0.2220	0.010	0.0300	0.051	0.674	-0.003	-0.037	-----

Tabla 17.-Presiones sobre el cimacio (teóricas), H/Hd=1.30

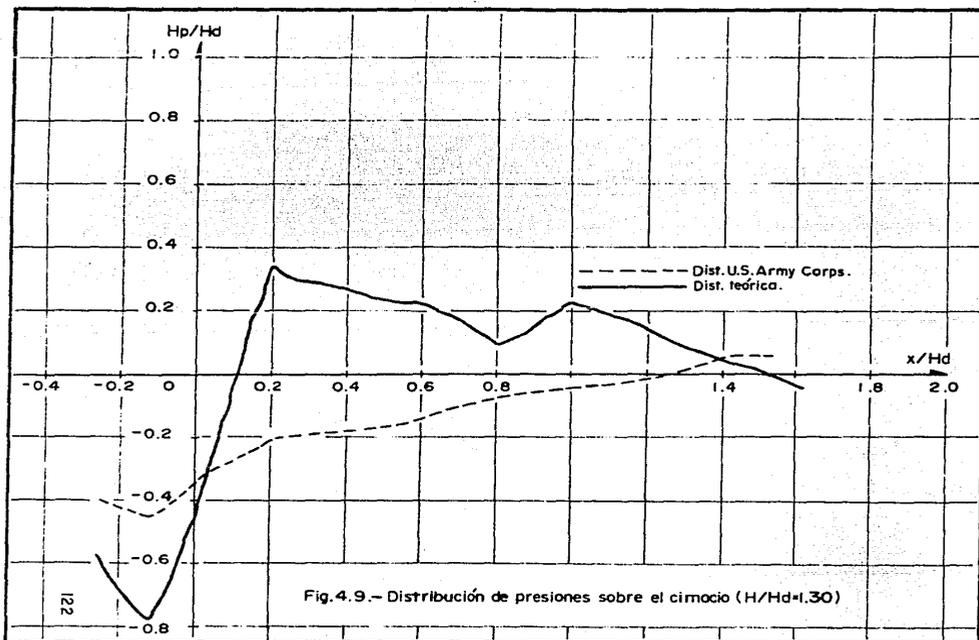


Fig. 4.9.- Distribución de presiones sobre el chimio ($H/H_d=1.30$)

4.3).- Comparación teórica

En las Figuras 4.7 , 4.8 y 4.9 se han graficado tanto la distribución de presiones calculada, por medio de la teoría de los flujos con potencial, como la obtenida experimentalmente por el U.S. Army Corps of Engineers .

De ellas se puede decir que el comportamiento de la distribución teórica es bastante aproximado al experimental para relaciones $H/H_d \leq 1.00$, no así para relaciones mayores a aquella. Por lo tanto, los resultados que se obtienen para relaciones $H/H_d > 1.0$ deberán ser tomados con reserva.

También cabe hacer notar el hecho de que las pérdidas de energía juegan un papel muy importante para el cálculo de presiones sobre el perfil del cimacio .

QUINTO CAPITULO

C O N C L U S I O N E S

V).- CONCLUSIONES

Resulta sumamente importante el conocer la distribución de presiones en obras de excedencia debido a que si existen presiones negativas puede ser posible que se presenten problemas como el de la cavitación. En la que, una vez ocurrido el problema, en la mayoría de los casos el daño resulta ser progresivo.

La cavitación es un fenómeno asociado a las presiones negativas producto de los efectos dinámicos de un líquido al escurrir, siguiendo fronteras curvas ó alrededor de cuerpos sumergidos. Es ahí, en las zonas de baja presión precisamente, en las que se forman cavidades llenas de vapor, las cuales son arrastradas posteriormente por el movimiento del fluido a zonas de mayor presión donde las cavidades pueden reducir su volumen casi instantáneamente en forma muy violenta, lo que provoca que cualquier pared sólida fija ó móvil que se encuentre cerca sufra daños de consideración en forma de erosiones ó fuertes vibraciones que pueden poner en peligro la estabilidad de la obra.

Con respecto a la aplicación del Análisis Dimensional, para la obtención de parámetros adimensionales, es necesario conocer con seguridad las variables más importantes en el fenómeno por estudiar, pues una apreciación errónea puede conducir, aún utilizando esta técnica, a aplicaciones falsas. La identificación de esas magnitudes físicas debe hacerse después de un

análisis físico y de un completo entendimiento del problema .

Por lo que toca al modelo hidráulico utilizado inicialmente, en donde se llevaron a cabo las mediciones de tipo experimental, se puede mencionar lo siguiente :

Primero, el modelo presentaba cierta inestabilidad en lo concerniente al perfil de la superficie libre del agua sobre el cimacio para relaciones $H/H_d > 1.0$ lo que dificultaba grandemente a la hora de efectuar las mediciones de las lecturas correspondientes .

Segundo, con respecto a los piezómetros también se observó bastante inestabilidad a partir de la misma relación ($H/H_d > 1.0$). En especial se tenían oscilaciones en los piezómetros ubicados cerca de la cresta, aún así se presentaron las máximas variaciones en el piezómetro N° 7

Ahora bien, a la hora de hacer las gráficas adimensionadas de distribución de presiones (Figs. 3.11 a 3.16), se notó que precisamente este piezómetro no mostraba una tendencia lógica con respecto a las demás. Es por ello que en dichas gráficas se puede apreciar un punto, que corresponde al obtenido experimentalmente para ese piezómetro, pero que no fué tomado en cuenta para la construcción de la gráfica. Además que también se tomó como apoyo las gráficas obtenidas por el U.S. Army Corps of Engineers, teniéndose una mejor similitud si se desprecia únicamente la medición que se obtuvo para este piezómetro .

Considero que las oscilaciones que se presentaron en el modelo hidráulico utilizado, para relaciones $H/H_d > 1.0$ y que producían inestabilidad en el perfil del fluido, se debió a que éste se mezclaba con aire lo que hacía que la lámina superior empezara a desprenderse para posteriormente, y de alguna manera, expulsar el mismo y volver a su tendencia original, lo que daba como resultado que se presentaran variaciones en el nivel de la superficie libre del agua continuamente.

Sin embargo, a pesar de lo problemático que resultó al llevar a cabo las mediciones respectivas, los resultados que se obtuvieron en forma experimental en el modelo son bastante confiables en lo referente al perfil de la superficie del agua (Fig. 3.7).

Con respecto a la distribución de presiones sobre el cimacio, la tendencia de las gráficas resulta ser muy semejante a las obtenidas por el U.S. Army Corps of Engineers (Figs. 3.12 3.14 y 3.16).

Cabe destacar la gran importancia que tienen los modelos hidráulicos, como un apoyo en el diseño de obras civiles, dado que en ellos se pueden visualizar tanto los fenómenos como el comportamiento del mismo y poder así modificarlo, en caso de ser necesario, de tal suerte que se tenga un funcionamiento satisfactorio.

La teoría de los flujos con potencial se restringe prácticamente al fluido ideal o perfecto, definido como aquel

que se comporta como incompresible y no viscoso.

Si se exceptúa la presencia de singularidades vorticosas, el movimiento de este tipo de fluidos es irrotacional.

Con base a los trabajos llevados a cabo por Escande, se ha establecido que es válido considerar el flujo en vertederos como irrotacional, por lo tanto podrá aplicarse la teoría de los flujos con potencial.

Una de las restricciones que se tienen en la construcción de las redes de flujo es de que no se conoce, a priori, la línea de corriente superior. Sin embargo, existen métodos para poder determinarla, como por ejemplo el de Prasil. En este método se debe de ir tanteando prácticamente la línea de corriente superior hasta lograr que la frontera inferior coincida con el perfil del cimacio para posteriormente trazar la correspondiente red de flujo.

Ahora bien, el hecho de que se haya utilizado un modelo analógico para calcular teóricamente la distribución de presiones, obedece a que el comportamiento de las líneas de corriente es bastante similar (aún teniéndose flujo laminar) al que se presenta en un modelo hidráulico ó en la realidad, en donde se tienen flujos con alta velocidad.

Para perfiles longitudinales curvos, la fuerza centrífuga ejerce un incremento en las presiones que hace necesaria la modificación del término que representa la carga de presión,

corrección por curvatura.

La teoría de los flujos con potencial arroja resultados, sobre distribución de presiones, bastante aproximados a los obtenidos en forma experimental para relaciones $H/H_d \leq 1.00$. Por lo que puede aplicarse esta teoría para relaciones que cumplan con la condición anterior.

La ventaja que se tiene al utilizar este tipo de modelos hidráulicos (en este caso analógico), radica en la sencillez de los mismos y en su bajo costo.

Para tener resultados más confiables, sobre distribución de presiones, se recomienda utilizar instalaciones de tipo experimental como la descrita al inicio del Capítulo III de este trabajo.

BIBLIOGRAFIA

BIBLIOGRAFIA :

- 1).- Diseño de Presas Pequeñas
U.S. Department of the Interior
Bureau of Reclamation
- 2).- Manual de Diseño de Obras Civiles
 - a).- Obra de Excedencias .
 - b).- Técnicas ExperimentalesInstituto de Investigaciones Eléctricas
Comisión Federal de Electricidad
- 3).- Hidráulica de los Canales Abiertos
Ven Te Chow
Mc Graw-Hill Book Co
- 4).- Hidráulica General
Gilberto Sotelo Avila
Editorial Limusa
- 5).- Curso de Modelos Hidráulicos
Laboratorio de Hidráulica
Facultad de Ingeniería, U.N.A.M.
- 6).- Apuntes de Hidráulica II
Gilberto Sotelo Avila
Facultad de Ingeniería, U.N.A.M.

7).- Diseño Hidrodinámico y Automatización Fluidica -
en Obras Hidráulicas .

Enzo Levi y Alvaro Aldama

Instituto de Ingeniería, U.N.A.M.

8).- Perfil de la superficie libre en cimacios tipo
Creager .

IX Congreso Nacional de Hidráulica

Ing. Luis Fco. León V.

Laboratorio de Hidráulica, F. I., U.N.A.M.