

TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO 5	75
DISEÑO HIDRÁULICO DE VERTEDEROS	75
5.1 FUNCIONES DE LOS VERTEDEROS	75
5.2 ESTUDIOS Y MEDICIONES	76
5.3 PARTES QUE CONFORMAN UN VERTEDERO	77
5.3.1 <i>La Estructura de Control.</i>	77
5.3.2 <i>Canal de Descarga.</i>	77
5.3.3 <i>Estructura Terminal.</i>	78
5.3.4 <i>Canales de Llegada y Descarga.</i>	79
5.4 CLASIFICACIÓN	79
5.5 SECCIÓN TRANSVERSAL DE LAS CRESTAS DE VERTEDEROS SIN CONTROLES	80
5.6 DESCARGA SOBRE UNA CRESTA DE VERTEDERO SIN CONTROLES	80
5.6.1 <i>Efecto que producen las Pilas y los Estribos.</i>	81
5.7 COEFICIENTE DE DESCARGA PARA CRESTAS DE VERTEDERO SIN CONTROL	83
5.7.1 <i>Efecto de la Profundidad de Llegada.</i>	83
5.7.1 <i>Efecto de las Cargas Diferentes a la del Proyecto.</i>	85
5.7.2 <i>Efecto del Talud del Paramento de Aguas Arriba.</i>	86
5.7.3 <i>Efecto de la interferencia del lavadero de aguas abajo y de la sumergencia.</i>	87
5.8 VERTEDEROS DE CIMACIO SIN CONTROL PROYECTADOS PARA CARGAS MENORES QUE LA MÁXIMA	91
5.9 CRESTAS DE CIMACIO CONTROLADAS POR COMPUERTAS	91
5.10 DESCARGA POR VERTEDEROS DE CIMACIO CONTROLADOS POR COMPUERTAS	93
5.11 FLUJO A LA SALIDA DE VERTEDEROS DE EXCEDENCIAS	94
5.12 EJEMPLOS DE APLICACIÓN	96
5.13 APLICACIÓN DE PROGRAMAS EN EL DISEÑO DE VERTEDEROS	102
5.13.1 <i>Ejemplo de aplicación.</i>	102
5.14 EJERCICIOS PROPUESTOS	104
5.15 BIBLIOGRAFIA	105

CAPÍTULO 5

DISEÑO HIDRÁULICO DE VERTEDEROS

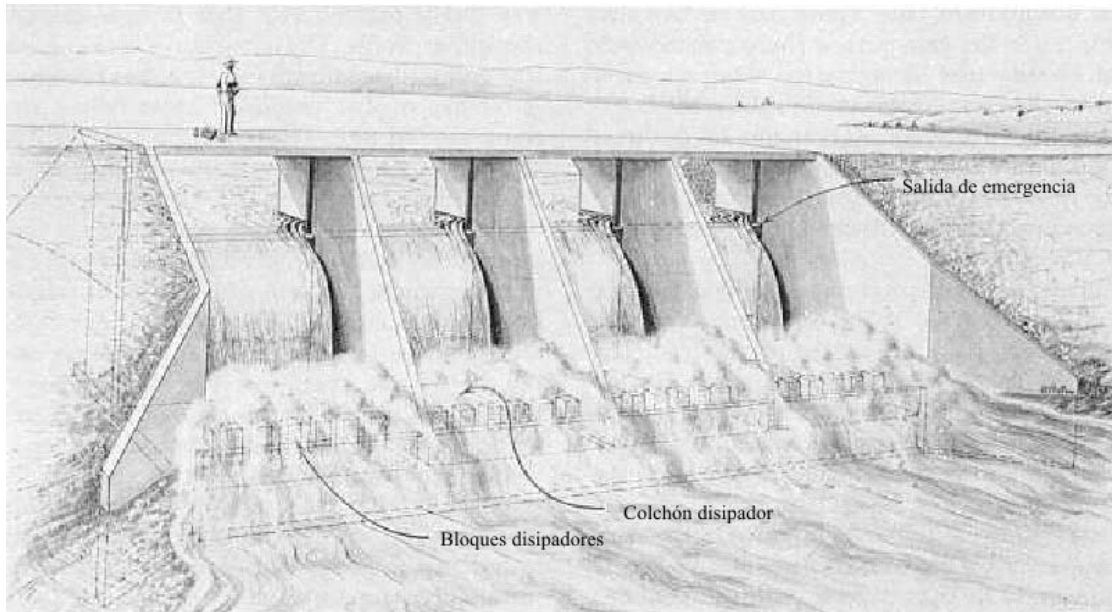


Figura 5.1 Funcionamiento de un vertedero de excedencias

5.1 FUNCIONES DE LOS VERTEDEROS.

Los vertederos son estructuras que tienen aplicación muy extendida en todo tipo de sistemas hidráulicos y expresan una condición especial de movimiento no uniforme en un tramo con notoria diferencia de nivel. Un vertedero puede tener las siguientes funciones¹:

1. Lograr que el nivel de agua en una obra de toma alcance el valor requerido para el funcionamiento de la misma.
2. Mantener un nivel casi constante aguas arriba de una obra de toma, permitiendo que el flujo sobre el coronamiento del vertedero se desarrolle con una lámina líquida de espesor limitado.
3. En una obra de toma, el vertedero de excedencias se constituye en el órgano de seguridad de mayor importancia, evacuando las aguas en exceso generadas durante los eventos de máximas crecidas.
4. Permitir el control del flujo en estructuras de caída, disipadores de energía, transiciones, estructuras de entrada y salida en alcantarillas de carreteras, sistemas de alcantarillado, etc.

La función de los vertederos de excedencia en las presas de almacenamiento y en las reguladoras es dejar escapar el agua excedente o de avenidas que no cabe en el espacio destinado para almacenamiento, y en las presas derivadoras dejar pasar los excedentes que no se envían al

¹ Pequeñas Obras Hidráulicas, Rogel Mattos Ruedas

sistema de derivación. Ordinariamente, los volúmenes en exceso se toman de la parte superior del embalse creado por la presa y se conducen por un conducto artificial de nuevo al río o hacia algún canal de drenaje natural.

La importancia que tiene un vertedero seguro no se puede exagerar; muchas fallas de las presas se han debido a vertederos mal proyectados o de capacidad insuficiente. La amplitud de la capacidad es de extraordinaria importancia en las presas de tierra y en las de enrocado, que tienen el riesgo de ser destruidas si son rebasadas; mientras que, las presas de concreto pueden soportar un rebasamiento moderado. Generalmente, el aumento en costo no es directamente proporcional al aumento de capacidad. Con frecuencia el costo de un vertedero de amplia capacidad es sólo un poco mayor que el de uno que evidentemente es muy pequeño.

Además de tener suficiente capacidad, el vertedero debe ser hidráulica y estructuralmente adecuado y debe estar localizado de manera que las descargas del vertedero no erosionen ni socaven el talón de aguas debajo de la presa. Las superficies que forman el canal de descarga del vertedero deben ser resistentes a las velocidades erosivas creadas por la caída desde la superficie del vaso a la del agua de descarga y, generalmente, es necesario algún medio para la disipación de la energía al pie de la caída.

La frecuencia del uso del vertedero la determinan las características del escurrimiento de la cuenca y la naturaleza del aprovechamiento. Ordinariamente, las avenidas se almacenan en el vaso, se derivan por las tomas o se descargan y no es necesario que funcione el vertedero. Las descargas por el vertedero se pueden producir durante las avenidas o periodos de escurrimiento elevado sostenido, cuando las capacidades de las demás salidas se exceden. Cuando la capacidad del vaso es grande o cuando las otras de descarga o de derivación son grandes, el vertedero se utilizará rara vez. En las presas derivadoras en las que el almacenamiento es limitado y los volúmenes derivados son relativamente pequeños, comparados con el gasto normal del río, el vertedero se usará casi constantemente.

5.2 ESTUDIOS Y MEDICIONES.

Las mediciones y datos requeridos para el diseño de vertederos dependen del nivel de diseño a ser considerado y las condiciones específicas que se encuentran en el sitio. Generalmente estos datos y mediciones son²:

1. Datos topográficos.
2. Datos climatológicos.
3. Datos hidrológicos.
4. Datos geológicos y sismológicos
5. Alcance y requerimientos del proyecto
6. Capacidad de control de avenidas
7. Datos hidráulicos.
8. Datos estructurales
9. Datos de calidad del agua
10. Requerimientos especiales.
11. Condiciones aguas abajo.

Los datos hidrológicos típicamente requeridos son:

1. Mediciones de escorrentía, descargas diarias, volúmenes mensuales, y picos momentáneos.

² Hydraulic Design of Spillways, U.S.A.C.E.

2. Estudio de crecidas, incluyendo la máxima crecida probable (PMF) y frecuencias específicas de crecida usadas para: establecer el nivel de la cresta de un vertedero auxiliar, en la evaluación de funcionamiento del vertedero, en el estudio de esquemas de desvío y para estudios de riesgos.
3. Datos del nivel de agua subterránea en las proximidades del reservorio y del sitio de presa
4. Mapas de las cuencas de inundación.
5. Curvas del tirante de agua a través de los rangos esperados de descarga. Estudios de sedimentación, erosión del canal, los efectos de obstrucción del canal aguas abajo, y los efectos de futuras construcciones aguas abajo.
6. Estudios de remansos, cuando las características localizadas aguas arriba del reservorio pueden ser afectadas por niveles de agua más altos que los que ocurren naturalmente. La deposición de sedimentos del reservorio debe de ser considerada en estos estudios.

Los datos de apoyo requeridos para el diseño hidráulico son:

1. Flujo que entra al reservorio - máxima crecida probable y a veces frecuencias de crecidas moderadas de 100 y 200 años de período de retorno, crecidas de diseño diferentes de la máxima crecida probable, de la esorrentía normal, de los canales de alimentación, y otros flujos entrantes controlados.
2. Asignaciones de almacenaje del reservorio.
3. Área y datos de capacidad del reservorio.
4. Datos de sedimentación en el reservorio incluyendo volumen y distribución.
5. Datos de basuras y otro en el reservorio.
6. Factores climáticos.
7. Requerimientos y limitaciones del nivel de agua del reservorio
8. Problemas anticipados de hielo
9. Análisis de flujo en canales abiertos – perfiles de flujo, curvas de remanso, curvas del tirante de flujo.
10. Requerimientos del río aguas abajo
11. Proyectar los requisitos y limitaciones que implican los vertederos.
12. Estudio de operación del reservorio (incluyendo curvas de regulación y otros datos relacionados)

5.3 PARTES QUE CONFORMAN UN VERTEDERO.

Los principales componentes de los vertederos son los siguientes:

5.3.1 La Estructura de Control.

Uno de los componentes de un vertedero es la estructura de control, porque regula y gobierna las descargas del vaso. Este control limita o evita las descargas cuando el nivel del vaso alcanza niveles mayores a los ya fijados. La estructura de control puede consistir en una cresta, vertedero, orificio, boquilla o tubo.

Las estructuras de control pueden tomar varias formas tanto en su posición como en su figura. En planta los vertederos pueden ser rectos, curvos, semicirculares, en forma de U o redondos.

5.3.2 Canal de Descarga.

Los volúmenes descargados por la estructura de control generalmente se conducen al cauce, debajo de la presa, por un canal de descarga. Las excepciones se presentan cuando se hace

libremente la descarga de la cresta de una presa del tipo de arco, o cuando se envía directamente por la falda para que forme una cascada en la misma. La estructura de conducción puede ser el paramento de aguas debajo de una presa de concreto, un canal abierto excavado a lo largo de la superficie del terreno, un canal cubierto colocado a través o debajo de la presa, o un túnel excavado en una de las laderas. El perfil puede tener tramos con poca pendiente o muy inclinados; la sección transversal puede variar de rectangular a trapezoidal, circular, o ser cualquier otra forma; y el canal de descarga puede ser ancho o angosto, largo o corto.

Los canales de descarga deben excavarse en material resistente o revestirse con uno que lo sea al efecto erosivo de las grandes velocidades, y que sea estructuralmente adecuado para soportar las fuerzas producidas por rellenos, subpresión, cargas producidas por el peso del agua, etc.

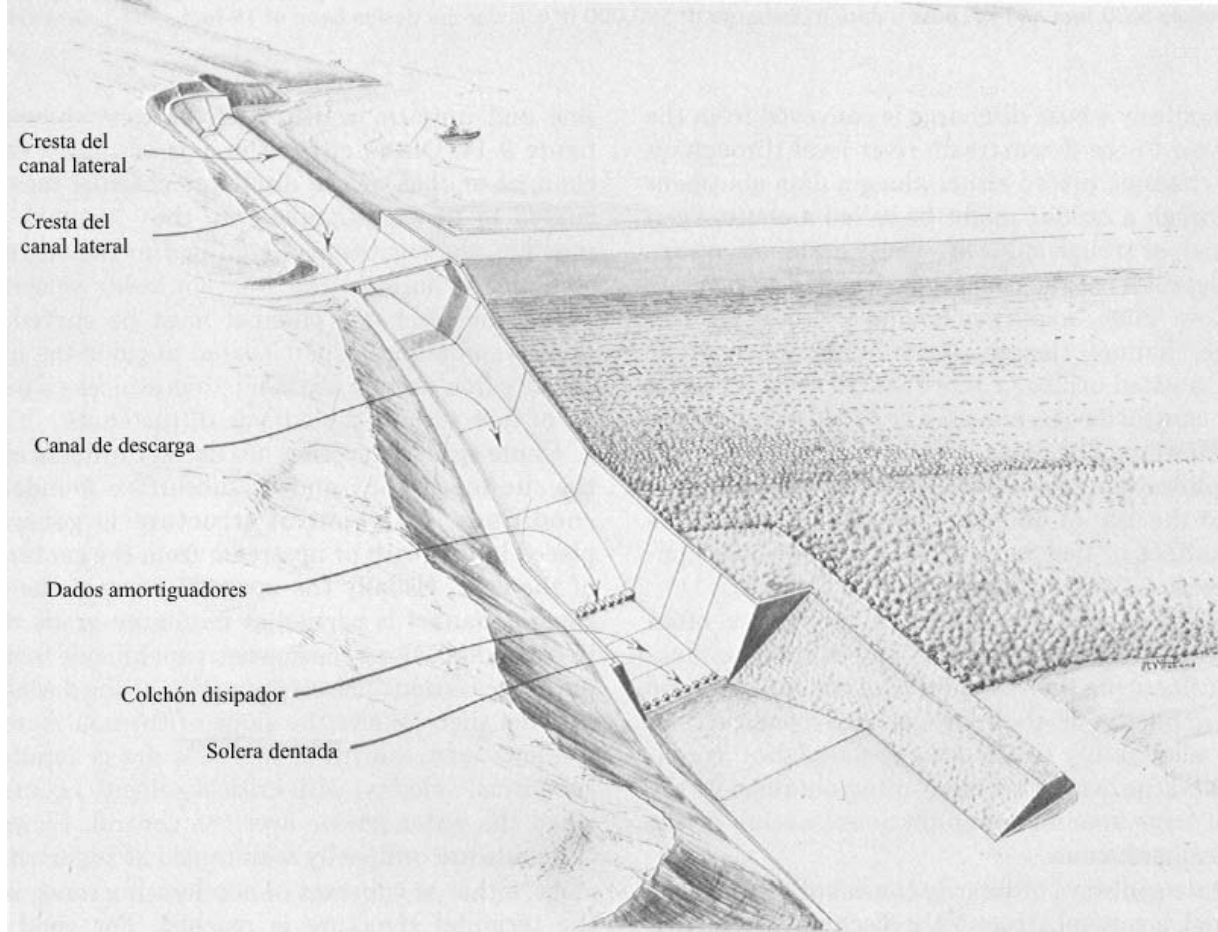


Figura 5.2 Principales componentes de un vertedero lateral de excedencias

5.3.3 Estructura Terminal.

Cuando el agua que pasa por el vertedero de excedencias cae del nivel del embalse del vaso al nivel del río aguas abajo, la carga estática se convierte en energía cinética. Esta energía se manifiesta en la forma de altas velocidades que si se trata de disminuirlas producen grandes presiones. Por lo tanto, generalmente deben disponerse medios que permitan descargar el agua en el río sin erosiones o socavaciones peligrosas en el talón de la presa y que no produzcan daños en las estructuras adyacentes.

En algunos casos, la descarga se puede hacer a altas velocidades directamente en la corriente en la que se absorbe la energía a lo largo del cauce por impacto, turbulencia y rozamientos. Este método es satisfactorio cuando existe roca firme con tirantes de poca profundidad en el canal y a lo largo de las laderas o donde la salida del vertedero está suficientemente alejada de la presa o de otras estructuras auxiliares para evitar daños por socavación, arrastre o reblandecimiento de las laderas.

Cuando se quieren evitar erosiones intensas en el cauce, se debe disipar la gran energía de la corriente antes de descargarla al cauce del río. Lo que se puede efectuar usando un dispositivo para disipar la energía, como estanques para la formación del resalto, un trampolín sumergido, un lavadero con dados, una fosa de deflectores amortiguadores y muros, o algún amortiguador o dissipador de energía.

5.3.4 Canales de Llegada y Descarga.

Los canales de llegada sirven para captar el agua del vaso y conducirla a la estructura de control. Cuando el agua entra directamente del vaso al vertedero y cae al río, como en el caso de un vertedero colocado sobre una presa de concreto, no son necesarios ni los canales de llegada ni los de descarga. Sin embargo, en el caso de vertederos colocados en las laderas en que se apoya la presa, pueden ser necesarios canales que lleven el agua al control del vertedero y para alejar el agua de su estructura terminal.

Los canales de descarga conducen el agua que pasa por la estructura terminal al cauce del río abajo de la presa. En algunos casos solamente se construye un canal piloto, haciendo la suposición que por arrastre se ampliará la sección durante los mayores caudales. Las dimensiones del canal de descarga y la necesidad de protegerlo con revestimientos o enrocados, depende de la posibilidad de erosionarse. Aunque se construyan estructuras amortiguadoras, puede ser imposible reducir las velocidades resultantes por debajo de la velocidad natural en la corriente original y, por lo tanto, no se podrá evitar que se produzca algo de erosión en el cauce.

5.4 CLASIFICACIÓN.

En general hay dos tipos de vertederos, los de pared delgada (de aforo) y gruesa. Los vertederos de pared delgada se usan básicamente para determinar el caudal en cualquier momento en una corriente pequeña (ver Capítulo 3). Los vertederos de pared gruesa se usan principalmente para control de excedencias, y su evacuación puede ser libre o controlada. Los vertederos también pueden ser clasificados de acuerdo a su función³ en:

- a.) Los vertederos de servicio (ver Figura 5.1) son diseñados para un uso frecuente de conducción de flujo en condiciones normales y crecidas, liberadas del reservorio hacia aguas debajo de la presa.
- b.) Los vertederos auxiliares son diseñados para un uso menos frecuente y pueden aceptar daños limitados cuando son usados.
- c.) Los vertederos de emergencia están diseñados para protección adicional en caso de rebalse de una presa, son usados bajo condiciones extremas, tales como fallas del vertedero de servicio u otras condiciones de emergencia.

³ Spillway Design and Construction, R. B. Jansen

Es común que algunos diseñadores no hagan ninguna distinción entre vertederos auxiliares y de emergencia.

Los vertederos de excedencias generalmente se clasifican de acuerdo a sus características más importantes, ya sea con respecto al sistema de control, al canal de descarga, o a otro componente. Con frecuencia los vertederos se clasifican en controlados o sin control, según si tienen o no compuertas. Comúnmente se clasifican como tipos los de descarga libre (caída recta), de cimacio (derrame), de canal lateral, de canal abierto (de poca o de mucha pendiente), de conducto de túnel, de boca de caída (de pozo o de embudo), de alcantarilla y de sifón.

5.5 SECCIÓN TRANSVERSAL DE LAS CRESTAS DE VERTEDEROS SIN CONTROLES

Según la U.S.B.R. las secciones de las crestas cuya forma se aproxima a la superficie inferior de la lámina que sale por un vertedero, constituye la forma ideal para obtener óptimas descargas. La forma de esta sección depende de la carga, de la inclinación del paramento de aguas arriba de la sección vertederoa sobre el piso del canal de llegada (que influye en la velocidad de llegada a la cresta), 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 vertederoas. Para la mayor parte de las condiciones los datos se pueden resumir de acuerdo con la forma mostrada en la Figura 5.3 (a), relacionada a los ejes que pasan por la cima de la cresta. La porción que queda aguas arriba del origen se define como una curva simple y una tangente o como una curva circular compuesta. La porción de aguas abajo esta definida por la ecuación:

$$\frac{y}{H_0} = -K \cdot \left(\frac{x}{H_0} \right)^n \quad (5-1)$$

En la que K y n, son constantes, cuyos valores dependen de la inclinación de aguas arriba y de la velocidad de llegada. La Figura 5.3 proporciona valores de estas constantes para diferentes condiciones. La forma aproximada de la sección para una cresta con paramento de aguas arriba vertical y velocidad de llegada despreciable, se muestra en la Figura 5.4. La sección está construida como una curva circular compuesta con los radios expresados en función de la carga de proyecto, H_0 . Esta definición es más sencilla mostrada en la Figura 5.4, porque elimina la necesidad de resolver una ecuación exponencial; además se representa en una forma que puede ser usada por personas inexpertas en la construcción de moldes o plantillas. Para las condiciones ordinarias de proyecto de los vertederos de excedencias pequeños, y cuando la altura de llegada, P, es igual a o mayor que la mitad de la carga máxima sobre la cresta, esta sección es suficientemente precisa para evitar presiones muy reducidas en la cresta y no altera en forma importante la eficiencia hidráulica de la cresta. Cuando la altura de llegada es menor que la mitad de la carga máxima sobre la cresta, la sección debe determinarse conforme la Figura 5.4.

5.6 DESCARGA SOBRE UNA CRESTA DE VERTEDERO SIN CONTROLES.

La descarga sobre una cresta de vertedero se obtiene por medio de la fórmula:

$$Q = C \cdot L \cdot H_e^{3/2} \quad (5-2)$$

En la que:

Q = descarga.

C = un coeficiente de descarga variable.

L = longitud efectiva de la cresta.

H_e = carga total sobre la cresta, incluyendo la carga correspondiente a la velocidad de llegada, h_e .

En el coeficiente de descarga, influyen numerosos factores como: (1) la profundidad de llegada, (2) la relación de la forma real de la cresta a la de la lámina ideal, (3) pendiente del paramento aguas arriba, (4) interferencia de lavadero de aguas abajo y (5) el tirante de la corriente aguas abajo. En la sección 5.7 se discuten estos diferentes factores.

En la carga total sobre la cresta, H_e , no se toman en cuenta las pérdidas por rozamientos en el canal de llegada ni otras debidas a la curvatura del canal aguas arriba, las pérdidas al pasar por la sección de entrada, ni las pérdidas en la entrada o en la transición. Cuando en el proyecto del canal de llegada se producen pérdidas importantes, deben añadirse a H_e para determinar las elevaciones correspondientes a las descargas dadas por la ecuación anterior.

Pruebas en modelos sobre los vertederos han demostrado que el efecto en la velocidad de aproximación es insignificante cuando la altura h del vertedero es mayor que $1.33 H_d$, donde H_d es la altura de diseño excluida la altura de velocidad de aproximación. En estas condiciones y con la altura de diseño (es decir h/H_d mayor que 1.33 y $H_e=H_d$, para lo cual la altura de velocidad de aproximación es insignificante) el coeficiente de descarga C es $C_d=4.03$.

5.6.1 Efecto que producen las Pilas y los Estribos.

Cuando las pilas y los estribos de la cresta tienen una forma que produce contracciones laterales sobre la descarga, la longitud efectiva, L , será menor que la longitud neta de la cresta. El efecto de las contracciones en los extremos puede tomarse en cuenta reduciendo la longitud neta de la cresta como sigue:

$$L = L' - 2 \cdot (N \cdot K_p + K_a) \cdot H_e \quad (5-3)$$

en la que:

L = longitud efectiva de la cresta.

L' = longitud neta de la cresta.

N = número de pilas.

K_p = coeficiente de contracción de las pilas.

K_a = coeficiente de contracción de los estribos.

H_e = carga total sobre la cresta.

Al coeficiente de la contracción de las pilas, K_p , lo afectan la forma y ubicación del tajamar de las pilas, el espesor de las mismas, la carga hidráulica en relación a la del proyecto, y la velocidad de llegada. Para la carga de proyecto, H_e , se pueden suponer los coeficientes de contracción medios de las pilas, como en la Tabla 5.1.

Al coeficiente de contracción del estribo lo afecta la forma de éste, el ángulo entre el muro de llegada de aguas arriba y el eje de la corriente, la carga con relación a la del proyecto y la velocidad de llegada. En las condiciones de la carga de proyecto, H_e , se puede suponer que el promedio de los coeficientes son los de la Tabla 5.2.

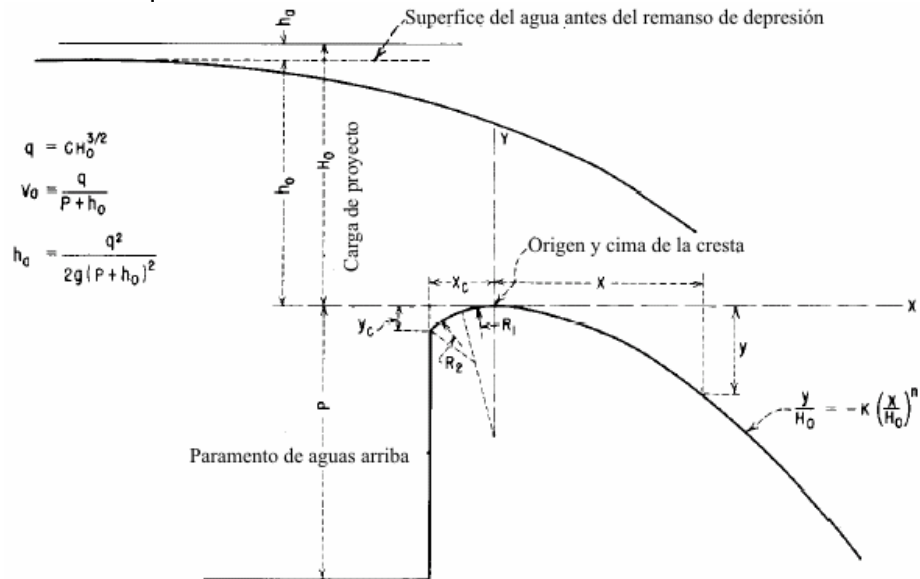
Forma	K_p
Para pilas de tajamar cuadrado con esquinas redondeadas con un radio aproximadamente de 0.1 del espesor de la pila	0.02
Para pilas de tajamar redondo	0.01
Para pilas de tajamar triangular	0

Tabla 5.1 Coeficientes de contracción de las pilas (USBR)

Forma	K_a
Para estribos cuadrados con los muros de cabeza a 90° con la dirección de la corriente.	0.20
Para estribos redondeados con muros de cabeza a 90° con la dirección de la corriente, cuando $0.15H_e \leq r \leq 0.5H_e$	0.10
Para estribos redondeados en los que $r > 0.5H_e$ y el muro de cabeza está colocado a no más de 45° con la dirección de la corriente	0

Tabla 5.2 Coeficientes de contracción de los estribos (USBR)

En las que r = radio con que se redondean los estribos.

**A. ELEMENTOS DE LAS SECCIONES DE LAS CRESTAS CON LA FORMA DE LA LÁMINA VERTIENTE**

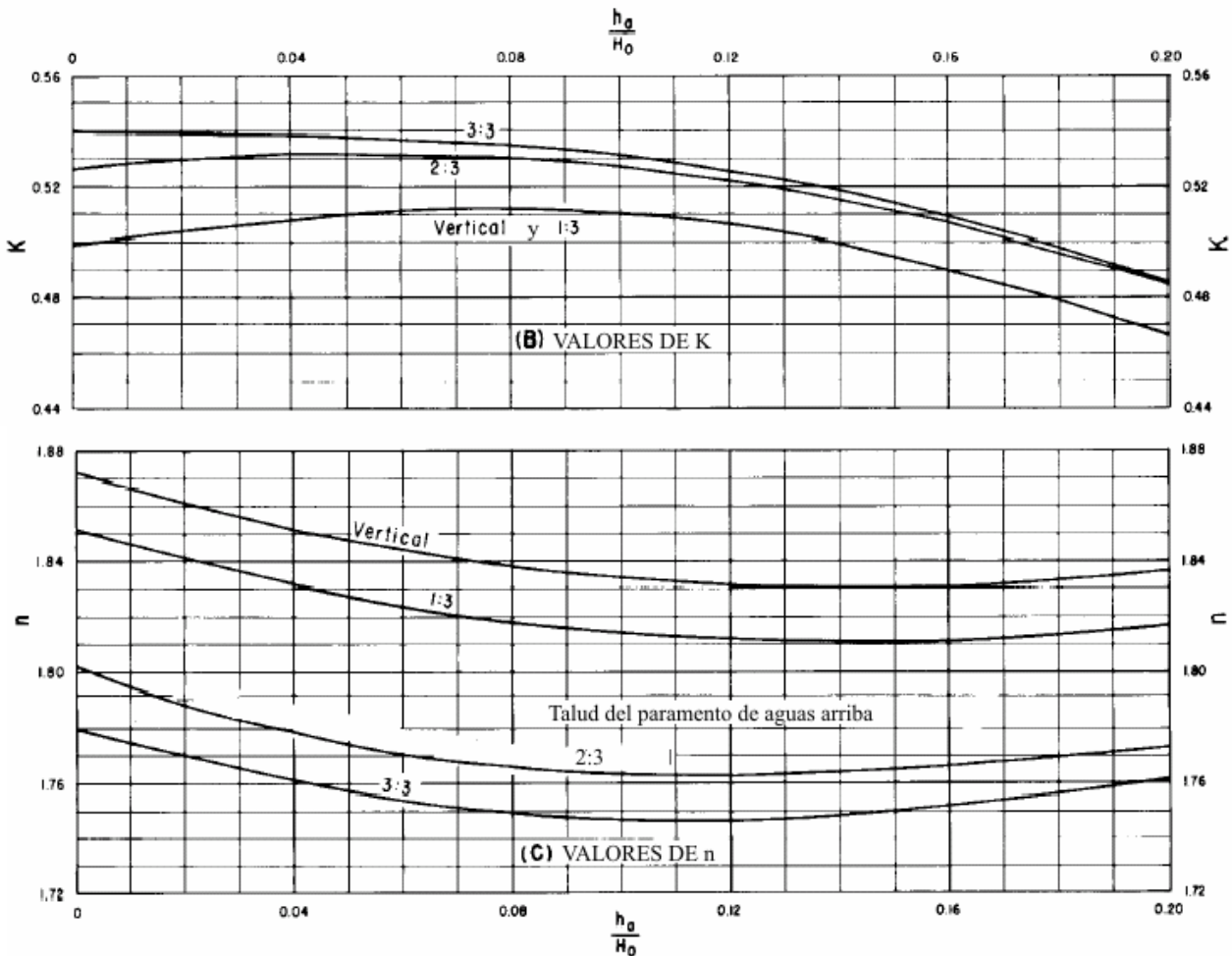


Figura 5.3 Factores para la determinación de las secciones con la forma de la lámina vertedora (hoja 1 de 2)

5.7 COEFICIENTE DE DESCARGA PARA CRESTAS DE VERTEDERO SIN CONTROL.

5.7.1 Efecto de la Profundidad de Llegada.

En los vertederos de cresta altos, colocados en un canal, la velocidad de llegada es pequeña y la superficie inferior de la lámina que vierte sobre el vertedero alcanza su máxima contracción vertical. Al disminuir la profundidad de llegada, la velocidad de llegada aumenta y la contracción vertical disminuye. En las crestas cuyas alturas no sean menores de, aproximadamente, un quinto de las cargas que producen la corriente sobre ellas, el coeficiente de descarga permanece más o menos constante, con un valor de 3.3, aunque la contracción disminuya. Para alturas de los vertederos menores de, aproximadamente, un quinto de la carga, la contracción disminuye. Cuando la altura del vertedero es cero, la contracción se suprime por completo y el vertedero se convierte en un canal o en un vertedero de cresta ancha, para los cuales el coeficiente de descarga es 3.087. Si los coeficientes para los vertederos en pared delgada se relacionan a las cargas medidas en el punto de máxima contracción en vez de la carga arriba de la cresta en pared delgada, se pueden establecer coeficientes que son aplicables a los vertederos de cresta bajo las láminas vertientes para diferentes velocidades de aproximación.

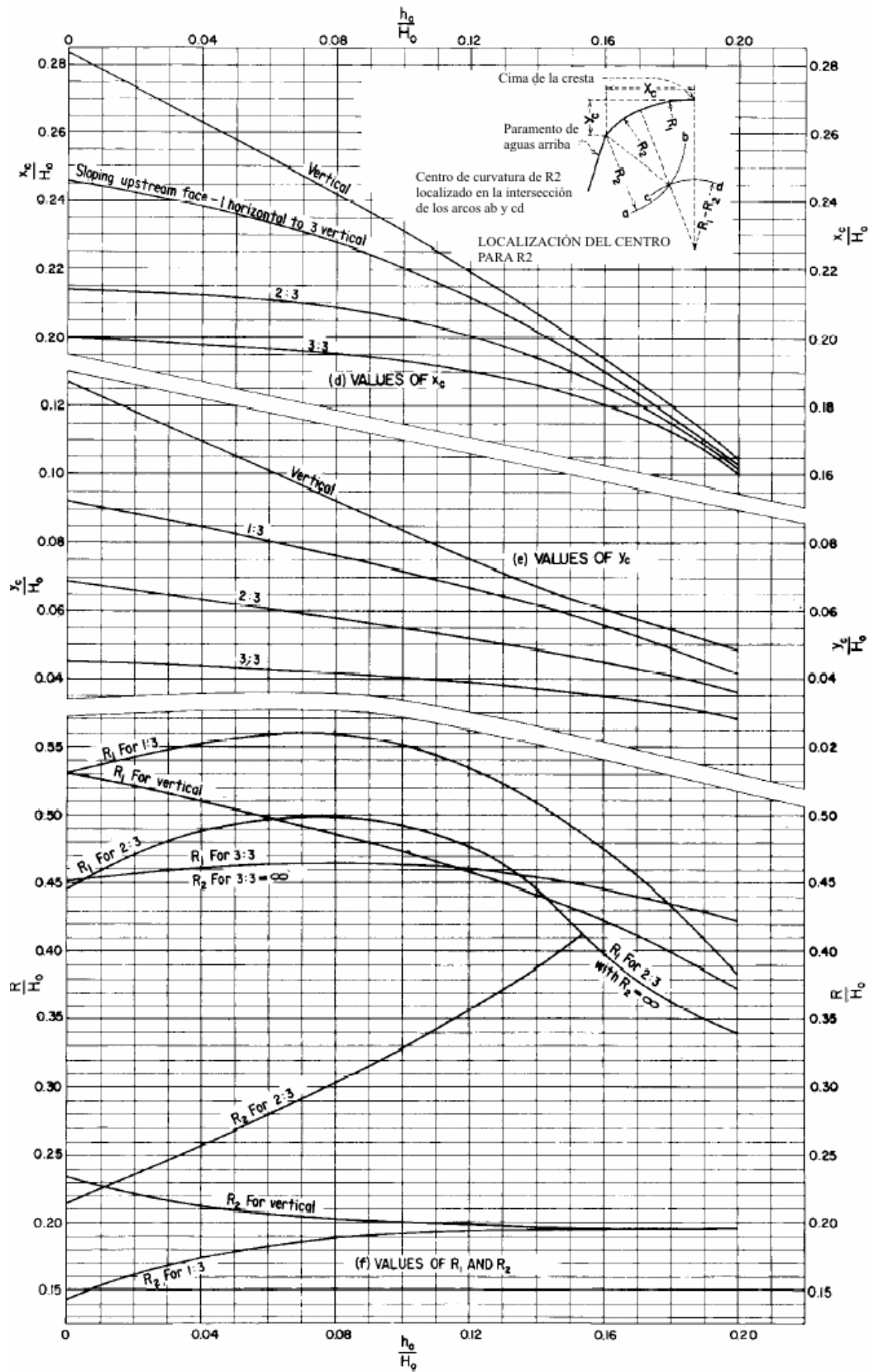


Figura 5.3 Factores para la determinación de las secciones con la forma de la lámina vertedora (hoja 2 de 2)

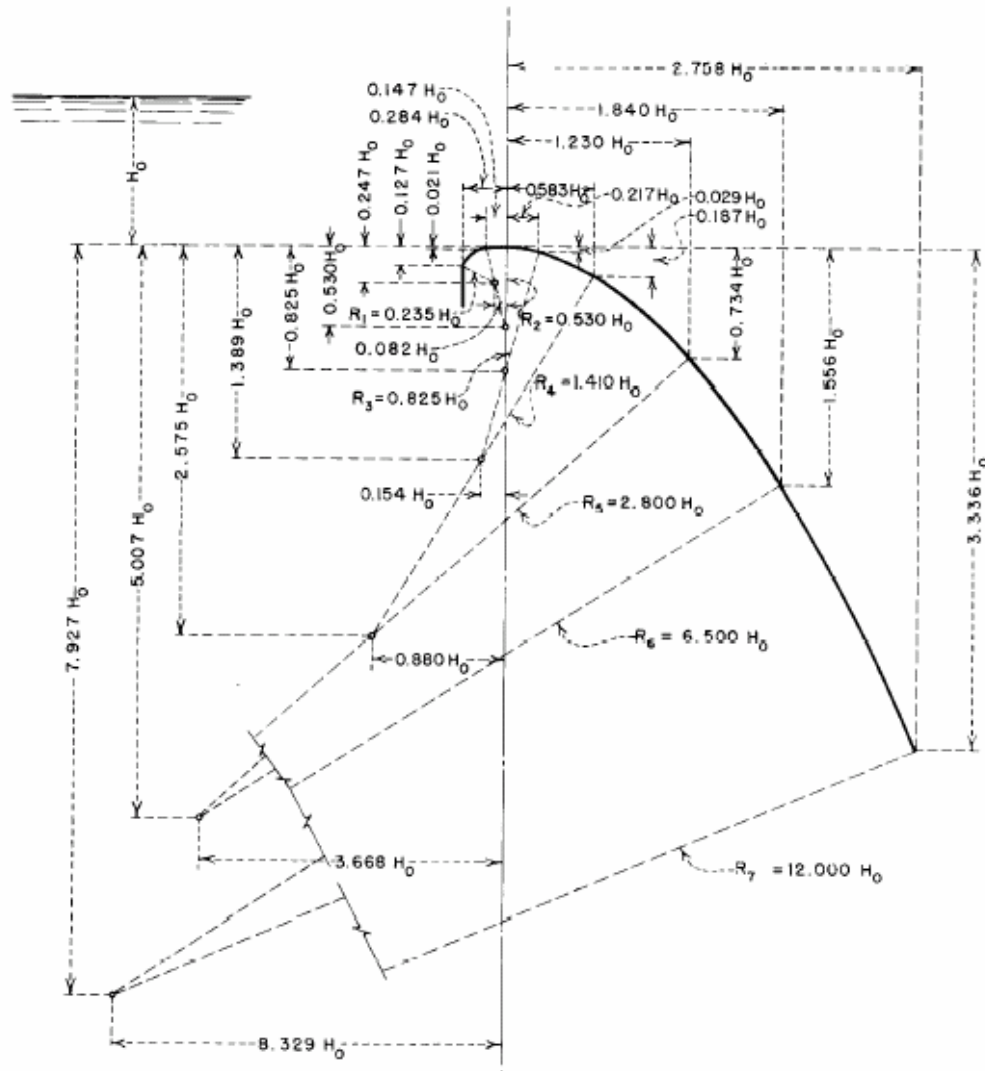


Figura 5.4 Sección de la cresta de vertedero formada con curvas compuestas

En la Figura 5.5 se dan las relaciones del coeficiente para las crestas de vertedero, C_0 , a los diferentes valores de $\frac{P}{H_0}$. Estos coeficientes son válidos solamente cuando la sección de la cresta

del vertedero sigue la forma ideal de la lámina vertiente, es decir, cuando $\frac{H_e}{H_0} = 1$.

5.7.1 Efecto de las Cargas Diferentes a la del Proyecto.

Cuando a la cresta de vertedero se le da una sección de forma diferente a la ideal, o cuando se le ha dado una forma para una carga mayor o menor que la que se considera, el coeficiente de descarga diferirá del mostrado en la Figura 5.5. Las secciones más anchas darán por resultado presiones positivas a lo largo de la superficie de contacto de la presa, reduciendo por lo tanto la descarga; con una sección más angosta, se producirán presiones negativas a lo largo de la superficie de contacto, aumentando la descarga. La Figura 5.6 muestra la variación de los coeficientes en relación con los valores de H_e/H_0 , cuando H_e es la carga que se está considerando.

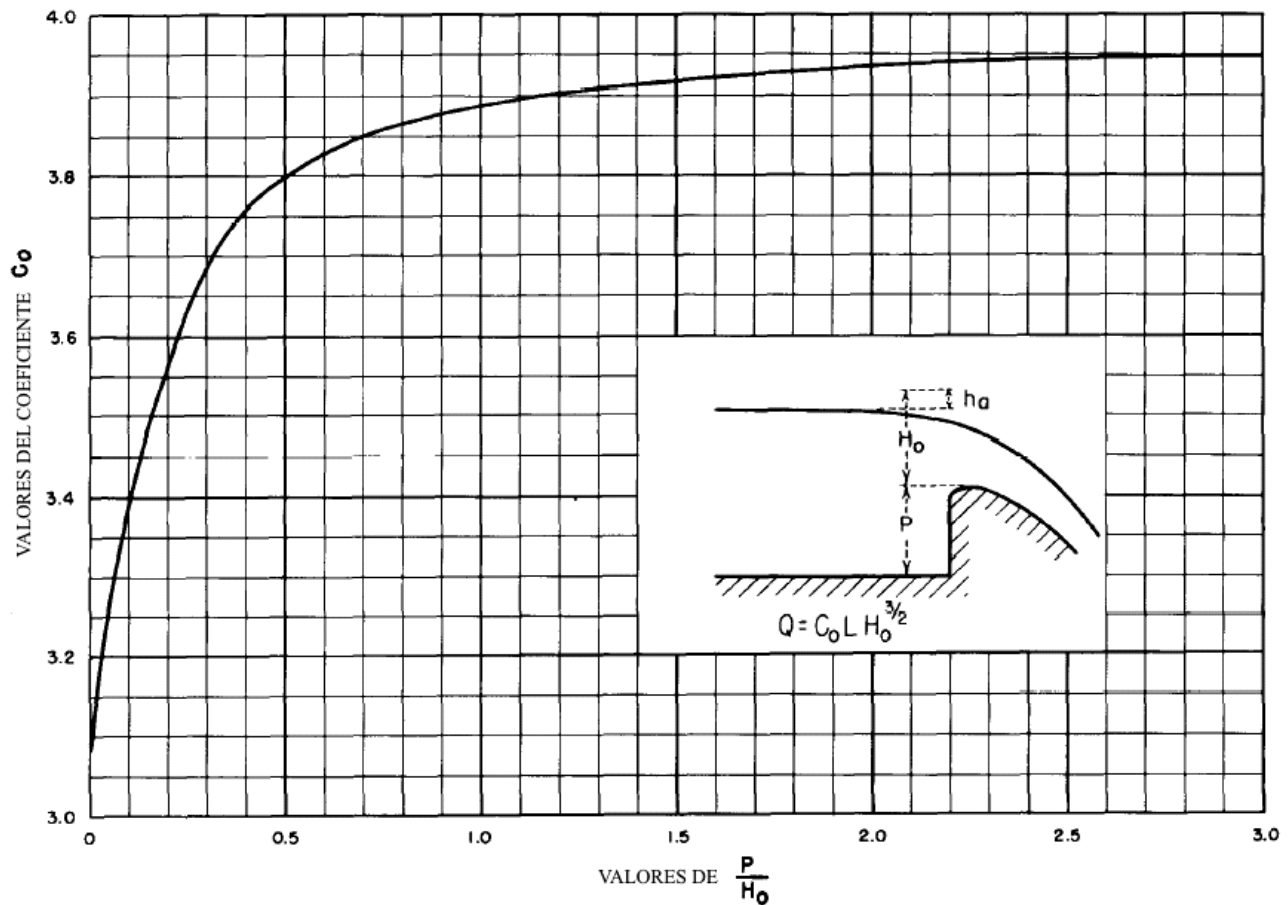


Figura 5.5 Coeficientes de descarga para las crestas de vertedero en pared vertical

El coeficiente de descarga aproximado para las crestas de forma irregular cuya sección no se haya construido ajustándose a la forma de la superficie inferior de la lámina vertiente, puede determinarse buscando una forma ideal que más se aproxime a ella. La carga de proyecto, H_e , correspondiente a la forma parecida se puede usar como base para determinar los coeficientes.

Los coeficientes para las cargas parciales sobre la cresta, para determinar las relaciones de carga-descarga, se pueden determinar de la Figura 5.6.

5.7.2 Efecto del Talud del Paramento de Aguas Arriba.

Para pequeñas relaciones de la profundidad de llegada a la carga sobre la cresta, la inclinación del paramento de aguas arriba antes de la cresta produce un aumento en el coeficiente de descarga. En las relaciones grandes el efecto es disminuir el coeficiente. Dentro de la variación considerada en este texto, el coeficiente de descarga se reduce con las relaciones grandes de P/H_0 solamente con los taludes relativamente pequeños. La Figura 5.7 muestra la relación del coeficiente para un vertedero con un paramento inclinado, al coeficiente de la cresta con paramento vertical del lado de aguas arriba como el que se obtuvo de la Figura 5.5 (y ajustado con la Figura 5.6 si es lo que procede), relacionada a los valores de P/H_0 .

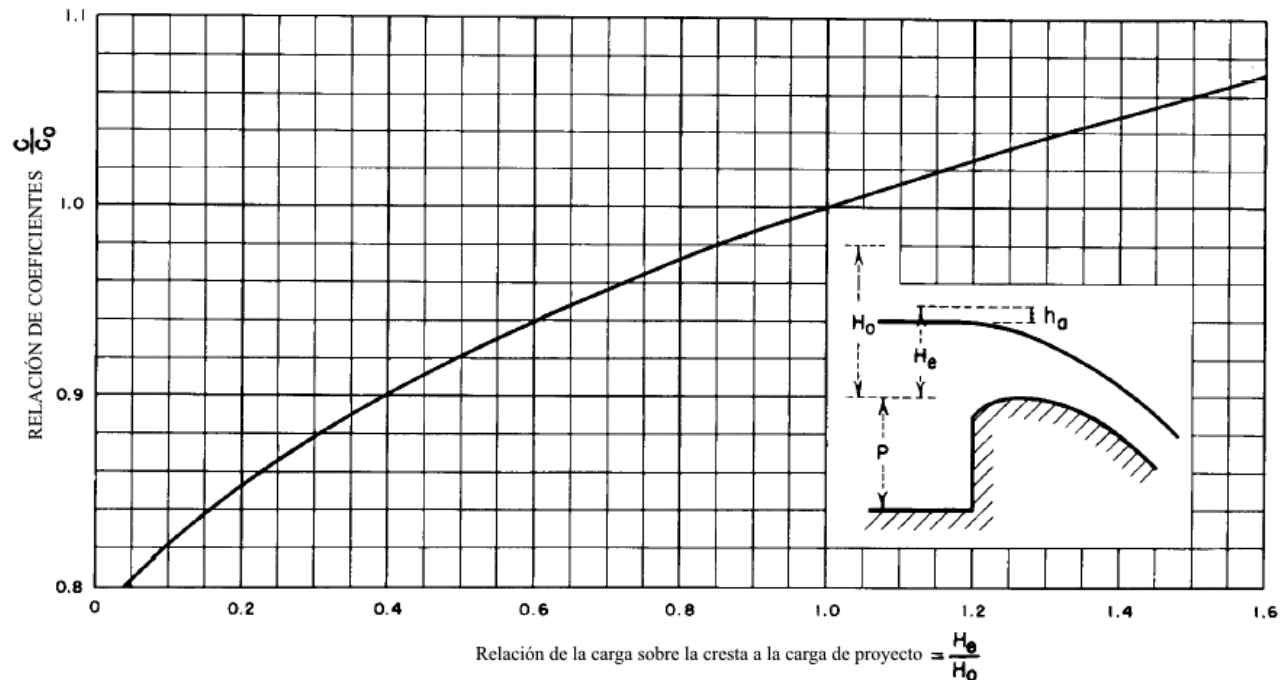


Figura 5.6 Coeficientes de descarga para cargas diferentes de la del proyecto

5.7.3 Efecto de la interferencia del lavadero de aguas abajo y de la sumergencia.

Cuando el nivel del agua abajo de un vertedero es lo suficientemente elevado para afectar la descarga, se dice que el vertedero es ahogado. La distancia vertical de la cresta del vertedero al lavadero de aguas abajo y el tirante de la corriente en el canal de aguas abajo, como están relacionados a la carga del vaso, son factores que alteran el coeficiente de descarga.

El flujo por un vertedero puede tomar 5 aspectos diferentes, según las posiciones relativas del lavadero y del nivel del agua de aguas abajo:

1. Continuar con régimen supercrítico.
2. Puede ocurrir un resalto hidráulico parcial o incompleto inmediatamente aguas abajo de la cresta.
3. Puede ocurrir un verdadero resalto hidráulico.
4. Puede ocurrir un resalto ahogado en el que el chorro de alta velocidad siga la forma de la lámina vertiente y luego continúe siguiendo una trayectoria errática y fluctuante debajo y a través del agua que se mueve más despacio.
5. No se forma resalto; la lámina vertiente se separa del paramento del vertedero cabalgando a lo largo de la superficie una corta distancia y luego erráticamente se mezcla con el agua que se mueve lentamente debajo. La Figura 5.8 muestra la relación entre las posiciones del piso y las sumergencias de aguas abajo que producen estos regímenes especiales.

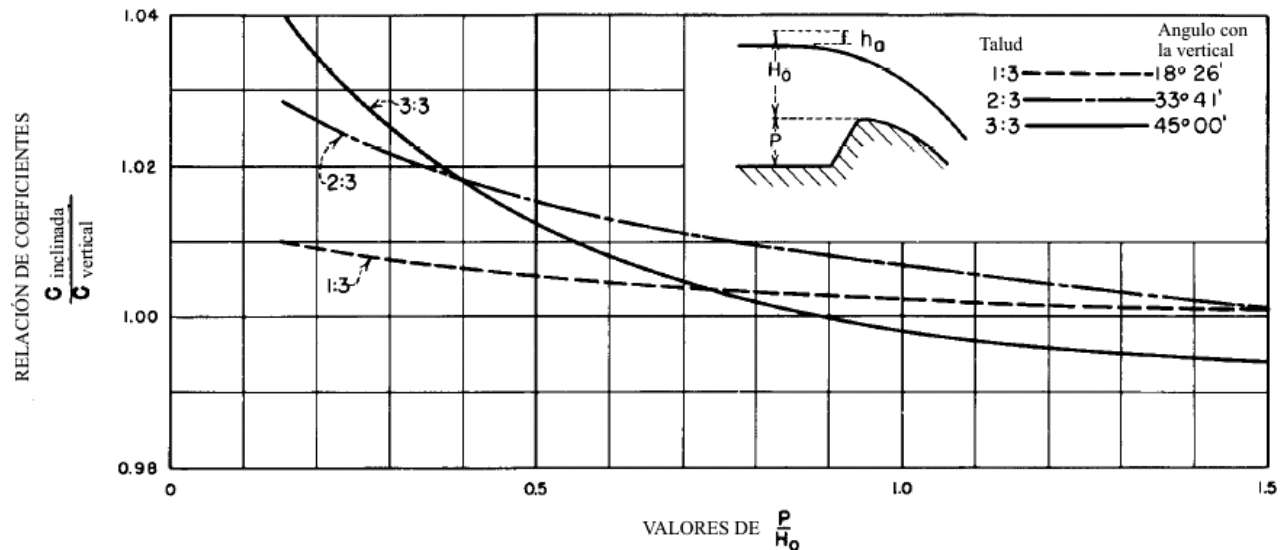


Figura 5.7 Coeficiente de descarga para una cresta de vertedero con paramento de aguas arriba inclinado

Cuando el régimen aguas abajo es supercrítico o cuando ocurre el resalto hidráulico, la reducción del coeficiente de descarga se debe principalmente a la contrapresión del lavadero de aguas abajo y es independiente de cualquier efecto de sumergencia debido al agua de la descarga. La Figura 5.9 muestra el efecto del lavadero de aguas abajo sobre el coeficiente de descarga. Se notará que en esta curva se hace la gráfica de los mismos datos representados por las líneas verticales de la Figura 5.8, en una forma ligeramente diferente. Al aproximarse el nivel del lavadero de aguas abajo de la cresta del vertedero ($\frac{h_d + d}{H_e}$ se aproxima a 1.0) el coeficiente de descarga es de,

aproximadamente, 77 % del que hubiera si la descarga fuera libre. Tomando como base que el coeficiente fuera de 4.0 para la descarga libre sobre un vertedero elevado, este sería de, aproximadamente, 3.08 cuando el vertedero está sumergido, que prácticamente es el coeficiente para un vertedero de cresta ancha. Se puede ver en la Figura 5.8, que cuando los valores de $\frac{h_d + d}{H_e}$ exceden de aproximadamente 1.7, la posición del piso de aguas abajo tiene poco efecto

en el coeficiente, pero hay una disminución del coeficiente producida por la sumergencia en el agua de descarga. La Figura 5.10 muestra la relación del coeficiente de descarga cuando está afectado por las condiciones del agua de descarga, al coeficiente cuando la descarga es libre. En esta curva se representan los datos que en la Figura 5.8 son los de las líneas de rayas horizontales, en forma ligeramente diferente. Cuando las líneas son curvas en la Figura 5.8, la disminución del coeficiente es el resultado de una combinación de los efectos del agua de descarga y de la posición del lavadero aguas abajo.

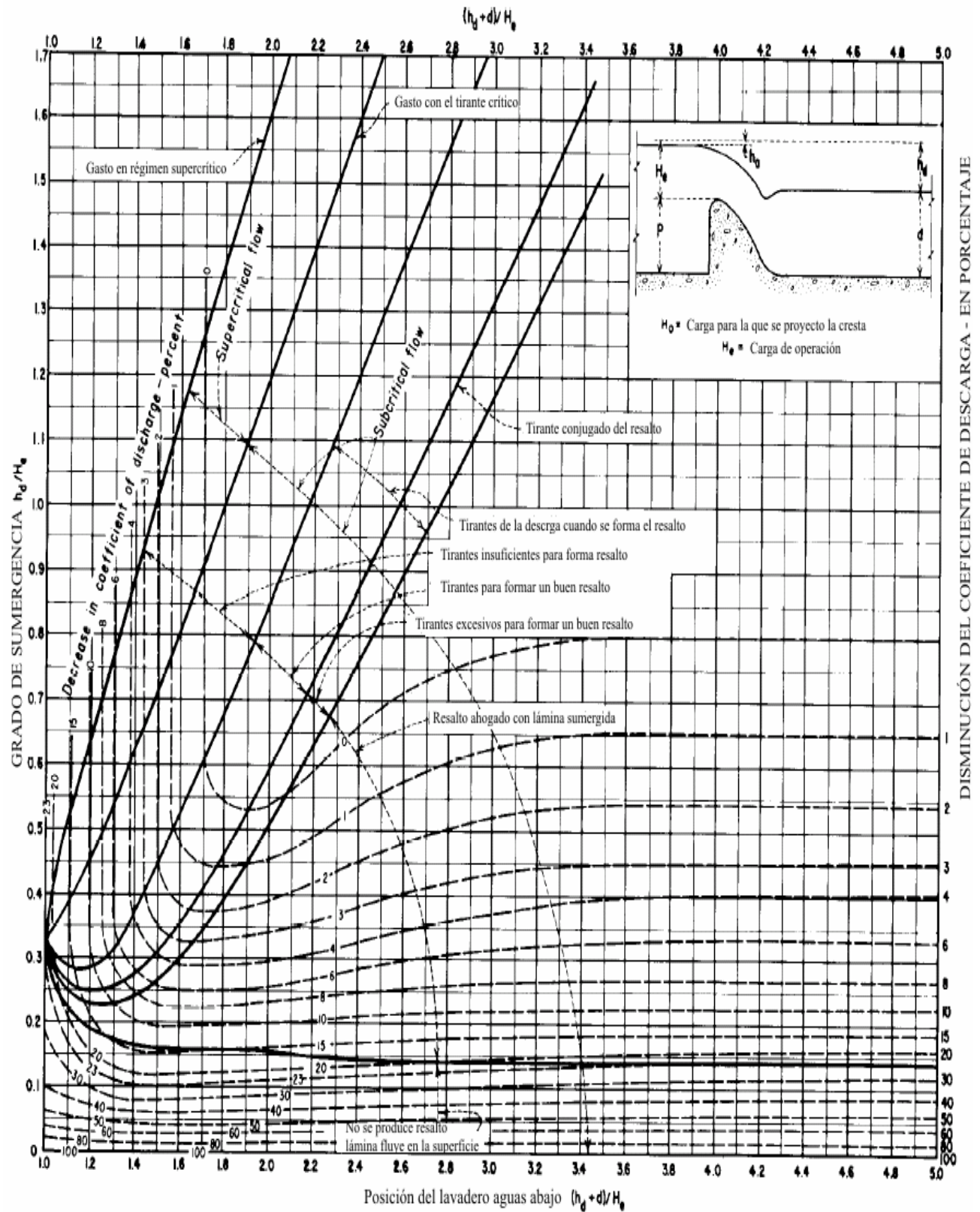


Figura 5.8 Efectos de los factores de aguas abajo en la capacidad de los vertederos

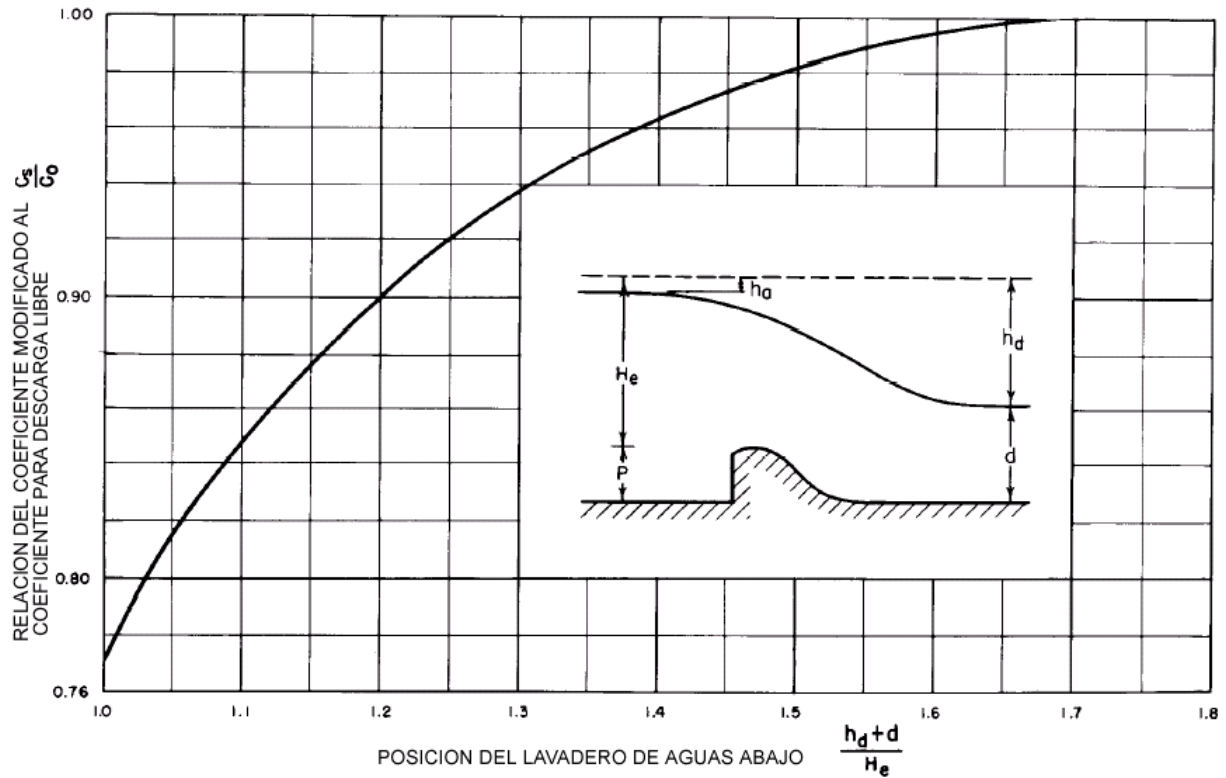


Figura 5.9 Relación de los coeficientes de descarga debida al efecto del lavadero

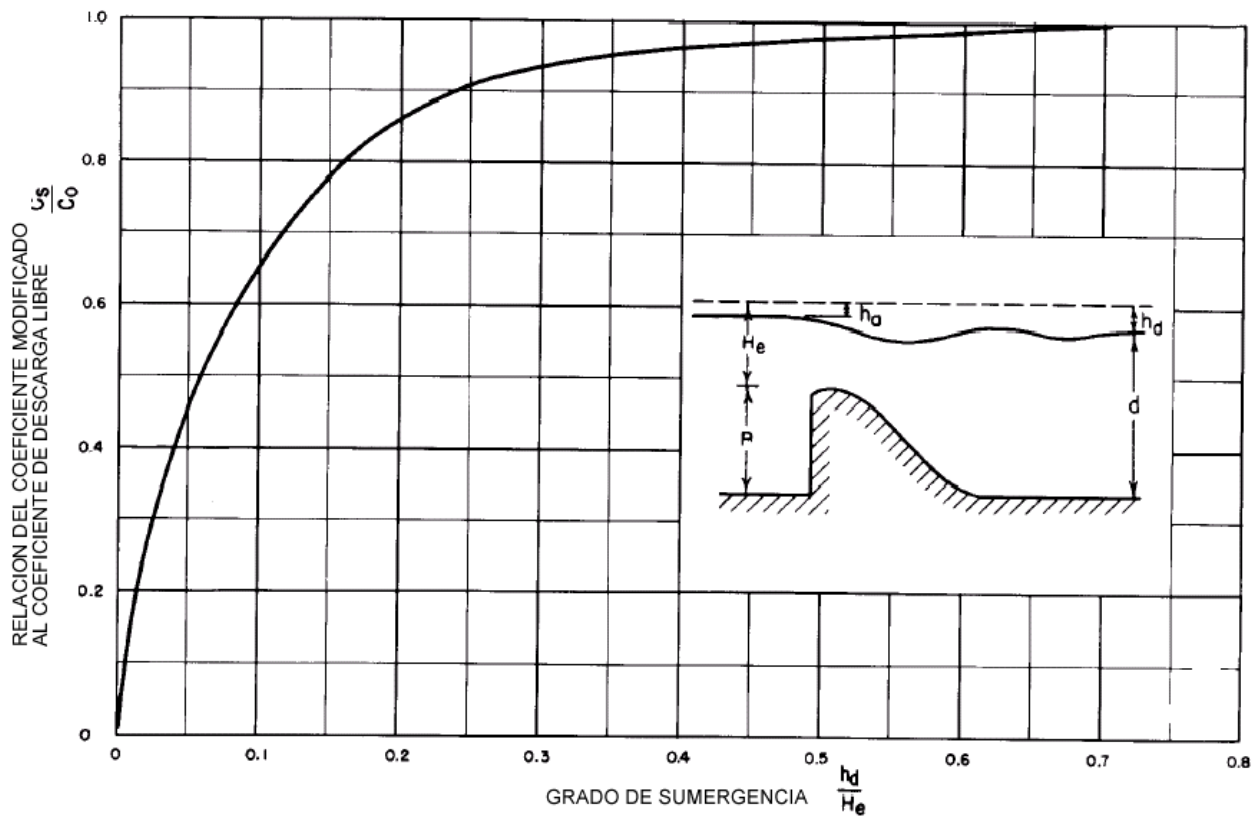


Figura 5.10 Relación de coeficientes de descarga debida al efecto del agua de la descarga

5.8 VERTEDEROS DE CIMACIO SIN CONTROL PROYECTADOS PARA CARGAS MENORES QUE LA MÁXIMA.

La economía en el proyecto de una cresta de cimacio se puede obtener algunas veces usando una carga de proyecto menor que la prevista. Usando una carga de proyecto menor, se obtienen descargas mayores para la variación completa de cargas. El aumento de capacidad permite obtener economías, ya sea por la reducción de la longitud de la cresta o en la carga máxima de sobrecarga.

Las pruebas han demostrado que las presiones menores que la atmosférica sobre una cresta que tiene la forma que toma libremente la lamina vertiente, no excede de, aproximadamente, la mitad de la carga de proyecto, cuando esta no es menor de, mas o menos, el 75% de la carga máxima. En la mayor parte de las condiciones de proyecto de los vertederos pequeños, estas 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 estas presiones negativas, porque las irregularidades producidas por salientes bruscos, depresiones o 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 los vertederos.

En la Figura 5.11 se muestra un diagrama aproximado de las fuerzas de las presiones subatmosfericas, cuando la carga de proyecto usada para determinar la forma de la cresta es de 75% de la carga máxima. Estos datos se obtuvieron del promedio del resultado de pruebas efectuadas en vertederos de forma ideal con velocidades de llegada despreciables. Se puede suponer, para relaciones de presiones de cargas intermedias, que varían en forma lineal, considerando que no se producen presiones subatmosfericas cuando H_0/H_e es igual a 1.

5.9 CRESTAS DE CIMACIO CONTROLADAS POR COMPUERTAS.

Cuando las compuertas de los vertederos están abiertas parcialmente funcionaran como orificios. Con toda la carga sobre la compuerta, y esta solo 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:

$$-y = \frac{x^2}{4H} \quad (5-4)$$

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

$$-y = x \tan \phi + \frac{x^2}{4H \cos^2 \phi} \quad (5-5)$$

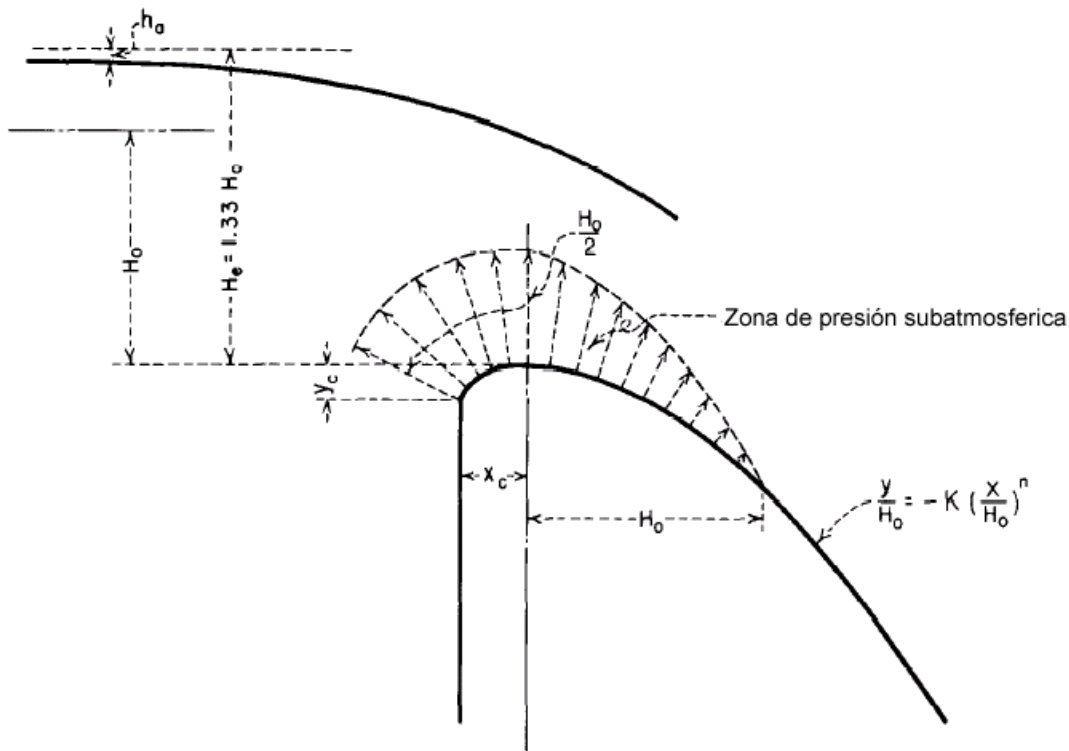


Figura 5.11 Presiones subatmosféricas en la cresta para $H_0/H_c=0.75$

Si se quieren evitar las presiones subatmosféricas a lo largo del contacto con la cresta, la sección del cimacio aguas debajo 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 debajo 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 esta condición se muestra en la Figura 5.12.

La adopción del perfil de la trayectoria de un chorro en vez de la lámina vertiente de aguas abajo del umbral de la compuerta, da por resultado un cimacio más ancho y una disminución 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 da la forma ideal de la lámina vertiente para la carga máxima, el área de presiones subatmosféricas se puede disminuir colocando el umbral de la compuerta aguas debajo de la cresta del cimacio. En esta 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.

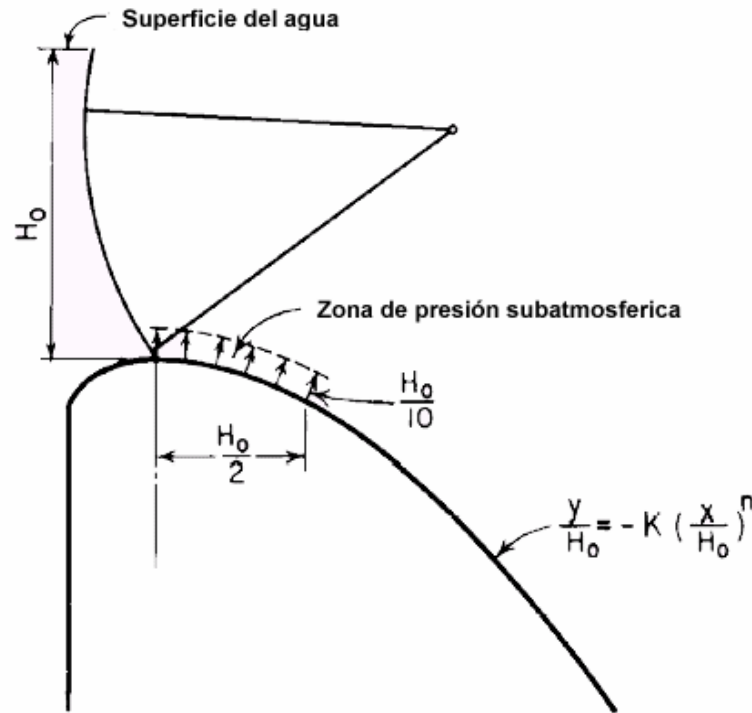


Figura. 5.12 Presiones subatmosféricas que se producen en las descargas debajo de las compuertas

5.10 DESCARGA POR VERTEDEROS DE CIMACIO CONTROLADOS POR COMPUERTAS.

La descarga por un vertedero con compuertas, cuando las compuertas están abiertas parcialmente, será semejante a la de un orificio con poca carga y se puede calcular con la ecuación:

$$Q = \frac{2}{3} \sqrt{2g} CL (H_1^{3/2} - H_2^{3/2}) \quad (5-6)$$

En la que H_1 y H_2 son las cargas totales (incluyendo la carga de velocidad de llegada) en el fondo y en la parte superior del orificio, respectivamente. El coeficiente, C , diferirá con las distintas combinaciones de compuertas y cresta; en las que influyen las condiciones de llegada y de aguas abajo por afectar la contracción del chorro. Así, la contracción en la parte superior de la abertura en una compuerta deslizante vertical será diferente de la de una compuerta curva, inclinada radial; el perfil del piso de aguas arriba afectará la contracción del fondo del chorro que sale; y el perfil de aguas abajo afectará la contrapresión y en consecuencia la carga efectiva. La Figura 5.13 muestra los coeficientes de descarga para varias relaciones de aberturas de la compuerta a la carga total. La curva representa promedios determinados para diferentes condiciones de llegada y de aguas abajo descritas y es suficientemente segura para determinar las descargas de los vertederos pequeños.

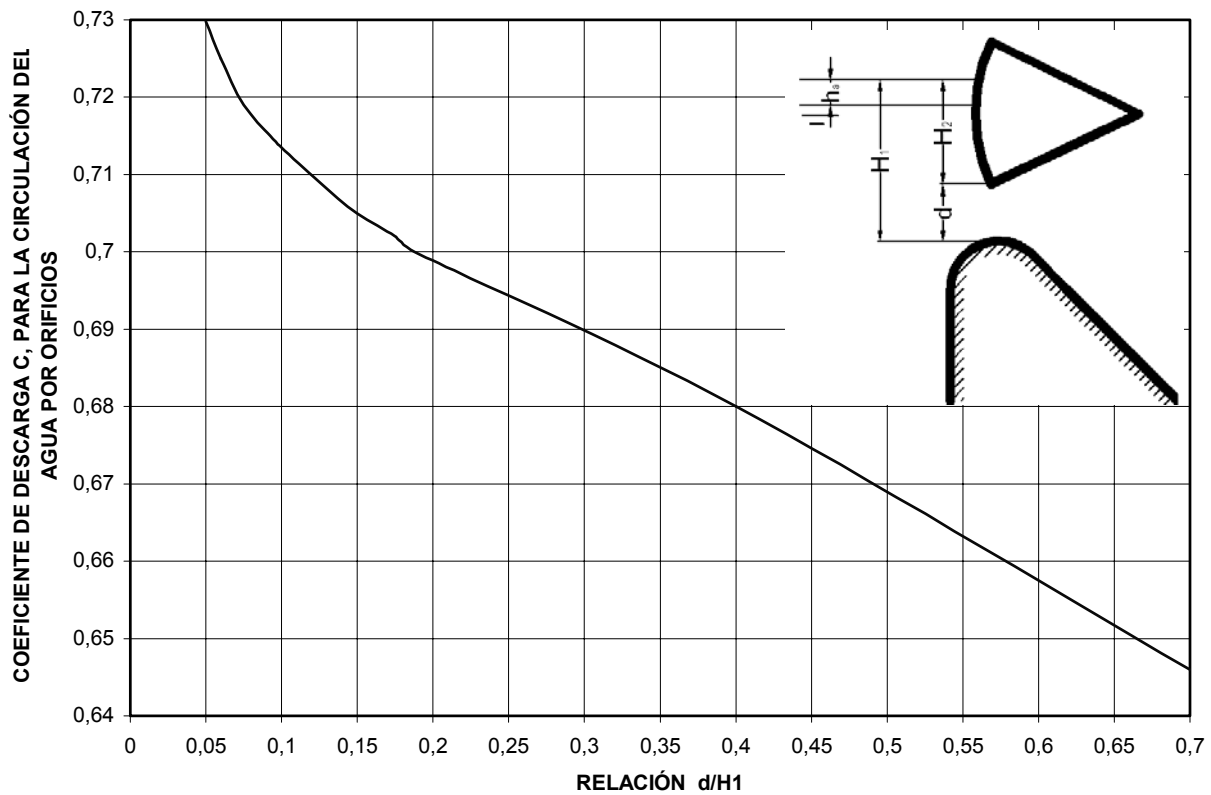


Figura 5.13 Coeficiente de descarga para la circulación del agua bajo las compuertas

5.11 FLUJO A LA SALIDA DE VERTEDEROS DE EXCEDENCIAS.

La velocidad de flujo teórica a la salida de un vertedero de rebose (Figura 5.14) puede calcularse mediante:

$$V_1 = \sqrt{2g(Z + H_a - h_{ab})} \quad (5-7)$$

Dónde Z es la caída o distancia vertical en pies desde el nivel del embalse aguas arriba hasta el nivel del piso en la salida; H_a es la altura de velocidad de aproximación aguas arriba; y h_{ab} es la profundidad de flujo a la salida. Debido a la pérdida de energía involucrada en el flujo sobre el vertedero, la velocidad real es siempre menor que el valor teórico. La magnitud de la velocidad real depende sobre todo de la altura sobre la cresta del vertedero, la caída, la pendiente y la rugosidad sobre la superficie del vertedero⁴. Mediante rozamiento y experimentos se demuestra que la desviación de la velocidad real con respecto a su valor teórico se vuelve mayor cuando la altura es menor y cuando la caída es mayor.

Con base en la experiencia, en análisis teóricos y en una cantidad limitada de información experimental obtenida en pruebas sobre prototipos, el U.S. Bureau of Reclamation estudió la

⁴ Robert B. Jansen, "Flow characteristics on the Ogee Spillway", artículo 1452, Diciembre de 1957

relación entre la velocidad real y su valor teórico. A partir de los resultados de este estudio se preparó una gráfica (Figura 5.14) para mostrar la velocidad real a la salida de vertederos en diferentes alturas, caídas, pendientes de 1 en 0.6 hasta 1 en 0.8, y condiciones de la rugosidad superficial promedio. Se considera que esta gráfica es suficientemente acertada para propósitos de diseño preliminar, a pesar de que puede mejorarse mediante información experimental adicional disponible en el futuro.

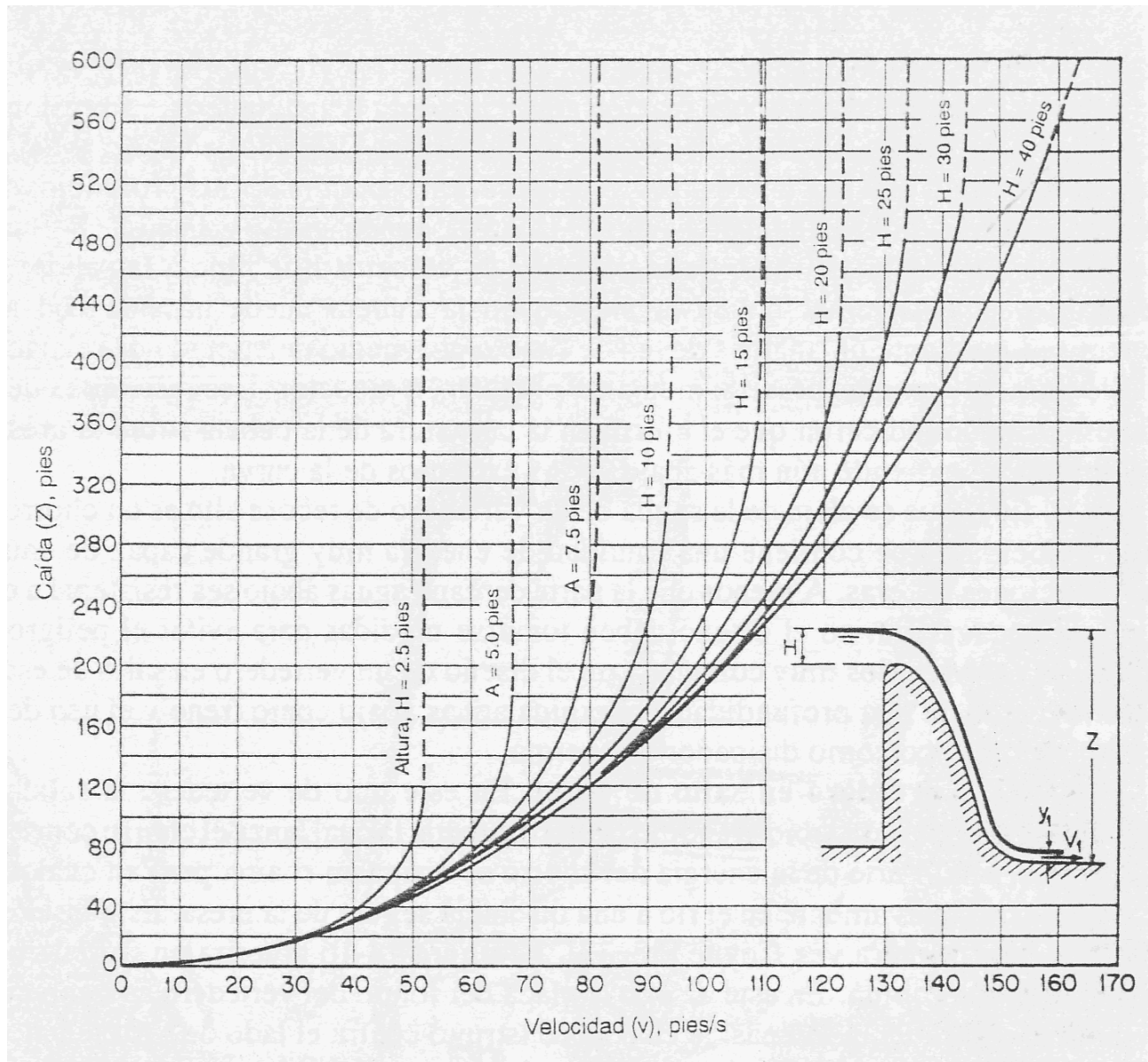


Figura 5.14⁵ Curvas para la determinación de la velocidad a la salida de vertederos con pendientes de 1 en 0.6 a 0.8

⁵ Hidráulica de canales abiertos, Ven Te Chow

5.12 EJEMPLOS DE APLICACIÓN.

EJEMPLO 1

Proyectar un vertedero con canal de descarga sin control de gasto, para descargar 2000 pies³/seg, con una carga de 5 pies, y determinar la curva de carga-gasto. El paramento de aguas arriba del vertedero tiene un talud de 1:1, el canal de entrada tiene una longitud de 100 pies y una pendiente de rozamiento $s = 0.0006$. Arriba de la cresta del vertedero se va a construir un puente con pilas de una anchura de 18 pulg., con tajamares redondos. Los claros del puente no deberán exceder de 20 pies. Los aleros de los estribos se redondearán con radios de 5 pies, y las paredes de llegada se van a colocar formando un ángulo de 30° con la línea central de la entrada del vertedero. Suponer una pérdida a la entrada del canal de llegada igual a $0.1 h_a$

Solución, Método 1:

Paso 1

Primero, supóngase la posición de los niveles de llegada y del lavadero de aguas abajo con respecto al nivel de la cresta. Entonces $H_e + P$ es aproximadamente 7 pies. Asumiendo que $P = 2$.

Paso 2 Calcular altura de velocidad

Para determinar las pérdidas en el canal de llegada, supóngase un valor de C para obtener una velocidad de llegada aproximada, digamos $C = 3.7$. Luego, la descarga por unidad de longitud de la cresta, q , es igual a $CH_e^{3/2} = 3.7 \times 5^{3/2} = 41$ pies³/seg. La velocidad de llegada, v_a , es entonces

igual a $\frac{q}{H_e + P} = \frac{41}{7} = 5.9$ pies/s, y la carga de velocidad de llegada, h_a , es igual a

$$v_a^2 / 2g = 5.9^2 / 64.4 = 0.5 \text{ pies}$$

Paso 3 Pérdidas de carga

La pérdida en el canal de llegada será igual a $h_f = L \cdot s = 100 \cdot 0.0006 = 0.06$ pies

Pérdida a la entrada del canal: $0.1 \cdot h_a = 0.1 \cdot 0.44 = 0.044$ pies

Suponiendo una pérdida a la entrada del canal de llegada igual a $0.1 h_a$, la pérdida total de carga a la llegada es aproximadamente $0.06 + 0.1 \cdot 0.5 = 0.11$ pies.

Paso 4 Cálculo de la carga efectiva, H_0

La carga efectiva H_0 , es igual a $5.0 - 0.11 = 4.89$ pies y P / H_0 es igual a $2 / 4.89 = 0.41$

Paso 5 Cálculo del coeficiente de descarga

De la Figura 5.5, para $P / H_0 = 0.41$ el valor de C es 3.77

Paso 6 Efecto de la inclinación del paramento

La Fig. 5.7 se usa para corregir el coeficiente de descarga cuando la pared de aguas arriba es inclinada. Para un talud de 1:1 y un valor de 0.41 de P/H_0 , la relación de $C_{inclinado}/C_{vertical} = 1.018$. Entonces, $C_1 = 1.018 \times 3.77 = 3.84$.

Paso 7 Efectos de las condiciones aguas abajo

Las relaciones de $(h_d + d)/H_e$ y h_d/H_e se determinan para calcular los efectos de aguas abajo. El valor de $(h_d + d)/H_e$ es aproximadamente de $6.89/4.89 = 1.41$. De la Fig. 5.8 para un $(h_d + d)/H_e$ de 1.41, el valor de h_d/H_e en régimen supercrítico, es 0.91. Si prevalece el régimen supercrítico, h_d debe ser igual a $0.91 H_e = 0.91 \times 4.89 = 4.44$, y d debe ser igual a $6.89 - 4.44 = 2.45$ pies. Con la descarga unitaria indicada de aproximadamente 41 pies³/seg., la velocidad aguas abajo será aproximadamente $41/2.45 = 16.7$ pies/seg., y la carga de velocidad, h_v , será igual a $16.7^2/64.4 = 4.4$ pies. Lo aproximado de los valores de h_d y h_v comprueba que el régimen es supercrítico. En la Fig. 5.8 se puede ver que el efecto de aguas abajo se debe a las influencias del lavadero solamente, y que se aplican las correcciones mostradas en la Fig. 5.9 la relación del C_0 modificado al coeficiente C_0 para una posición del lavadero de agua abajo, determinada por la relación $(h_d + d)/H_e$ de 1.41 es 96.6%. Por lo tanto, el coeficiente corregido es $3.84 \times 0.966 = 3.71$. Este coeficiente se ha corregido ahora por todos los factores que influyen en él.

Paso 8 Longitud de la cresta

El siguiente paso es determinar la longitud necesaria de la cresta. Para la carga de proyecto, H_0 , de 4.89 pies, la longitud efectiva necesaria de la cresta, L es igual a:

$$L = \frac{Q}{CH_0^{3/2}} = \frac{2000}{3.71(4.89)^{3/2}} = 49.9 \text{ pies}$$

Paso 9 Longitud efectiva de la cresta por efecto de pilas y estribos

Para corregir el efecto de las pilas, la longitud efectiva de la ecuación (5-3) es:

$$L' = L + [2(NK_p + K_a)H_e]$$

Si los claros del puente no deben exceder de 20 pies, serán necesarias dos pilas para el claro total aproximado de 50 pies, y N será igual a 2. Entonces:

$$L' = 49.9 + [2(2[0.01] + 0)4.89] = 50.1 \text{ pies}$$

Tabla 5.3. Proyecto de un vertedero de cimacio sin control- Ejemplo 1.(Datos: $L = 50$ pies.¹ $H_0 = 4.89$ pies. $P = 2$ pies)

(1) $\frac{H_e}{H_0}$	(2) H_e en pies	(3) $\frac{2C}{C_0}$	(4) C_i	(5) $H_d + d$	(5)/(2)	⁴ $\frac{C_s}{C}$	C_s	$q = C_s H_e^{3/2}$	(2)+P	v_a aprox.	h_a	$S * 10^4$	Perdidas A la Entrada $0.1 h_a$	Total de pendidas de llegada	Carga Bruta En pies	Descarga Total En Pies ³ /s.
0,1	0,49	0,82	3,15	2,49	5,08	1,00	3,15	1,1	2,49	0,44	0,003	0,1	0,00	0,00	0,49	55
0,2	0,98	0,85	3,26	2,98	3,04	1,00	3,26	3,2	2,98	1,07	0,02	0,6	0,00	0,01	0,99	160
0,4	1,96	0,90	3,46	3,96	2,02	1,00	3,46	9,5	3,96	2,4	0,09	2,0	0,01	0,03	1,99	475
0,6	2,93	0,94	3,61	4,93	1,68	1,00	3,61	18,1	4,93	3,67	0,21	4,0	0,02	0,06	2,99	905
0,8	3,91	0,97	3,73	5,91	1,51	0,982	3,66	28,3	5,91	4,79	0,36	5,0	0,04	0,09	4,00	1415
1,0	4,89	1,00	3,84	6,89	1,41	0,966	3,71	40	6,89	5,8	0,52	6,0	0,05	0,11	5,00	2000
1,2	5,87	1,03	3,96	7,87	1,34	0,95	3,76	53,5	7,87	6,8	0,72	7,0	0,07	0,14	6,01	2675

¹ las longitudes efectivas de las crestas para H_0 son 49.9 pies y 50.1 pies, respectivamente. Debido a la pequeña magnitud del efecto de las pilas, se toma como promedio de la longitud de la cresta efectiva para todos los valores de H_e 50 pies. Si el efecto de las pilas es importante se deben calcular las longitudes efectivas de las crestas para cada valor de h_e .

² de la 5.6

³ C_i para H_0 .

⁴ de la Fig. 5.9

Con el procedimiento anterior se establece un coeficiente de descarga para la carga del proyecto. Para calcular una curva de aforo, se deben obtener los coeficientes para las cargas menores. Como las variaciones de las diferentes correcciones no son constantes, el procedimiento para corregir los coeficientes debe repetirse para cada carga menor. Las variables pueden tabularse en forma semejante a la usada en la Tabla 5.3.

EJEMPLO 2

El ejemplo 2 describe el segundo método para resolver el ejemplo 1.

Solución:

Primero, supóngase un coeficiente general de descarga, digamos, 3.5 la descarga por unidad de longitud, q , es entonces igual a $3.5 H_e^{3/2} = 39.2$ pies³/seg. Para $H_e = 5$ pies. Luego, la longitud efectiva necesaria de la cresta, L , es igual a $Q/q = 2000/39.2 = 51.2$ pies.

En seguida el tirante de llegada se determina aproximadamente por medio de la Fig. 5.5. En esta figura, para $C = 3.5$, el valor de P/H_0 es aproximadamente 0.2. Así, el tirante de llegada no puede ser menor de 1 pie. Para tomar en cuenta los demás factores que puedan reducir el coeficiente, puede suponerse razonablemente un tirante de llegada de aproximadamente 2 pies.

Con un tirante de llegada de 2 pies, el calculo de las perdidas de llegada será el mismo que en el procedimiento de la primera solución y la carga efectiva, H_0 será de 4.89 pies. Semejantemente, el valor de C_i será de 3.84.

Como se tomo para el coeficiente general 3.5 para 5 pies de carga bruta, el coeficiente correspondiente para la carga efectiva de 4.89 pies será:

$$\frac{C_0}{C_{carg\ abruta}} = \frac{H_{carg\ abruta}^{3/2}}{H_{carg\ aefectiva}^{3/2}}$$

$$\text{ó } C_c = C_g \left(\frac{H_g}{H_e} \right)^{3/2} = 3.5 \left(\frac{5.0}{4.89} \right)^{3/2} = 1.035 \times 3.5 = 3.62$$

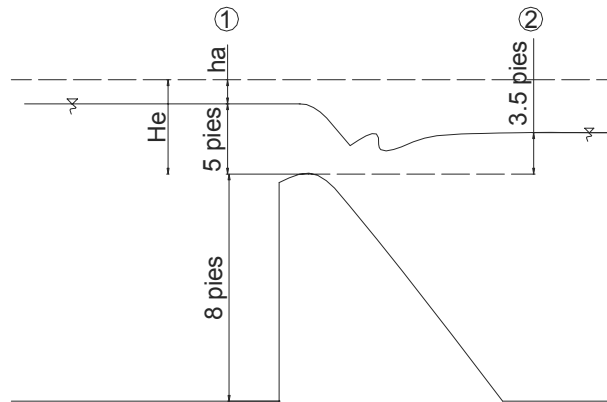
La relación de sumergencia, C_g / C_0 , será entonces $3.62/3.84=0.94$ y, de la Fig. 5.9, $(h_d + d)/H_e$ será 1.3. Por lo tanto, $h_d + d$ será $1.3 \times 4.89 = 6.4$ pies. Por lo tanto el lavadero de aguas abajo se colocara 1.4 pies abajo del nivel de la cresta.

Como se demostró antes que los efectos de contracción de las pilas son pequeños, pueden despreciarse en este ejemplo, y la longitud neta de la cresta es por lo tanto, 51 pies. Esta longitud de la cresta y la posición del lavadero de aguas abajo pueden variarse alterando las suposiciones del coeficiente general y del tirante de llegada.

La curva de aforo se puede obtener por un proceso semejante al usado en el procedimiento 1.

EJEMPLO 3

Proyectar un vertedero sin control para una presa de derivación para dar paso $2000 \text{ pies}^3/\text{seg}$. Con un tirante aguas arriba de la presa que no pase de 5 pies sobre la cresta. El vertedero tiene una altura de 8 pies. El muro de cabeza del estribo está a 90° con la dirección de la corriente y el extremo adyacente a la cresta está redondeado con un radio de 12 plg. Para un gasto de $2000 \text{ pies}^3/\text{seg}$., el agua de la descarga subirá a 3.5 pies arriba de la cresta.



Solución:

Para una carga aproximada, H_e , de 5 pies, una cresta de una altura de 8 pies y una sumergencia de la cresta de 3.5 pies, $(h_d + d)/H_e = 13/5 = 2.6$, y $h_d/H_e = 1.5/5 = 0.3$. En la Fig. 5.8 se puede ver, que para estas relaciones, el fenómeno de aguas abajo será el de un resalto ahogado y que el coeficiente se reducirá en una aproximación de 6%. Aproximadamente, $P/H = 8/5 = 1.6$ y el

coeficiente para descarga libre de la Figura 5.5 es 3.93. Reduciéndolo en 6% debido a la sumergencia, resulta un coeficiente aproximado de 3.7.

La descarga aproximada por pie de cresta, q , es igual a $CH_0^{3/2} = 3.7 \times 5^{3/2} = 41.5$ pies³/seg. Luego, la velocidad de llegada, v_a , es $41.5/13 = 3.2$ pies/seg., y la carga de velocidad de llegada, h_a , es 0.16 pies. $H_0 = 5.0 + 0.16 = 5.16$ pies.

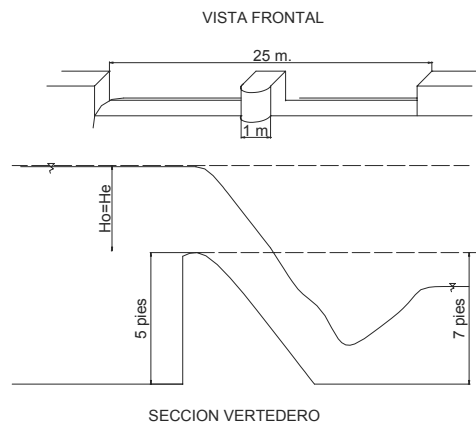
El valor revisado de P/H no altera apreciablemente el coeficiente obtenido de la Figura 5.5 el valor revisado de $(h_d + d)/H_0$ será $13.16/5.16 = 2.55$, y el valor revisado de h_d/H_0 será $1.66/5.16 = 0.32$. El coeficiente de reducción debido a los efectos de la sumergencia tomado de la Figura 5.8 es 5%. El coeficiente revisado es 95% de $3.93 = 3.73$.

La longitud efectiva de la cresta, L , es igual a $Q/CH_0^{3/2} = Q/(3.73 \times 5.16^{3/2}) = 45.7$ pies.

La longitud neta de la cresta se determina usando la ecuación (5-3). La longitud neta de la cresta L' , es igual a $L + 2 K_a H_e$. Para los muros del estribo de 90° redondeados con un radio mayor de $0.15H_0$, $K_a = 0.10$. Entonces la longitud neta de la cresta, L' , es igual a $45.7 + 2 \times 0.10 \times 5.16 = 46.7$ pies.

EJEMPLO 4

Un vertedero de cresta ogee tiene 5 m. de alto. La altura de aguas abajo se encuentra a 7.0 m. por debajo de la cresta del vertedero, el caudal de diseño es 300 m³/s. la longitud total de la cresta es 25 m. existe una pila intermedia de un metro de ancho y de sección circular, los muros laterales tienen un ángulo de 90° con aristas rectas. Diseñar el vertedero para una carga del 75% sobre el vertedero



Solución:

Paso 1. Cálculo de C_o de la Figura 5.5: como P/H_o tiende a 3.95 asumo C_o igual a 3.95.

Paso 2. Cálculo de la longitud efectiva: $L_e = L - 2(N K_p + K_a) H_o$

$N = 1$ por el numero de pilas.

$K_p = 0.01$. Para pilas de tajamar redondo.

$K_a = 0.20$. Estribos cuadrados.

$$\text{Entonces: } L_e = 24 - 2(1 \cdot 0.01 + 0.20) H_o = 24 - 0.42 H_o.$$

Como H_o es desconocido asumir un valor próximo a 24, asumo 23.0 m.

Paso 3. Cálculo de la altura máxima. Cambiar unidades al caudal y la longitud L_e

$$H_{\max} = (Q/C L_e)^{2/3} = (10594.4 / (3.95 \cdot 75.46))^{2/3} = 10.81 \text{ pies.} = 3.30 \text{ m.}$$

Paso 4. Cálculo de la altura de diseño: de acuerdo a la relación $H_d = 0.75 \cdot H_{\max}$ (USBR)

$$H_d = 0.75 \cdot 3.3 = 2.48 \text{ m.}$$

Paso 5. Cálculo de C_o $H_d = H_o = 2.48 \text{ m}$

$P/H_o = 5/2.48 = 2.02$, de la Figura 5.5 C_o próximo a 3.94

Paso 6. Cálculo de la relación para diferentes cargas de diseño C/C_o

$$H_e/H_o = H_{\max}/H_{\text{dis}} = 3.30/2.48 = 1.333, \text{ de la Fig 5.6 } C_d/C_o = 1.04$$

$$\text{Despejando } C_d = 1.04 \cdot 3.94 = 4.098$$

Paso 7. Comprobar la longitud efectiva para H_{\max}

$$L_e = 24 - 0.42 \cdot 3.30 = 22.61 \text{ m,}$$

Como este valor está lejano a 23.0 m, repetir desde el paso 3, con los valores $C_o = 4.098$ y $L_e = 22.61 \text{ m}$.

Con estos valores se obtiene $L_e = 22.64 \text{ m}$, y $C_o = 4.092$ que son valores más próximos a los asumidos.

EJEMPLO 5

Determine la elevación de la cresta y la forma de una sección de vertedero de excedencias con su cara aguas arriba vertical y con una longitud de cresta de 250 pies. El caudal de diseño es 75000 pies³/s. La superficie del agua hacia la parte aguas arriba correspondiente al caudal de diseño se localiza en la cota 1000 y el fondo promedio del canal se encuentra en la cota 880.

Solución

Se supone un vertedero de excedencia alto, entonces no se considera el efecto de la velocidad de aproximación, y $C_d = 4.03$. (Ver sección 5.6).

$$\text{Mediante la ecuación de descarga (5-2), } H_e^{1.5} = \frac{Q}{C L} = \frac{75000}{4.03 \cdot 250} = 74.4 \text{ y } H_e = 17.8 \text{ pies.}$$

La velocidad de aproximación es $V_a = \frac{75000}{250 \cdot (1000 - 880)} = 2.5$ pies/s y la altura de velocidad correspondiente es $H_a = \frac{2.5^2}{2g} = 0.1$ pies.

Luego la altura de diseño es $H_d = 17.8 - 0.1 = 17.7$ pies y la altura de la presa es $h = 120 - 17.7 = 102.3$ pies. Esta altura es mayor que $1.33 H_d$, y por consiguiente, el efecto de la velocidad de aproximación es insignificante.

La elevación de la cresta se localiza en $1000 - 17.7 = 982.3$

Construcción de la forma de la cresta:

1. Calcular el valor de la relación $h_a/H_0 = 0.0056$.
2. Calcular K, ingresando con el dato de h_a/H_0 en la Figura 5.3. En este caso $K = 0.50$.
3. Calcular n, ingresando con el dato de h_a/H_0 en la Figura 5.3. En este caso $n = 1.868$.
4. Reemplazar los valores hallados en la ecuación 4-1. Por tanto la ecuación de la curva toma la forma de: $y = -0.0411 \cdot x^{1.868}$
5. Hallar los factores que componen la cresta. Para esto, se ingresa en la Figura 5.3 con el dato de h_a/H_0 y se obtienen las relaciones $X_c/H_0 = 0.28$; $Y_c/H_0 = 0.125$; $R_1/H_0 = 0.53$ y $R_2/H_0 = 0.23$. Luego los valores son: $X_c = 4.98$; $Y_c = 2.23$; $R_1 = 9.43$ y finalmente $R_2 = 4.1$.
6. Una vez calculados los factores se procede a dibujar el vertedero, tomando en cuenta los aspectos de la Figura 5.3.

5.13 APLICACION DE PROGRAMAS EN EL DISEÑO DE VERTEDEROS.

El programa DISENER, de diseño de disipadores tiene la posibilidad de diseñar vertederos en la ventana BASIN II, que es justamente el diseño de disipador en vertederos, en esta parte el programa pide valores de entrada como un valor del coeficiente de descarga inicial, la altura del paramento P, la carga de diseño Q, el ancho del vertedero, la inclinación del vertedero aguas arriba. Dando como resultado el Coeficiente de Descarga corregido, y la altura de agua total para el vertedero. El cálculo de estos valores es el mismo al expuesto en este capítulo teniendo como única diferencia que el coeficiente de descarga hallado tiene unidades en el sistema métrico donde la ecuación de caudal es:

$$Q = C \cdot 2/3 \cdot \sqrt{2/3 \cdot g} \cdot L \cdot H^{3/2}$$

Por lo tanto los valores de C varían de 1.6 a 2.2.

5.13.1 Ejemplo de aplicación.

Calcular las características para el vertedero de tipo Creager cuyos datos se dan a continuación: Ancho del canal 60 m, altura del paramento $P = 1$ m, coeficiente de descarga asumido 2.0, caudal de diseño $200 \text{ m}^3/\text{s}$, Angulo de inclinación del paramento aguas arriba 90° , coeficiente de manning 0.013. Tomar en cuenta la carga de velocidad Hv.

Solución

Paso 1. Entrar a **DISENER: Repisas dentadas (Basin II)**, luego a **Vertederos**

Paso 2. En vertederos ingresar los datos de entrada, como muestra la siguiente Figura:

DISENER v1.01 - Disipadores de Energía - [BASIN II en Vertederos.]

Archivo Análisis Ver Imprimir Ayuda

Información General.

Nombre del Proyecto: Lugar y Fecha:

Nombre del Usuario: Hora:

Empresa: Observaciones:

Datos de Entrada.

Ancho del canal (W): [m] Angulo Inclinación del Paramento (a): [grados]

Altura del Paramento (P): [m] Aceleración de la Gravedad (g): [m/s²]

Coefficiente de Descarga (C): Coeficiente de Manning (n):

Caudal (Q): [m³/s] Altura (Z1): [m]

Angulo Inclinación Delantal (b): [grados] Consideraciones Especiales:

Definición de Símbolos.

Paso 3. Apretar **Mostrar Resultados**, donde aparece la ventana con los resultados del vertedero, tanto el coeficiente de descarga corregido como la altura de agua sobre el vertedero, los valores hidráulicos en la sección del vertedero, como muestra la siguiente ventana:

BASIN II en Vertederos Creager (Resultados)

Resultados del Análisis:

Carga sobre el Vertedero (H) :

H = [m]

Carga H+Altura de Velocidad (Ho) :

Ho = [m]

Relación P/Ho :

P/Ho =

Coefficiente de Descarga (C) :

C =

H' Recalculado (H') :

H' = [m]

Ho' Recalculado (Ho') :

Ho' = [m]

Coefficiente Definitivo (m) :

m =

Ventana solución del vertedero

5.14 EJERCICIOS PROPUESTOS.

- 5.1** Si el piso del canal se encuentra en la cota 975 en lugar de la cota 880 y los otros datos permanecen iguales, determine la sección del vertedero requerida en el ejemplo 5. Se requiere un procedimiento de ensayo y error para la determinación del valor de C
- 5.2** Determine la elevación de la cresta y la forma de una sección de vertedero de excedencias cuyo paramento aguas arriba tiene una pendiente de 2:3 y una longitud de cresta de 235 pies. El caudal de diseño es 67000 pies³/s. La superficie del agua hacia la parte aguas arriba correspondiente al caudal de diseño se localiza en la cota 2550 y el fondo promedio del canal se encuentra en la cota 2410.
- 5.3** Un vertedero de cresta cilíndrica de 16 pies de ancho se diseña para pasar 420 pies³/s cuando la elevación superficial del río aguas arriba del vertedero es 23.0 pies. El fondo del depósito es horizontal y se ubica a una elevación de 0.00 pies, río arriba del vertedero. Encuentre el flujo cuando la elevación del agua superficial río arriba del vertedero es 21.50 pies. Despreciar la velocidad de aproximación.
- 5.4** Un vertedero de crecida (presa) con 80 m ancho lleva una descarga máxima de 400 m³/seg. Defina el perfil de la cresta para el vertedero. Considere una pendiente de 3:1 cuesta río arriba y una 2:1 cuesta río abajo y asuma el coeficiente de descarga igual a 2.22.
- 5.5** Diseñar un vertedero de descarga libre (sin control), por el cuál debe pasar 57 m³/s de agua. El nivel de agua por encima de la cresta del vertedero no debe exceder de 1.6 m. El paramento aguas arriba del vertedero tiene un talud de 2:3, el canal de entrada tiene una longitud de 30 m y una pendiente de 0.8x1000. arriba de la cresta del vertedero se va a construir un puente con pilas de 50 cm., con tajamares redondos. Los claros del puente no deberá exceder de 8 m. Los aleros de los estribos se redondearán con radios de 1.5 m, y las paredes de llegada se van a colocar formando un ángulo de 30° con el eje de la entrada del vertedero. Suponer una pérdida a la entrada del canal de llegada equivalente al 12% de la altura de velocidad.
- 5.6** Determinar la curva de carga-caudal en el problema anterior, si el paramento aguas arriba es vertical.
- 5.7** Diseñar un vertedero sin control para una presa de derivación, conociendo que el volumen anual aprovechable de dicha presa es 1600 Hm³. El nivel máximo de aguas no debe pasar de 1.4 m por encima de la cresta del vertedero. El vertedero tiene una altura de 4 m. El muro de cabeza del estribo esta a 90° con la dirección de la corriente y el extremo adyacente a la cresta está redondeado con un radio de 25 cm. Para el caudal de diseño, el agua de la descarga subirá a 1.1 arriba de la cresta.
- 5.8** En una presa el caudal unitario que pasa a través de un vertedero, regulado por una compuerta, es de 5 m³/s/m. El canal de llegada se encuentra en la cota 2525 y la cota N.A.M. es de 2543. a) Determine las dimensiones y forma del vertedero, si la compuerta puede abrirse 75 cm. como máximo.
- 5.9** En un río cuyo caudal máximo es de 3.5 m³/s se ha instalado una obra de toma. Aguas abajo de la obra de toma, el caudal máximo del río es de 2.1 m³/s. La obra de toma consta de un vertedero de descarga libre y un canal de salida. El caudal unitario requerido para la

obra de toma es de $1 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$. si el tirante máximo medido en el río, aguas arriba de la obra de toma es de 1,6 m. Encontrar las dimensiones del vertedero para las condiciones planteadas anteriormente. Despreciar el efecto de la velocidad de aproximación.

5.15 BIBLIOGRAFIA

U.S. Bureau of Reclamation. "Design of Small Dams". 3rd edition, Revised 1987.

Ven Te Chow. "Hidráulica de Canales Abiertos". Editorial McGraw Hill. Año 1994