

## CAPÍTULO 2

---

### Perfil de un cimacio de cresta libre

---

La necesidad de controlar el agua ha sido un reto que los ingenieros han enfrentado hace mucho tiempo. El ingeniero que diseña un cimacio de cresta libre utiliza la experiencia de ingenieros que publicaron la información experimental sobre la capacidad de descarga, la longitud efectiva de cresta, el perfil del cimacio, el perfil de la superficie libre del agua y la distribución de la presión sobre el cimacio que obtuvieron de modelos y prototipos construidos.

De la experiencia se ha observado que cuando se efectúa una descarga por encima de una pared gruesa a superficie libre, éste puede desarrollar zonas de presión distinta a la atmosférica, figura 2.1, es decir, al principio el contacto inicial del agua con la pared gruesa tiende a separarse y se produce una zona de baja presión, después cambia a una zona de presión positiva que provoca la erosión por el contacto y por la energía dinámica de las partículas que intentan desgastar la arista final de la pared gruesa. Es indiscutible que la forma que resulta, es la trayectoria natural que impone el agua cuando de forma frecuente el agua choca con la pared gruesa, figura 2.1.

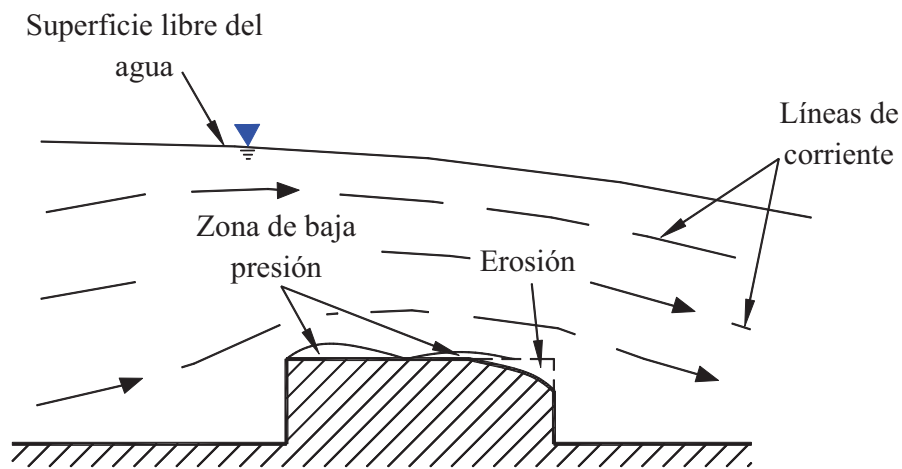


Figura 2.1: Descarga por encima de una pared gruesa.

Sección 2.1

## Criterio general de diseño

Este tipo de vertedores a los cuales se les ha dado el nombre de *cimacios*, donde la forma más eficiente y óptima en que funcionan, es la que se aproxima a la de la superficie inferior de la lámina que se produce por un vertedor en pared delgada como la mostrada en la figura 1.4. La forma de esta sección depende de la carga y de la inclinación del paramento, los criterios más utilizados para este tipo de cimacios son; el de *US Bureau of Reclamation* en adelante en el texto USBR y el de *Waterways Experiment Station* en adelante en el texto WES.

Para ambos criterios el perfil de un cimacio se diseña en dos secciones limitadas por la cresta vertedora; aguas arriba y aguas abajo de la cresta. El diseño del perfil del cimacio considera los ejes coordenados  $x$  y  $y$  sobre la cresta, como se muestra en la figura 2.2.

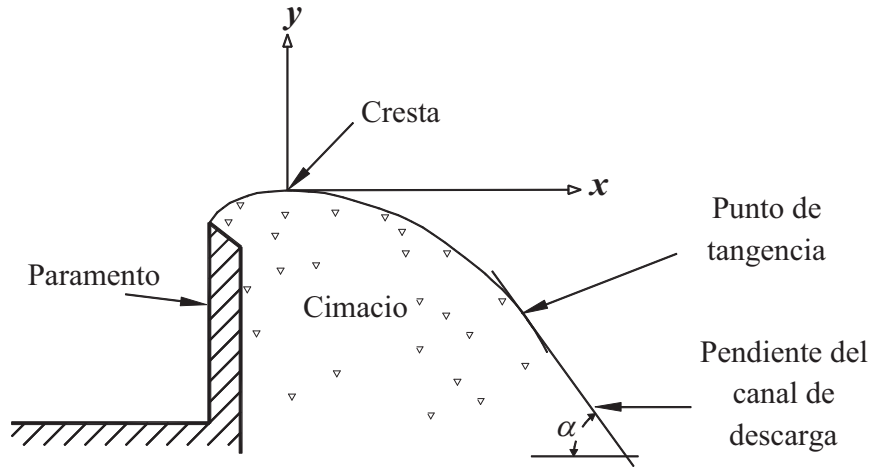


Figura 2.2: Ejes coordenadas

El perfil aguas abajo de la cresta del cimacio se obtiene mediante la ecuación 2.1 que describe el perfil del agua de acuerdo con la experimentación

$$y = -kH_0 \left( \frac{x}{H_0} \right)^n \quad (2.1)$$

donde:

$k$  y  $n$  constantes cuyos valores dependen del criterio a emplear, y son adimensionales y se obtuvieron como se explica en los subcapítulos 3.2 y 3.3

$x$  y  $y$  coordenadas del perfil de acuerdo con el sistema de ejes mostrada en la figura 2.2, en m.

El perfil aguas abajo de la cresta inicia desde el origen de los ejes coordenados hasta un punto donde se une con el canal de descarga con pendiente constante, el punto donde el perfil abandona la curva del cimacio y adquiere una pendiente constante es un punto de tangencia. El punto único donde la pendiente dada del canal es tangente a la curvatura del perfil de un cimacio es el punto de tangencia y su ubicación depende de las condiciones aguas abajo de la cresta. También, ese punto surge de la necesidad de terminar la parte curva aguas abajo de la cresta para unirla con una pendiente que

así lo requiera el diseño. Obviamente el ángulo de inclinación  $\alpha$  de esa línea respecto de un plano horizontal afecta la ubicación del punto de tangencia;

Por lo tanto, el rango de  $x$  para la ecuación aguas abajo de la cresta es:

$$0 \leq x \leq x_T$$

donde  $x_T$ , es la coordenada sobre el eje  $x$  del punto de tangencia y se obtiene derivando e igualando las pendientes lo que da:

$$x_T = \frac{H_0}{\left[ k \left( \frac{1}{\tan \alpha} \right) n \right]^{\frac{1}{n-1}}} \quad (2.2)$$

y  $y_T$  se obtiene al sustituir el valor de  $x_T$  en la ecuación 2.1 que describe el perfil del cimacio.

### Método semigráfico

El perfil del cimacio aguas arriba de la cresta según la práctica usual, se puede obtener mediante un método semigráfico que se describe a continuación. El método consiste en dos curvas tangentes entre si y tangentes a la cresta del cimacio (origen de los ejes) figura 2.2. El procedimiento para poder obtener el perfil del cimacio aguas arriba de la cresta es:

#### Trazos preliminares

1. Localizar el centro de la curvatura  $A$  del primer círculo  $A(0, -R_1)$
2. Trazar un arco  $A_1$  de radio  $R = R_1 - R_2$  con centro en  $A$
3. Localizar el punto  $C$  de coordenadas  $C(x_c, y_c)$
4. Trazar un arco  $A_2$  de radio  $R_2$  con centro en  $C$
5. Identificar el punto  $B$  en la intersección de los arcos  $A_1$  y  $A_2$ , el cual se ubica dentro del triángulo  $OCA$

6. Trazar la línea  $AB$  del punto  $A$  hasta  $B$  extendiéndola hasta el eje  $x$

**Trazos Definitivos**

7. Trazar un arco  $A_3$  de radio  $R_1$  con centro en  $A$ , desde el origen  $O$  hasta la línea  $AB$
8. Trazar un arco  $A_4$  de radio  $R_2$  con centro en  $B$  desde  $C$  hasta la línea  $AB$

El punto  $P$  es el punto tangente de las dos curvas  $A_3$  y  $A_4$  por donde pasa la línea  $AB$ .

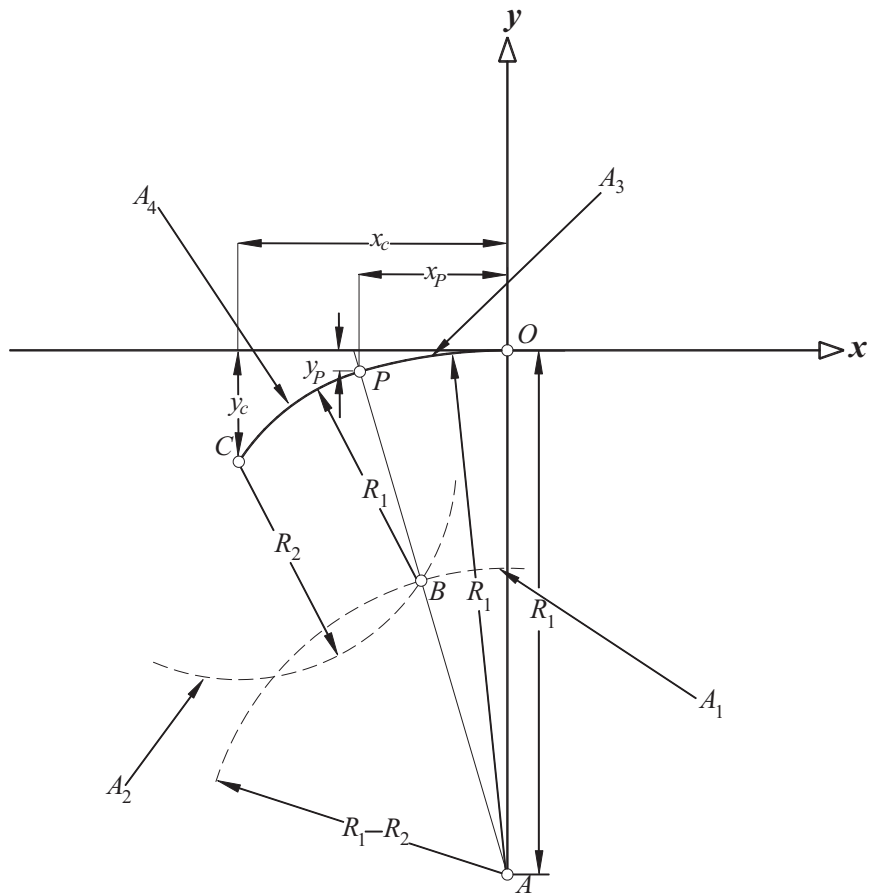


Figura 2.3: Método semigráfico

Las variables  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $x_c$  y  $y_c$  del método semigráfico dependen del criterio de diseño a emplear, y serán explicados en los subcapítulos 3,2 y 3,3

### 2.1.1. Programación del método semigráfico

Evidentemente la ventaja de poder sistematizar al método semigráfico es amplia; ya que al lograr su sistematización el tiempo para obtener el perfil buscado es menor. Es decir, se encontraron las ecuaciones debidas para el trazo del método semigráfico. Se aplicaron conocimientos de *Algebra elemental*, *Geometría Analítica* y *Plana* se obtuvieron las ecuaciones debidas de las líneas y círculos correspondientes y se resolvieron sistemas de ecuaciones para obtener los puntos de intersección.

La ecuación 2.3 es la ecuación general de un circunferencia con centro en  $h$  y  $k$  y  $x$  y  $y$  son coordenadas que describen la circunferencia y  $r$  es el radio del círculo.

$$(x - h)^2 + (y - k)^2 = r^2 \quad (2.3)$$

Los trazos definitivos del perfil buscado son dos arcos de círculo por lo que ambos círculos tendría la forma de la ecuación 2.3 pero, al no ser círculos completos, el rango de  $x$  que describe el trazo está limitado.

El primer trazo definitivo tiene centro  $C$  de coordenadas  $(0, -R_1)$ , con un radio  $r$  de magnitud  $R_1$ , sustituyendo en la ecuación 2.3 y de acuerdo con los ejes coordenados mostrados en la figura 2.2, se obtiene:

$$(x - 0)^2 + (y - (-R_1))^2 = R_1^2 \quad (2.4)$$

De forma similar para la ecuación del segundo trazo defintivo se tiene el segundo arco de circunferencia con centro en  $C$  de coordendos  $(x_B, y_B)$ , con un radio  $r$  de magnitud  $R_2$  y con el mismo sistema de ejes coordenados se tiene la siguiente ecuación.

$$(x - x_B)^2 + (y - y_B)^2 = R_2^2 \quad (2.5)$$

Los trazos auxiliares se obtienen mediante la solución del sistema de ecuaciones siguientes:

El punto  $B$  corresponde a una de las intersecciones de los círculos  $A_1$  y  $A_2$  cuyas ecuaciones son:

$$A_1 = (x - 0)^2 + (y - (-R_1))^2 = (R_1 - R_2)^2 \quad (2.6)$$

$$A_2 = (x - x_c)^2 + (y - y_c)^2 = R_2^2 \quad (2.7)$$

Resolviendo ese sistema de ecuaciones, resultan dos soluciones para el punto  $B(x_B, y_B)$  y la correcta es el punto que se encuentra comprendido dentro del triángulo  $OCA$  de la figura 2.3, la otra solución no es de interés en el trazo.

La línea  $AB$  debe pasar por los puntos  $A$  y  $B$  y está limitado por los ejes  $x$  y  $y$  y está dada por:

$$AB = \frac{y - (-R_1)}{x - 0} = \frac{y_B - (-R_1)}{x_B - 0} \quad (2.8)$$

Esta línea corresponde a la frontera entre los trazos definitivos de los arcos  $A_3$  y  $A_4$ . El punto  $P$  corresponde al cruce de la línea  $AB$ , con el arco  $A_3$ ; es indispensable resolver el sistema de ecuaciones para obtener las coordenadas del punto  $P(x_P, y_P)$

A continuación se muestra un resumen de las ecuaciones de los trazos definitivos con sus respectivos rangos:

### Curva $A_3$

$$y = \sqrt{R_1^2 - x^2} - R_1 \quad (2.9)$$

donde

$$x_P \leq x \leq 0$$

### Curva $A_4$

$$y = y_B + \sqrt{-x^2 + 2 x x_B - x_B^2 + R_2^2} \quad (2.10)$$

donde

$$x_c \leq x \leq x_P$$

Sección 2.2

**Criterio de diseño según el *US Bureau of Reclamation*, USBR**

El cuerpo de ingenieros del USBR realizó una serie de investigaciones sobre los cimacios y después de un análisis basado en una gran recopilación de datos y resultados de campo, presentaron los resultados en gráficas adimensionales para obtener las variables necesarias para el diseño de cimacios de manera general, dependen de la carga de velocidad  $h_a$ , de la carga de diseño  $H_0$  y de la inclinación  $\alpha$  del paramento aguas arriba de la cresta.

Los valores de  $k$  y  $n$  para obtener las ecuaciones del perfil aguas abajo de la cresta del cimacio, se obtienen de las figuras 2.4 y 2.5 respectivamente y el valor de las variables involucradas en el trazo aguas arribas, el método semigráfico; se obtiene de la figura 2.6.



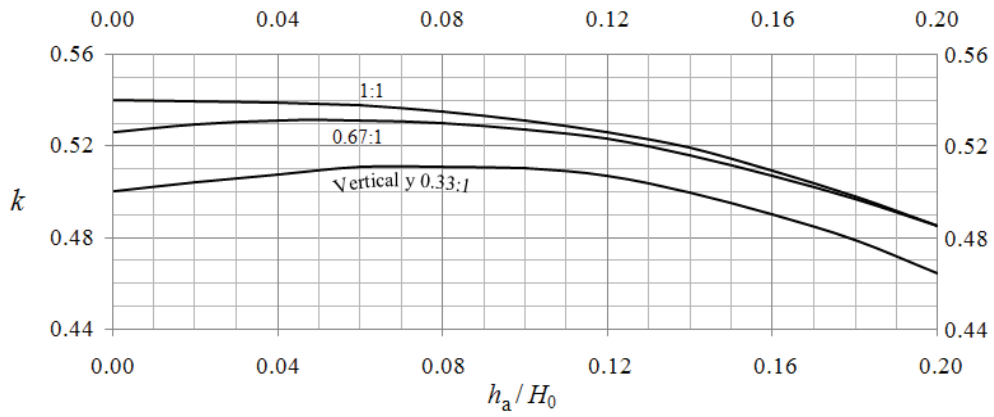


Figura 2.4: Valor de  $k$  para el diseño del perfil de un cimacio

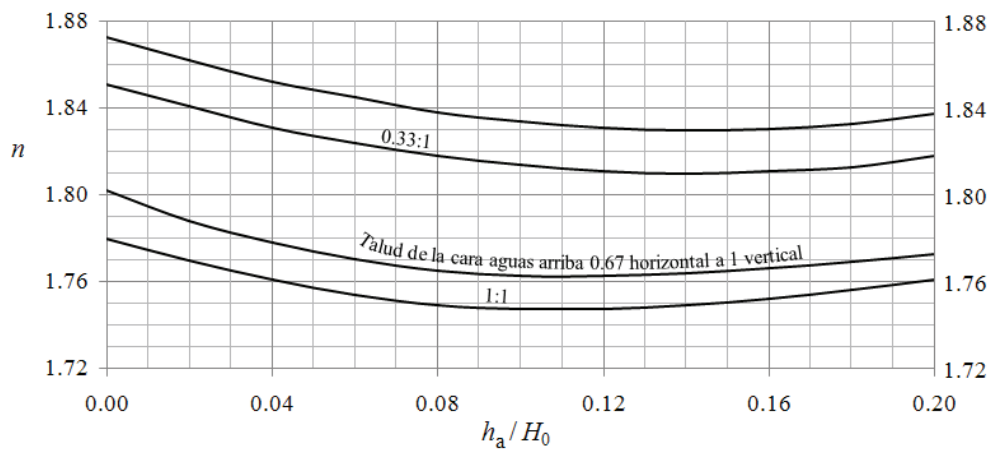


Figura 2.5: Valor de  $n$  para el diseño del perfil de un cimacio

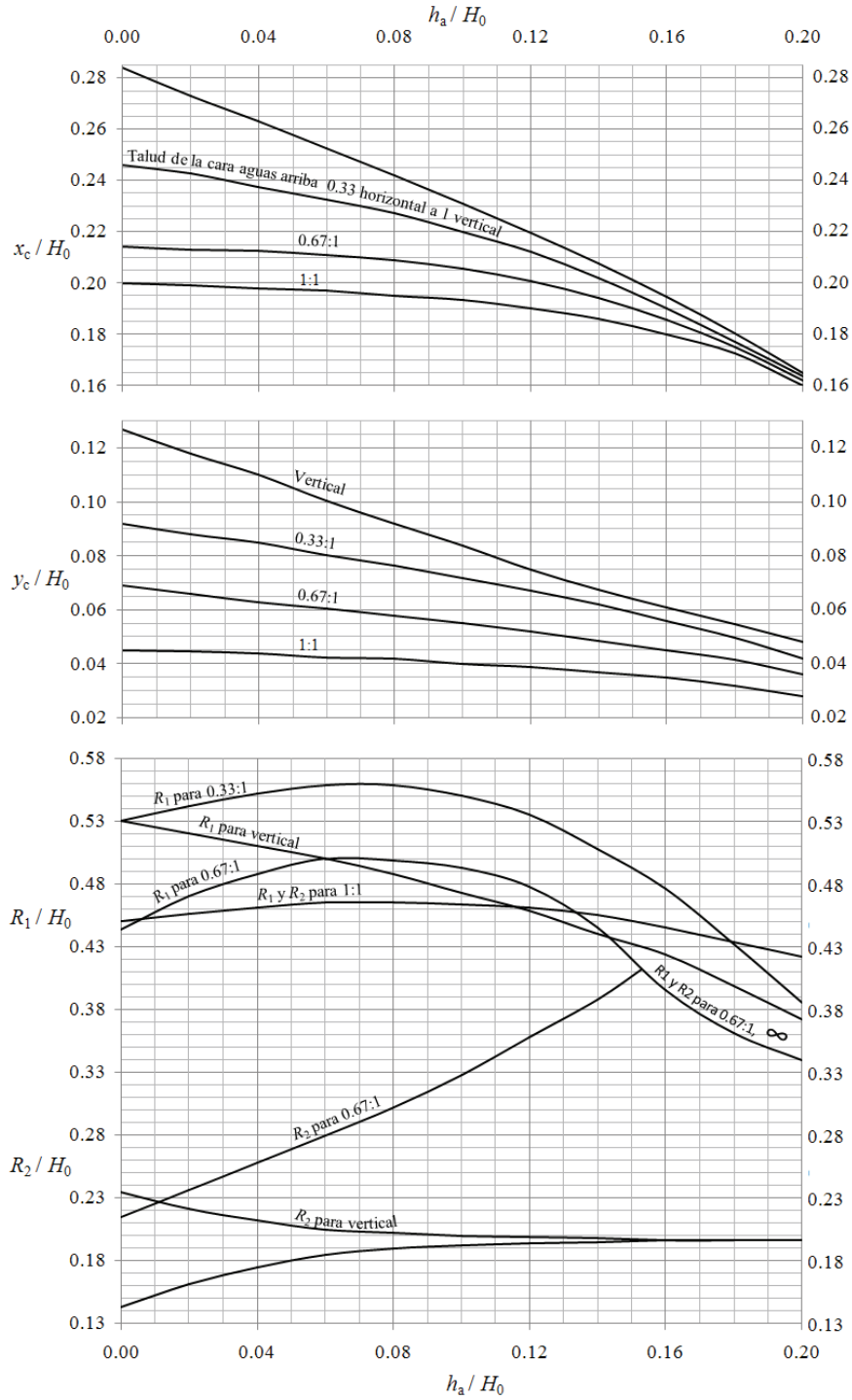


Figura 2.6: Valores de  $\frac{x_c}{H_0}$ ,  $\frac{y_c}{H_0}$ ,  $\frac{R_1}{H_0}$  y  $\frac{R_2}{H_0}$  para el diseño del perfil de un cimacio, para el criterio tipo USBR

Es conveniente reproducir las figuras 2.4, 2.5 y 2.6 en donde el valor de las variables se puedan obtener rápidamente. Se muestran las figuras 2.4, 2.5 y 2.6 y mediante tramos de ecuaciones de líneas que las reproducen en los cuadros 2.1 y 2.2.

$\frac{h_a}{H_o}$	Variable	
	$k$	$n$
0	$k = 0,5$	$n = 1,873$
$0,00 \leq \frac{h_a}{H_o} \leq 0,01$	$k = 0,1 \frac{h_a}{H_o} + 0,500$	$n = -0,6 \frac{h_a}{H_o} + 1,873$
$0,01 \leq \frac{h_a}{H_o} \leq 0,02$	$k = 0,3 \frac{h_a}{H_o} + 0,498$	$n = -0,7 \frac{h_a}{H_o} + 1,874$
$0,02 \leq \frac{h_a}{H_o} \leq 0,03$	$k = 0,3 \frac{h_a}{H_o} + 0,498$	$n = -0,3 \frac{h_a}{H_o} + 1,866$
$0,03 \leq \frac{h_a}{H_o} \leq 0,04$	$k = 0,2 \frac{h_a}{H_o} + 0,501$	$n = -0,5 \frac{h_a}{H_o} + 1,872$
$0,04 \leq \frac{h_a}{H_o} \leq 0,05$	$k = 0,1 \frac{h_a}{H_o} + 0,505$	$n = -0,4 \frac{h_a}{H_o} + 1,868$
$0,05 \leq \frac{h_a}{H_o} \leq 0,06$	$k = 0,1 \frac{h_a}{H_o} + 0,505$	$n = -0,3 \frac{h_a}{H_o} + 1,869$
$0,06 \leq \frac{h_a}{H_o} \leq 0,07$	$k = 0,2 \frac{h_a}{H_o} + 0,499$	$n = -0,4 \frac{h_a}{H_o} + 1,869$
$0,07 \leq \frac{h_a}{H_o} \leq 0,08$	$k = -0,1 \frac{h_a}{H_o} + 0,520$	$n = -0,2 \frac{h_a}{H_o} + 1,855$
$0,08 \leq \frac{h_a}{H_o} \leq 0,09$	$k = -0,1 \frac{h_a}{H_o} + 0,520$	$n = -0,2 \frac{h_a}{H_o} + 1,855$
$0,09 \leq \frac{h_a}{H_o} \leq 0,10$	$k = -0,1 \frac{h_a}{H_o} + 0,520$	$n = -0,2 \frac{h_a}{H_o} + 1,855$
$0,10 \leq \frac{h_a}{H_o} \leq 0,11$	$k = -0,1 \frac{h_a}{H_o} + 0,520$	$n = -0,3 \frac{h_a}{H_o} + 1,865$
$0,11 \leq \frac{h_a}{H_o} \leq 0,12$	$k = -0,2 \frac{h_a}{H_o} + 0,531$	$n = -0,1 \frac{h_a}{H_o} + 1,843$
$0,12 \leq \frac{h_a}{H_o} \leq 0,13$	$k = -0,4 \frac{h_a}{H_o} + 0,555$	$n = -0,1 \frac{h_a}{H_o} + 1,843$
$0,13 \leq \frac{h_a}{H_o} \leq 0,14$	$k = -0,3 \frac{h_a}{H_o} + 0,542$	$n = 0,2 \frac{h_a}{H_o} + 1,804$
$0,14 \leq \frac{h_a}{H_o} \leq 0,15$	$k = -0,5 \frac{h_a}{H_o} + 0,570$	$n = -0,1 \frac{h_a}{H_o} + 1,846$
$0,15 \leq \frac{h_a}{H_o} \leq 0,16$	$k = -0,5 \frac{h_a}{H_o} + 0,570$	$n = 0,1 \frac{h_a}{H_o} + 1,816$
$0,16 \leq \frac{h_a}{H_o} \leq 0,17$	$k = -0,5 \frac{h_a}{H_o} + 0,570$	$n = 0,1 \frac{h_a}{H_o} + 1,816$
$0,17 \leq \frac{h_a}{H_o} \leq 0,18$	$k = -0,6 \frac{h_a}{H_o} + 0,587$	$n = 0,1 \frac{h_a}{H_o} + 1,816$
$0,18 \leq \frac{h_a}{H_o} \leq 0,19$	$k = -0,7 \frac{h_a}{H_o} + 0,605$	$n = 0,1 \frac{h_a}{H_o} + 1,816$
$0,19 \leq \frac{h_a}{H_o} \leq 0,20$	$k = -0,6 \frac{h_a}{H_o} + 0,586$	$n = 0,3 \frac{h_a}{H_o} + 1,778$

Cuadro 2.1: Ajuste de los valores de  $k$  y  $n$  para el diseño del perfil de un cimacio, con paramento vertical, criterio USBR

$\frac{h_a}{H_0}$	Variable			
	$\frac{R_1}{H_0}$	$\frac{R_2}{H_0}$	$\frac{x_c}{H_0}$	$\frac{y_c}{H_0}$
0	$\frac{R_1}{H_0} = 0,530$	$\frac{R_2}{H_0} = 0,233$	$\frac{x_c}{H_0} = 0,283$	$\frac{y_c}{H_0} = 0,125$
$0,00 \leq \frac{h_a}{H_0} \leq 0,01$	$\frac{R_1}{H_0} = -0,50 \frac{h_a}{H_0} + 0,530$	$\frac{R_2}{H_0} = -0,40 \frac{h_a}{H_0} + 0,233$	$\frac{x_c}{H_0} = -0,40 \frac{h_a}{H_0} + 0,283$	$\frac{y_c}{H_0} = -0,50 \frac{h_a}{H_0} + 0,125$
$0,01 \leq \frac{h_a}{H_0} \leq 0,02$	$\frac{R_1}{H_0} = -0,50 \frac{h_a}{H_0} + 0,530$	$\frac{R_2}{H_0} = -0,90 \frac{h_a}{H_0} + 0,238$	$\frac{x_c}{H_0} = -0,50 \frac{h_a}{H_0} + 0,284$	$\frac{y_c}{H_0} = -0,33 \frac{h_a}{H_0} + 0,123$
$0,02 \leq \frac{h_a}{H_0} \leq 0,03$	$\frac{R_1}{H_0} = -0,50 \frac{h_a}{H_0} + 0,530$	$\frac{R_2}{H_0} = -0,30 \frac{h_a}{H_0} + 0,226$	$\frac{x_c}{H_0} = -0,60 \frac{h_a}{H_0} + 0,286$	$\frac{y_c}{H_0} = -0,30 \frac{h_a}{H_0} + 0,123$
$0,03 \leq \frac{h_a}{H_0} \leq 0,04$	$\frac{R_1}{H_0} = -0,50 \frac{h_a}{H_0} + 0,530$	$\frac{R_2}{H_0} = -0,50 \frac{h_a}{H_0} + 0,232$	$\frac{x_c}{H_0} = -0,50 \frac{h_a}{H_0} + 0,283$	$\frac{y_c}{H_0} = -0,40 \frac{h_a}{H_0} + 0,126$
$0,04 \leq \frac{h_a}{H_0} \leq 0,05$	$\frac{R_1}{H_0} = -0,50 \frac{h_a}{H_0} + 0,530$	$\frac{R_2}{H_0} = -0,20 \frac{h_a}{H_0} + 0,220$	$\frac{x_c}{H_0} = -0,60 \frac{h_a}{H_0} + 0,287$	$\frac{y_c}{H_0} = -0,50 \frac{h_a}{H_0} + 0,130$
$0,05 \leq \frac{h_a}{H_0} \leq 0,06$	$\frac{R_1}{H_0} = -0,50 \frac{h_a}{H_0} + 0,530$	$\frac{R_2}{H_0} = -0,10 \frac{h_a}{H_0} + 0,215$	$\frac{x_c}{H_0} = -0,40 \frac{h_a}{H_0} + 0,277$	$\frac{y_c}{H_0} = -0,50 \frac{h_a}{H_0} + 0,130$
$0,06 \leq \frac{h_a}{H_0} \leq 0,07$	$\frac{R_1}{H_0} = -0,80 \frac{h_a}{H_0} + 0,548$	$\frac{R_2}{H_0} = -0,50 \frac{h_a}{H_0} + 0,239$	$\frac{x_c}{H_0} = -0,50 \frac{h_a}{H_0} + 0,283$	$\frac{y_c}{H_0} = -0,49 \frac{h_a}{H_0} + 0,129$
$0,07 \leq \frac{h_a}{H_0} \leq 0,08$	$\frac{R_1}{H_0} = -0,30 \frac{h_a}{H_0} + 0,531$	$\frac{R_2}{H_0} = -0,20 \frac{h_a}{H_0} + 0,218$	$\frac{x_c}{H_0} = -0,70 \frac{h_a}{H_0} + 0,297$	$\frac{y_c}{H_0} = -0,31 \frac{h_a}{H_0} + 0,116$
$0,08 \leq \frac{h_a}{H_0} \leq 0,09$	$\frac{R_1}{H_0} = -0,90 \frac{h_a}{H_0} + 0,561$	$\frac{R_2}{H_0} = -0,10 \frac{h_a}{H_0} + 0,210$	$\frac{x_c}{H_0} = -0,50 \frac{h_a}{H_0} + 0,281$	$\frac{y_c}{H_0} = -0,40 \frac{h_a}{H_0} + 0,124$
$0,09 \leq \frac{h_a}{H_0} \leq 0,10$	$\frac{R_1}{H_0} = -0,60 \frac{h_a}{H_0} + 0,534$	$\frac{R_2}{H_0} = -0,10 \frac{h_a}{H_0} + 0,210$	$\frac{x_c}{H_0} = -0,70 \frac{h_a}{H_0} + 0,299$	$\frac{y_c}{H_0} = -0,40 \frac{h_a}{H_0} + 0,124$
$0,10 \leq \frac{h_a}{H_0} \leq 0,11$	$\frac{R_1}{H_0} = -0,60 \frac{h_a}{H_0} + 0,534$	$\frac{R_2}{H_0} = -0,10 \frac{h_a}{H_0} + 0,210$	$\frac{x_c}{H_0} = -0,40 \frac{h_a}{H_0} + 0,269$	$\frac{y_c}{H_0} = -0,50 \frac{h_a}{H_0} + 0,134$
$0,11 \leq \frac{h_a}{H_0} \leq 0,12$	$\frac{R_1}{H_0} = -0,80 \frac{h_a}{H_0} + 0,556$	$\frac{R_2}{H_0} = -0,05 \frac{h_a}{H_0} + 0,204$	$\frac{x_c}{H_0} = -0,60 \frac{h_a}{H_0} + 0,291$	$\frac{y_c}{H_0} = -0,40 \frac{h_a}{H_0} + 0,123$
$0,12 \leq \frac{h_a}{H_0} \leq 0,13$	$\frac{R_1}{H_0} = -1,00 \frac{h_a}{H_0} + 0,580$	$\frac{R_2}{H_0} = -0,05 \frac{h_a}{H_0} + 0,204$	$\frac{x_c}{H_0} = -0,50 \frac{h_a}{H_0} + 0,279$	$\frac{y_c}{H_0} = -0,40 \frac{h_a}{H_0} + 0,123$
$0,13 \leq \frac{h_a}{H_0} \leq 0,14$	$\frac{R_1}{H_0} = -0,90 \frac{h_a}{H_0} + 0,567$	$\frac{R_2}{H_0} = -0,10 \frac{h_a}{H_0} + 0,211$	$\frac{x_c}{H_0} = -0,80 \frac{h_a}{H_0} + 0,318$	$\frac{y_c}{H_0} = -0,30 \frac{h_a}{H_0} + 0,110$
$0,14 \leq \frac{h_a}{H_0} \leq 0,15$	$\frac{R_1}{H_0} = -0,70 \frac{h_a}{H_0} + 0,539$	$\frac{R_2}{H_0} = -0,10 \frac{h_a}{H_0} + 0,211$	$\frac{x_c}{H_0} = -0,60 \frac{h_a}{H_0} + 0,290$	$\frac{y_c}{H_0} = -0,40 \frac{h_a}{H_0} + 0,124$
$0,15 \leq \frac{h_a}{H_0} \leq 0,16$	$\frac{R_1}{H_0} = -1,00 \frac{h_a}{H_0} + 0,584$	$\frac{R_2}{H_0} = 0,196$	$\frac{x_c}{H_0} = -0,60 \frac{h_a}{H_0} + 0,290$	$\frac{y_c}{H_0} = -0,30 \frac{h_a}{H_0} + 0,109$
$0,16 \leq \frac{h_a}{H_0} \leq 0,17$	$\frac{R_1}{H_0} = -1,40 \frac{h_a}{H_0} + 0,648$	$\frac{R_2}{H_0} = 0,196$	$\frac{x_c}{H_0} = -0,70 \frac{h_a}{H_0} + 0,306$	$\frac{y_c}{H_0} = -0,30 \frac{h_a}{H_0} + 0,109$
$0,17 \leq \frac{h_a}{H_0} \leq 0,18$	$\frac{R_1}{H_0} = -1,00 \frac{h_a}{H_0} + 0,580$	$\frac{R_2}{H_0} = 0,196$	$\frac{x_c}{H_0} = -0,70 \frac{h_a}{H_0} + 0,306$	$\frac{y_c}{H_0} = -0,30 \frac{h_a}{H_0} + 0,109$
$0,18 \leq \frac{h_a}{H_0} \leq 0,19$	$\frac{R_1}{H_0} = -1,20 \frac{h_a}{H_0} + 0,616$	$\frac{R_2}{H_0} = 0,196$	$\frac{x_c}{H_0} = -0,60 \frac{h_a}{H_0} + 0,288$	$\frac{y_c}{H_0} = -0,30 \frac{h_a}{H_0} + 0,109$
$0,19 \leq \frac{h_a}{H_0} \leq 0,20$	$\frac{R_1}{H_0} = -1,30 \frac{h_a}{H_0} + 0,635$	$\frac{R_2}{H_0} = 0,196$	$\frac{x_c}{H_0} = -0,90 \frac{h_a}{H_0} + 0,345$	$\frac{y_c}{H_0} = -0,30 \frac{h_a}{H_0} + 0,109$

Cuadro 2.2: Ajuste de los valores de las variables  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $x_c$  y  $y_c$  para el diseño del perfil de un cimacio con paramento vertical, criterio USBR

Sección 2.3

## Criterio de diseño según la *Waterways* *Experiment Station, WES*

El Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos de América de la *Waterways Experiment Station, WES* estableció otro criterio de diseño que depende de la relación que hay entre la altura de la cresta y el canal de llegada y la carga total de diseño  $H_0$ ; donde  $\frac{P}{H_0} > 1$ , para profundidades del canal de llegada grandes cargas de velocidad de diseño despreciable  $H_0 = h_0$ ;  $h_a \approx 0$  y para paramentos verticales, figura 2.7. El criterio WES puede verse como un caso particular del criterio USBR. Para este criterio, los valores de  $k$  y  $n$  de la ecuación 2.1 son constantes y valen:

$k = 0,5$  y  $n = 1,85$  si el paramento de aguas arriba es vertical y la profundidad  $P$  es grande  $P \geq 3H_0$ .

Por otra parte, del método semigráfico; los valores de  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $x_c$  y  $y_c$  se obtienen de las ecuaciones siguientes:

$$R_1 = 0,5H_0, R_2 = 0,2H_0, x_c = -0,27H_0 \text{ y } y_c = -0,126H_0.$$

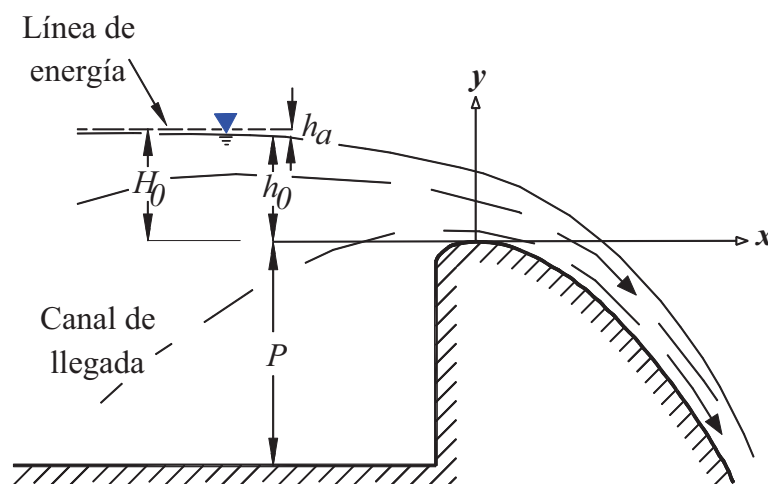


Figura 2.7: Vertido libre sobre un cimacio tipo WES

## Comentarios

Es evidente que el perfil de un cimacio funciona de forma óptima para la condición de diseño que corresponde a un único gasto  $Q_0$  y carga total de diseño  $H_0$ , y funciona con menor o mayor eficiencia con otra condición de operación. Por lo que la elección de la carga de diseño es muy importante en el diseño de los cimacios y depende de estudios hidrológicos, topográficos, etc.

El perfil de un cimacio de cresta libre se constituye por tres tramos importantes: dos arcos de su circunferencia en la parte aguas arriba de la cresta y una curva definida por una ecuación la cual describe el perfil aguas abajo de la cresta. Cabe destacar que el criterio WES está limitado para el caso en que la velocidad de llegada del flujo al cimacio es aproximadamente igual a cero; mientras que el criterio USBR es más amplio en su aplicación ya que se puede utilizar para cualquier valor de velocidad de llegada del flujo al cimacio. Las unidades de las variables deben ser las mismas en la ecuación 2.1, dichas ecuaciones manejan relaciones adimensionales, y depende de las relaciones  $\frac{x}{H_0}$ ,  $\frac{y}{H_0}$  y de la carga total de diseño  $H_0$ . Las ecuaciones 2.9 y 2.10 son ecuaciones que dependen de las variables dimensionales  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $x_B$  y  $y_B$  y del intervalo  $x_P \leq x \leq 0$  y de  $x_c \leq x \leq x_P$ .

Para el criterio WES es evidente que su aplicación se restringe pero en cambio las variables que intervienen en el criterio se calculan de manera sencilla y los cálculos proporcionan una ventaja sobre el criterio USBR, por ejemplo en la ecuación del perfil del cimacio aguas abajo de la cresta la ecuación que lo define sólo depende de las variables  $x$  y  $y$  que son coordenadas que lo definen, por otro lado, donde el criterio WES no es aplicable, el criterio USBR se puede aplicar ya que éste se puede aplicar para cualquier valor de la velocidad del flujo, pero el número de los cálculos se incrementa.

---

Finalmente el criterio a emplear queda al juicio del ingeniero que diseñe el cimacio de acuerdo con la pericia que tenga para el diseño. En la figura 2.4 se muestra el perfil completo del cimacio y las ecuaciones que describen cada tramo del perfil y los puntos de mayor importancia:

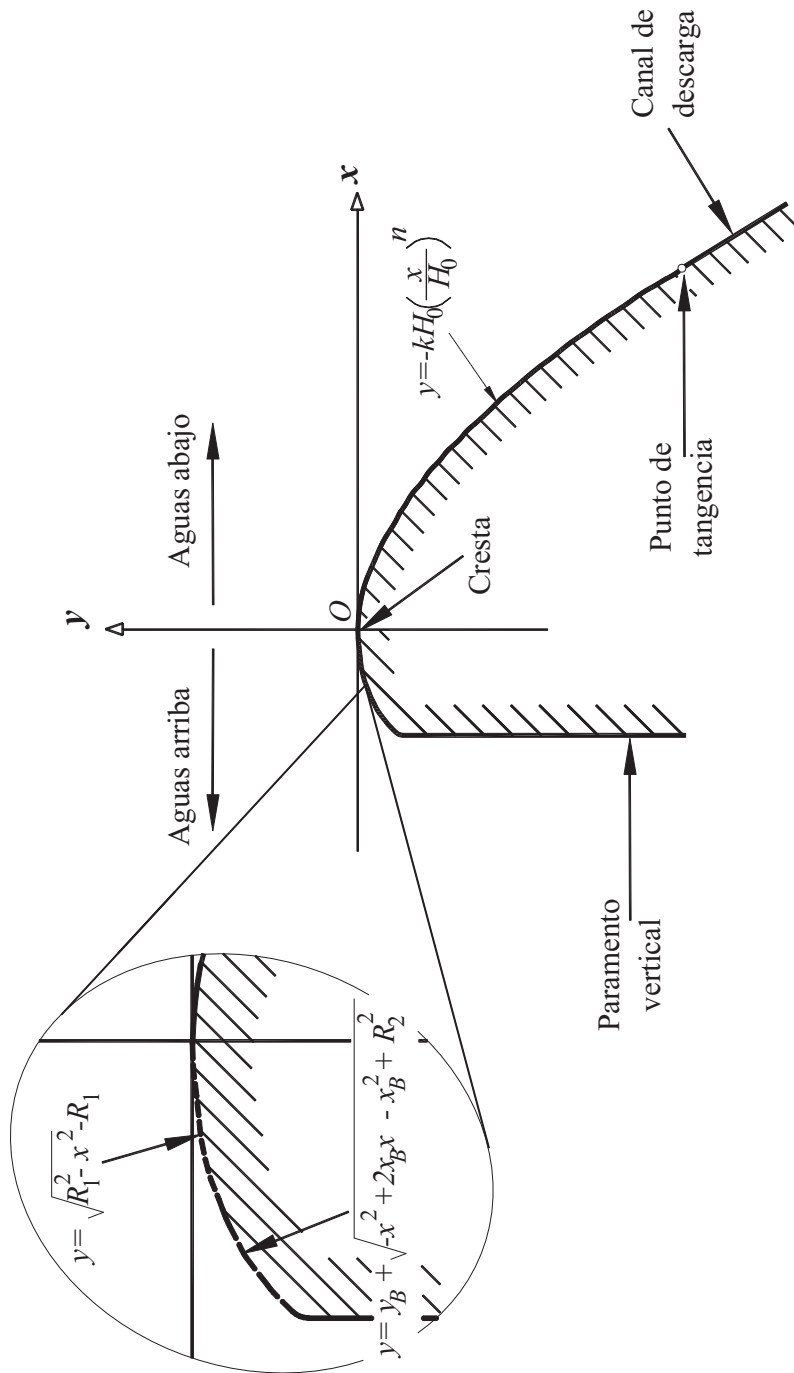


Figura 2.8: Perfil completo de un cimacio con las ecuaciones que lo describen