

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

**E.T.S. de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos y de
Ingeniería de Minas**



**MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES
Y PUERTOS (MUICCP)**

TRABAJO FIN DE MÁSTER

CURSO 2018-2019

EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE UN PROGRAMA BIDIMENSIONAL PARA ANALIZAR EL FUNCIONAMIENTO DE VERTEDEROS NO LINEALES TIPO LABERINTO

Autor: MERCEDES ROS CASAJÚS

Director: JOSÉ MARÍA CARRILLO SÁNCHEZ



ÍNDICE

1. Introducción.	1
2. Estudios previos.	5
2.1 Geometría del vertedero.....	5
2.2 Tipos de perfiles de vertedero.....	7
2.3 Estado del arte.....	9
3. Método numérico.	21
3.1 IBER.	21
3.1.1. Modelo hidrodinámico.	22
3.1.2. Modelo de turbulencia.	24
3.1.2. Condiciones de contorno.	25
3.1.3. Condiciones iniciales.....	27
3.1.4. Condiciones internas.....	28
3.1.5. Generación de la malla de cálculo.....	34
3.2 Desarrollo de la metodología empleada.....	36
4. Resultados.	59
4.1 Aliviaderos con descarga libre.....	59
Hipótesis 1.	59
Hipótesis 2.	69
Hipótesis 3.....	79
4.1.1. Comparación de hipótesis para vertederos en descarga libre.	89
4.1.2. Errores relativos y absolutos en descarga libre.	97
4.2 Aliviaderos con descarga sumergida.	114
Hipótesis 1.	114
Hipótesis 2.	116
5. Conclusiones.	119
6. Bibliografía.....	121





1. Introducción.

Una presa es una estructura que tiene por objeto contener el agua en un cauce natural con el fin de elevar su nivel para que pueda derivarse por una conducción y/o formar un depósito que retenga los excedentes para suministrarla en periodos de escasez o para laminar las puntas de las crecidas durante épocas de lluvias.

Se trata de una de las construcciones más antiguas que se conocen ya que el agua es un bien indispensable para el ser humano. Ante la necesidad, el hombre ha intentado almacenarla desde la prehistoria. Se conocen la existencia de estas obras desde las antiguas civilizaciones de Egipto, Mesopotamia, China y México, hasta llegar a la época del Imperio Romano, cuyas construcciones perduran hasta la actualidad en muchos lugares.

La presa retiene el agua para su uso. Requiere de desagües de explotación para controlar su utilización. Estos desagües se llaman tomas y pueden ser de varios tipos y posiciones. Junto a la explotación, aparece la necesidad de evacuar el agua sobrante de las avenidas para evitar desbordamientos que provocarían la inseguridad de la presa.

Un aliviadero es una estructura de desagüe que permite controlar el nivel de agua en obras hidráulicas cuando éstas han alcanzado su capacidad máxima. Su función es derivar, transportar y restituir al río en las debidas condiciones los caudales sobrantes en el embalse. Pueden ser de varios tipos.

Según su situación:

- Aliviaderos de superficie.
- Aliviaderos o desagües de medio fondo.
- Desagües de fondo.

Los aliviaderos de superficie son los encargados de la evacuación de avenidas, aunque se muestra una tendencia cada vez mayor a usar para ello los de fondo. Estos últimos son más utilizados para controlar el nivel del embalse, descargar sedimentos acumulados en el fondo, vaciar el embalse total o parcialmente etc. A su vez, los aliviaderos pueden estar integrados en la propia presa o estar situados sobre una ladera o collado.



Según el nivel de agua aguas abajo del aliviadero, pueden ser:

- Vertederos con descarga libre. Aquellos en los que el calado aguas abajo de la estructura no supera la altura del aliviadero.
- Vertederos con descarga sumergida. El nivel de agua aguas abajo del aliviadero excede la altura del mismo afectando a la descarga.

Según su régimen hidráulico, pueden ser de tres tipos:

- Aliviaderos en lámina libre. Son los más comunes por su sencillez.
- Aliviaderos en presión.
- Mixto. Suele consistir en un tramo en presión aguas arriba y el resto en lámina libre.

Desde el punto de vista de la geometría, los aliviaderos pueden ser:

- Lineales. Aquellos en los que la longitud de vertido corresponde al ancho del canal del vertedero. Dentro de esta clasificación estarían todas las soluciones tradicionales, en las que el vertedero sigue una línea recta o ligeramente curvada. Sin embargo, la capacidad de desagüe puede ser insuficiente al depender de la anchura disponible en la zona donde se sitúa el aliviadero.
- No lineales. Mayor longitud de vertedero para el mismo ancho que en las soluciones tradicionales al tomar formas poligonales. Por consiguiente aumenta también la capacidad de descarga manteniendo la simplicidad de la operación en vertido libre. Suelen estar compuestos por módulos. Un ejemplo de ellos son los aliviaderos tipo laberinto.

Independientemente de cual sea su posición, los aliviaderos constan de tres tramos sucesivos en el sentido del movimiento del agua.

- Embocadura o toma de agua. Obra destinada a desviar los caudales desde el embalse al aliviadero. Tramo importante desde el punto de vista de la seguridad, ya que, de su correcta concepción y proyecto depende la capacidad de desagüe del aliviadero.
- Conducción. Transporta el agua derivada desde la embocadura hasta el punto en el que se reintegra al río. En lámina libre se denomina rápida, y en ocasiones se aprovecha el paramento de la presa. Esta parte desaparece en el vertido en caída libre sobre la presa (presas arco, bóvedas, etc.).



- Reintegro al cauce. Obra situada al final de la conducción, cuyo objetivo es hacer que la restitución al río se haga en condiciones adecuadas para que la energía cinética que adquiere el agua al descender desde el nivel de embalse se disipe sin daños en el cauce.

Los tres tramos han de proyectarse coordinadamente para que, con un funcionamiento hidráulico correcto, sean capaces de derivar, transportar y devolver al cauce los caudales tomados desde el embalse. Cada una tiene una función hidráulica específica y un modo diferente de influir en la seguridad de la presa.

Las embocaduras pueden ser, teniendo en cuenta su posición y régimen hidráulico:

- Superficiales, en régimen libre.
- Sumergidas, en régimen en presión.

En cuanto a la posibilidad de control de los caudales, la toma puede ser:

- Con vertedero de labio fijo, vertido natural automático.
- Con compuertas, que permiten desaguar a voluntad.

El reintegro al río puede ser mediante:

- Trampolín de lanzamiento. Lanza el agua a una determinada distancia para alejar la zona de caída y de posible erosión.
- Cuenco amortiguador. Usado normalmente al pie de una presa vertedero. Utilizan el resalto hidráulico para disipar parte de la energía del agua.

En la actualidad, la necesidad de recrecimiento o aumento de los márgenes de seguridad de las presas ya existentes ha hecho de los aliviaderos tipo laberinto soluciones de gran interés, puesto que permiten aumentar la capacidad de desagüe para sobreelevaciones reducidas y precisan de menor espacio para la descarga de caudales. También son adecuadas para situaciones donde la altura máxima disponible es reducida.

En planta presentan una morfología en forma de “zigzag”, aumentando la longitud de vertedero en un mismo ancho y, por lo tanto, su capacidad hidráulica. Aunque no todo son ventajas, este tipo de aliviadero presenta algunas limitaciones; por un lado, ocupa mucho espacio en planta y esto dificulta su implementación, por otro lado, debido a su forma se incrementan las cargas hidrodinámicas sobre los muros de hormigón necesitando más cantidad de acero, lo que encarece su ejecución.



En este estudio se analizan y comparan los coeficientes de descarga en flujo en descarga libre para aliviaderos en laberinto obtenidos por Crookston y Tullis (2013), en un conocido programa de análisis bidimensional para la simulación del flujo de superficie libre. Posteriormente se analizan estos resultados en descarga sumergida comparando con la investigación de Tullis et al. (2007).

2. Estudios previos.

2.1 Geometría del vertedero.

Existen infinidad de posibles configuraciones geométricas para vertederos no lineales. Como clasificación general, basada en la forma del ciclo de sus módulos, podemos identificar tres opciones: triangular o pico de pato (A), trapezoidal o en laberinto (B) y rectangular o en tecla de piano (C). En la siguiente figura se muestran las geometrías.

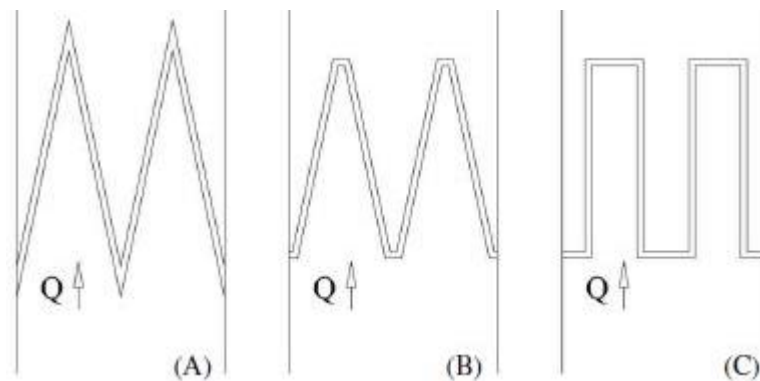


Figura 1. Clasificación general de vertederos no lineales. Fuente: Crookston (2010).

Los vertederos en laberinto cuentan con módulos trapezoidales. Los parámetros que definen su estructura han sido desarrollados en estudios anteriores y son los siguientes:

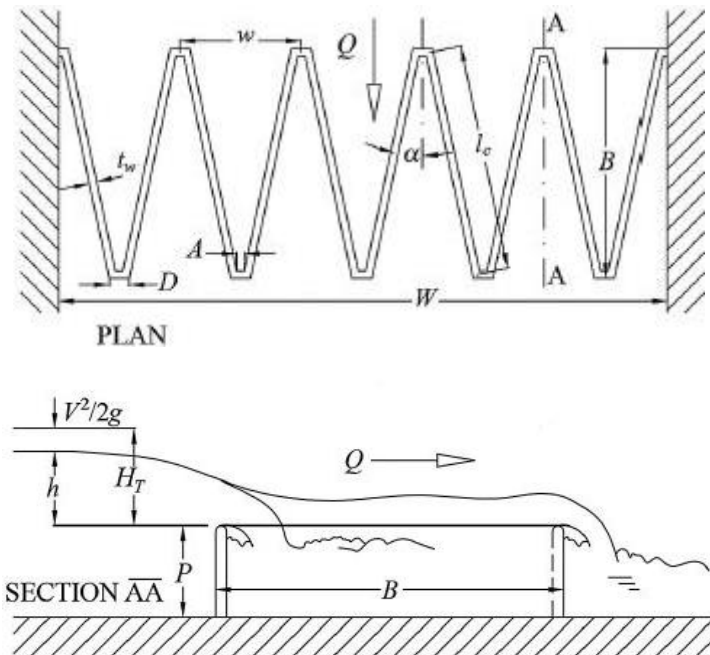


Figura 2. Esquema vertedero tipo laberinto. Fuente: Crookston y Tullis (2013).

Las variables indicadas en la Figura 2 son:

w : Ancho del módulo del aliviadero.

N : Número de módulos que componen el aliviadero.

W : Ancho del canal. ($W = Nw$).

A : Ancho interno de la pared frontal. Se recomienda que $A \sim t_w$.

D : Ancho externo de la pared frontal. $D = A + 2t_w \tan \frac{(45-\alpha)}{2}$

B : Longitud del aliviadero en dirección del flujo. $B = \left[\frac{L_c}{2N} - \frac{(A+D)}{2} \right] \cos(\alpha) + t_w$

α : Ángulo de inclinación de la pared lateral (en planta).

P : Altura del vertedero. Se recomienda que $P \sim H_T$.

t_w : Espesor del vertedero. Los autores recomiendan un valor $t_w \approx P/8$.



h : Altura piezométrica aguas arriba del vertedero.

l_c : Longitud de la línea central de la pared lateral, $l_c = (B - t_w) / \cos \alpha$.

L_c : Longitud total de la línea central del vertedero, $L_c = N(2l_c + A + D)$.

H_T : Carga total de agua medida desde la altura del vertedero, $H_T = h + \frac{v^2}{2g}$.

2.2 Tipos de perfiles de vertedero.

Existen distintos tipos de perfiles de cresta para vertederos tipo laberinto, los más utilizados son:

- “*Sharp Crest*” o cresta afilada. Perfil con el borde aguas arriba en 90 grados al que se elimina el borde inferior creando una pendiente en el sentido del flujo.
- “*Flat Top*” o perfil plano. Los dos bordes permanecen en 90 grados formando un rectángulo.
- “*Quarter Round*” o cuarto de círculo. Perfil con el borde aguas arriba redondeado.
- “*Half Round*” o medio círculo. Perfil con ambos bordes redondeados creando un semicírculo.
- “*Nappe Profile*” o perfil en lámina libre. El aliviadero toma la forma de la lámina de agua.

Cada uno de estos perfiles tiene sus peculiaridades que afectan directamente en la descarga del agua, modificando el coeficiente de descarga. Dado que es más común utilizar estos términos en lengua inglesa, en adelante nos referiremos a ellos de esta manera. En la figura 3 se muestran los perfiles explicados.

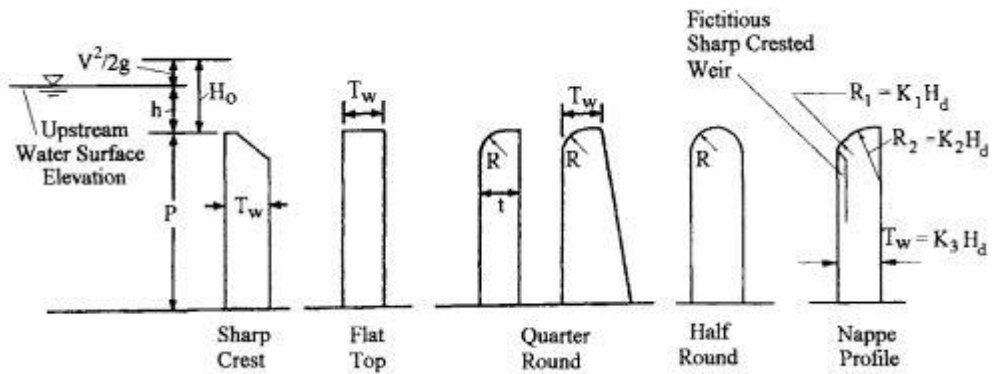


Figura 3. Tipos de perfiles utilizados para vertederos en laberinto. Fuente: Henry T. Falvey. “*Hydraulic Design of labyrinth weirs*”.

Los perfiles redondeados son más eficientes hidráulicamente ya que permiten que la lámina de agua se adhiera a la cara aguas abajo del aliviadero cuando la carga total sobre el vertedero es baja, como se observa en la figura 4.

Por razones constructivas, los perfiles más empleados son “*Half-Round*” y “*Quarter-Round*”.

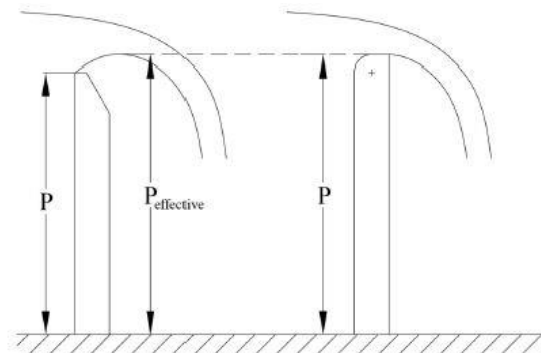


Figura 4. Lámina de agua en la descarga del vertedero. Fuente: Crookston (2010).



2.3 Estado del arte.

Según Cordero Page et al. (2007). los primeros estudios de presas con vertedero en laberinto datan del año 1941, en Australia donde se construyó un aliviadero de estas características en la presa de Woronora. Después, se realizaron los aliviaderos de las presas de Skelton en Reino Unido, River Belia en el Congo y Beni Bahdel en Argelia aunque no se conocen las teorías o estudios en los que se basaron.

A finales de los años 60, la agencia Bureau of Reclamation emprende una serie de investigaciones que finalizan con la publicación de la tesis doctoral de G.Taylor: “*The performance of labyrinth weirs*” en 1968 y la investigación de Hay y Taylor (1970), que presenta una guía de parámetros para el diseño basada en la investigación de Taylor (1968) para vertederos en laberinto triangulares y trapezoidales de cresta delgada. A su vez, en Australia con motivo de la construcción de la presa de Avon, y basándose en Woronora, la Metropolitan Water Severage And Drainage Board (MWS&DB), realiza una serie de investigaciones que concluyen con la publicación de Darvas (1971), en la que simplifica el diseño de los vertederos tipo laberinto al introducir una ecuación empírica para el caudal de descarga y un coeficiente de descarga para obtener las curvas de capacidad de la estructura. Ambas líneas de investigación constituyen la base de los procedimientos actuales de diseño y estudio de este tipo de estructuras hidráulicas. El Bureau of Reclamation ha ido corrigiendo y mejorando la guía realizada por Hay y Taylor, y otros ingenieros, han retomado los estudios de Darvas para elaborar nuevos procedimientos de diseño.

Los modelos físicos han demostrado ser muy útiles en el diseño y análisis de geometrías específicas de los aliviaderos en laberinto, y los métodos de diseño hidráulico permiten estimar el rendimiento de la descarga para este tipo de vertedero.

Los estudios de este tipo de vertederos se han centrado principalmente en el análisis del coeficiente de descarga. La relación entre la carga sobre vertedero y el caudal se ha descrito en diversas ecuaciones empíricas. Estas relaciones varían en función de cómo se definan sus parámetros (coeficiente de descarga, longitud característica del vertedero, carga total aguas arriba del aliviadero, etc.).

Tullis et al. (1995), desarrollan un método de diseño basado en la ecuación general de vertederos [Ec.1] en el que utilizan una longitud efectiva del vertedero, Le , como longitud característica del vertedero (L).

$$Q = \frac{2}{3} C_{d(\alpha^\circ)} L \sqrt{2g} H_T^{3/2} \quad (\text{Ec.1})$$

También presentan un programa de diseño en hojas de cálculo que calcula automáticamente las dimensiones del laberinto para ángulos entre 6° y 35° . Posteriormente se realizan investigaciones que dan lugar a discrepancias y cambios en el método.

Crookston y Tullis (2013) presentan un método de análisis y diseño hidráulico, basado en resultados experimentales de ensayos realizados sobre un canal en laboratorio. Proporcionan una nueva visión sobre el rendimiento y funcionamiento de los vertederos tipo laberinto y mejoran las herramientas de evaluación y diseño disponibles hasta el momento. El programa de diseño es similar al de Tullis et al. (1995), pero permite establecer un ancho de canal, W , y una longitud, B .



Figura 5. Aliviadero tipo laberinto con perfil “Half-Round”, $\alpha = 12^\circ$ y $HT/P = 0.196$ utilizado por Crookston en su investigación. Fuente: Crookston (2010).

El modelo físico (Crookston, 2010) se realizó con un canal rectangular (1.2x14.6x1.0 m) de paredes acrílicas y un aliviadero de 0.3048 metros de altura, de dos módulos fabricado con polietileno de alta densidad. Se realizaron mediciones para aliviaderos con ángulos entre 6° y

35° con perfiles denominados “*Half-Round*”, perfil con ambos bordes redondeados, y “*Quarter-Round*”, perfil con el borde aguas arriba redondeado. La orientación del aliviadero en el canal puede ser normal (con los vértices de los estribos hacia aguas arriba) o inversa (vértices hacia aguas abajo) puesto que según las pruebas realizadas por los autores, la orientación no afecta a los resultados.

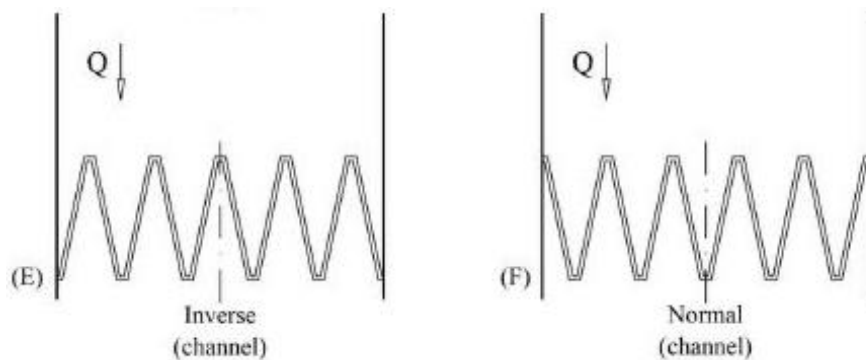


Figura 6. Orientación del vertedero en el canal. Fuente: Crookston (2010).

El objetivo de Crookston y Tullis era determinar el coeficiente de descarga para vertederos tipo laberinto de diferentes ángulos. Partiendo de la ecuación tradicional de descarga en vertederos [Ec.1], realizan distintas mediciones, variando el caudal y la carga sobre vertedero, para cada uno de los ángulos de estudio. Los valores de los coeficientes de descarga se presentan en función de la relación carga total de agua sobre vertedero y altura de vertedero, H_T/P , para cada uno de los ángulos medidos en las Figuras 7 y 8. Para mayor comodidad, los datos de $C_d(\alpha^\circ)$ se ajustaron a la curva según la Ecuación 2 [Ec.2], cuyos coeficientes se presentan en las Tablas 1 y 2.

$$C_{d(\alpha^\circ)} = a \left(\frac{H_T}{P} \right)^b \left(\frac{H_T}{P} \right)^c + d \quad (\text{Ec.2})$$

La Ecuación 3 [Ec.3] se utilizó para estudiar el aliviadero lineal ($\alpha = 90^\circ$) y los coeficientes correspondientes se presentan también en las Tablas 1 y 2.

$$C_{d(90^\circ)} = \frac{1}{a + b \frac{H_T}{P} + \frac{c}{H_T/P}} + d \quad (\text{Ec.3})$$

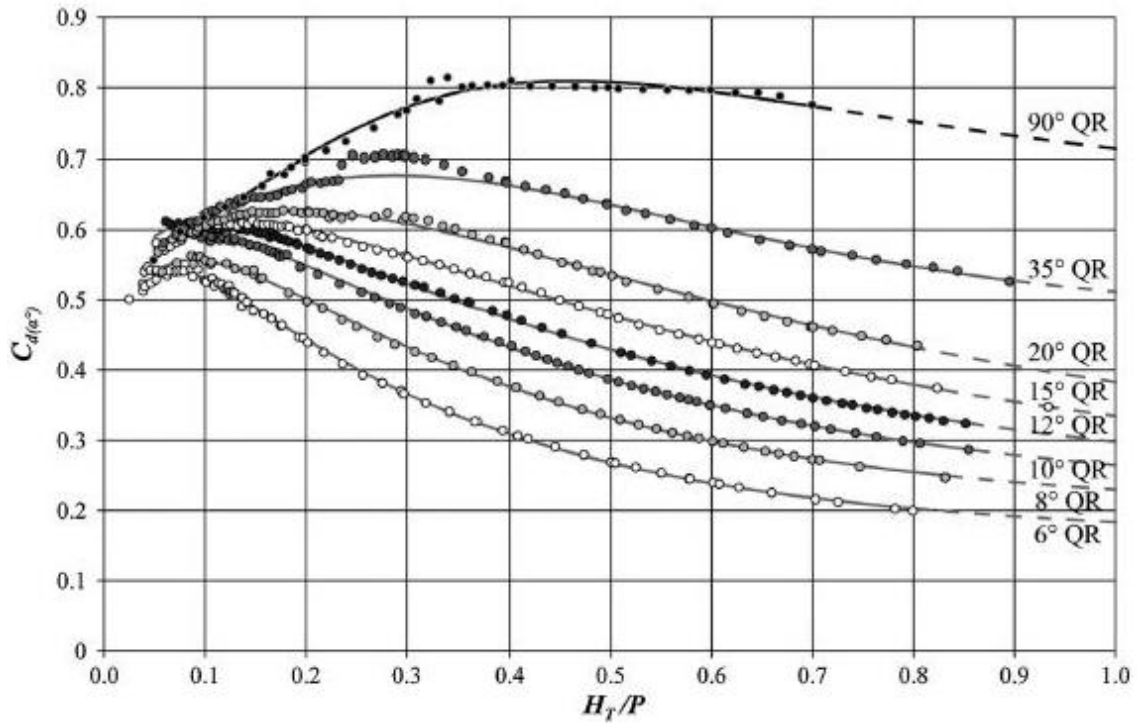


Figura 7. Valores de C_d frente H_T/P para perfil de vertedero “Quarter-Round”. Fuente: Crookston y Tullis (2013).

α	a	b	c	d
6°	0.02623	-2.681	0.3669	0.1572
8°	0.03612	-2.576	0.4104	0.1936
10°	0.06151	-2.113	0.4210	0.2030
12°	0.09303	-1.711	0.4278	0.2047
15°	0.10890	-1.723	0.5042	0.2257
20°	0.11130	-1.889	0.5982	0.2719
35°	0.03571	-3.760	0.7996	0.4759
90°	-2.3800	6.476	1.3710	0.5300

Tabla 1. Coeficientes de ajuste de la curva para vertederos tipo laberinto con perfil “Quarter-Round” y aliviaderos lineales. Fuente: Crookston y Tullis (2013).

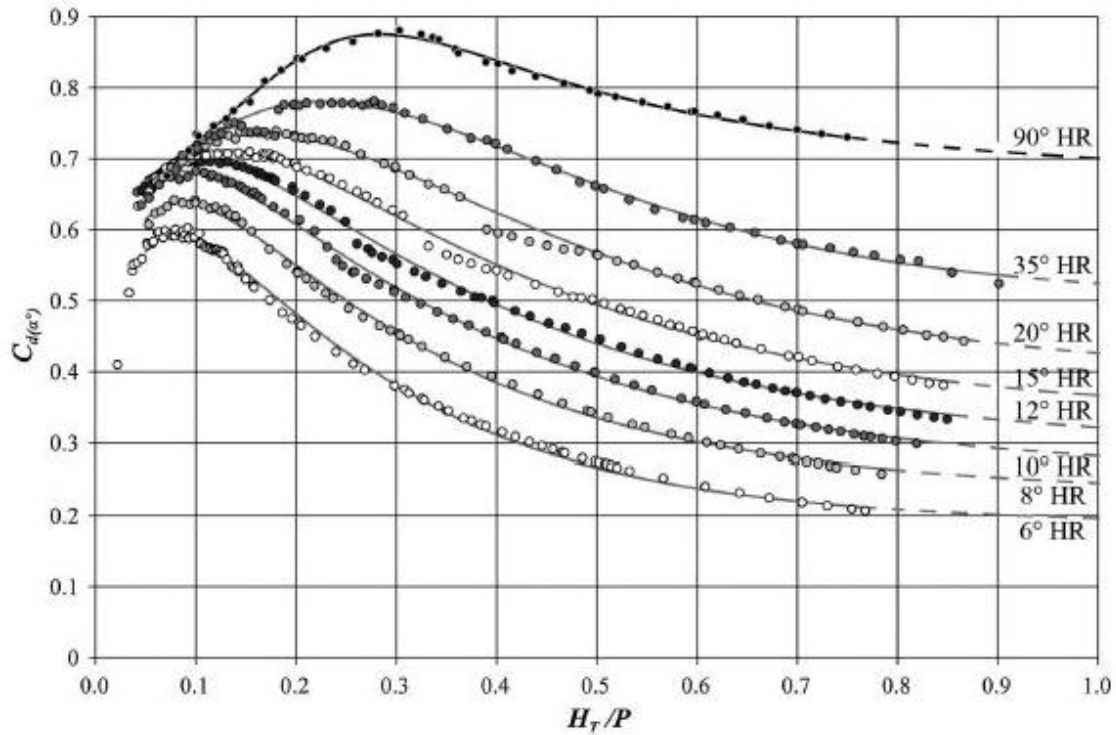


Figura 8. Valores de C_d frente H_T/P para perfil de vertedero “Half-Round”. Fuente: Crookston y Tullis (2013).

α	a	b	c	d
6°	0.009447	-4.039	0.3955	0.1870
8°	0.017090	-3.497	0.4048	0.2286
10°	0.029900	-2.978	0.4107	0.2520
12°	0.030390	-3.102	0.4393	0.2912
15°	0.031600	-3.270	0.4849	0.3349
20°	0.033610	-3.500	0.5536	0.3923
35°	0.018550	-4.904	0.6697	0.5062
90°	-8.60900	22.650	1.8120	0.6375

Tabla 2. Coeficientes de ajuste de la curva para aliviaderos en laberinto con perfil “Half-Round” y vertederos lineales. Fuente: Crookston y Tullis (2013).

Estas obras hidráulicas se suelen realizar para condiciones de flujo con descarga libre, en las que el calado de aguas abajo de la estructura es inferior a la altura del aliviadero.

En un vertedero con descarga libre la relación entre la altura de vertedero y la descarga se rige principalmente por su geometría y las condiciones de flujo de aproximación. Por el contrario, cuando la altura del agua, aguas abajo del aliviadero, excede a la elevación de este se produce un funcionamiento en descarga sumergida.

Respecto a la sumergencia de los aliviaderos, se han desarrollado varias investigaciones que describen sus efectos en vertederos lineales, pero no existen tantas investigaciones sobre vertederos en laberinto. En el año 2007, Tullis et al. retomaron los estudios realizados por Taylor (1968) que anteriormente había desaconsejado esta opción.

Con base en la fórmula y resultados de Villemonte (1947) [Ec.4], se desarrolla una nueva relación adimensional para vertederos sumergidos lineales y en laberinto. En la Figura 9 se muestran los parámetros del vertedero sumergido y en descarga libre utilizados por Tullis et al. (2007).

$$\frac{Q_s}{Q_l} = \left(1 - \frac{h_d^{3/2}}{h^{*3/2}} \right)^{0.385} \quad (\text{Ec.4})$$

donde Q_s/Q_l es un factor de reducción del caudal del aliviadero lineal que compara los caudales del vertedero lineal sumergido con el no sumergido para el mismo calado aguas arriba de la estructura. (Vea Figura 10).

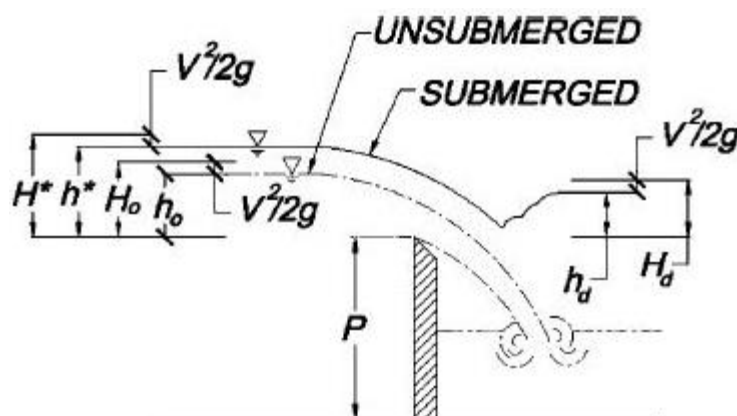


Figura 9. Parámetros aliviadero sumergido y en descarga libre. Fuente: Tullis (2007).

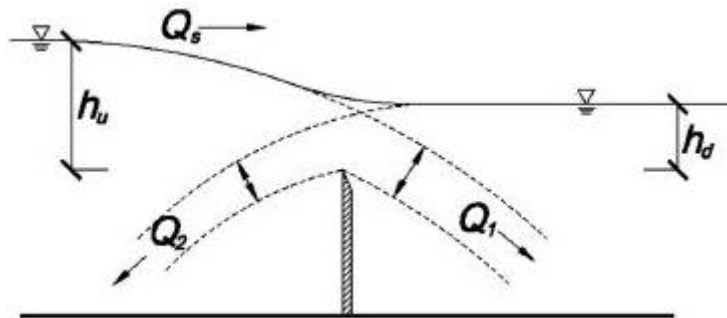


Figura 10. Suposición de la superposición de flujo del aliviadero sumergido descrita por Villemonte en la ecuación 4. Fuente: Villemonte (1947).

En los ensayos de vertederos tipo laberinto se usaron tres vertederos con ángulos de 7, 8 y 20°, fabricados con polietileno de alta densidad. Cada vertedero tenía con una altura de 31 cm aproximadamente, formado por dos módulos y perfil redondeado aguas arriba y aguas abajo (“*Half-Round*”). Las geometrías del laberinto se determinaron variando el ángulo de la pared lateral y manteniendo un ancho de ciclo constante, w . Las mediciones del nivel de agua fueron realizadas para diferentes caudales con calibradores de presión montados a una distancia $3.5P$ aguas arriba del aliviadero y $5-9P$ aguas abajo del mismo.

Se calculó la relación Q_s/Q_l en cada prueba y se comparó con los resultados pronosticados por la ecuación 4 (Figura 11). Los resultados experimentales fueron analizados comparando las cargas totales aguas arriba, H^* y aguas abajo, H_d , normalizadas con la carga total aguas arriba bajo condiciones de descarga libre, H_o (Figura 12).

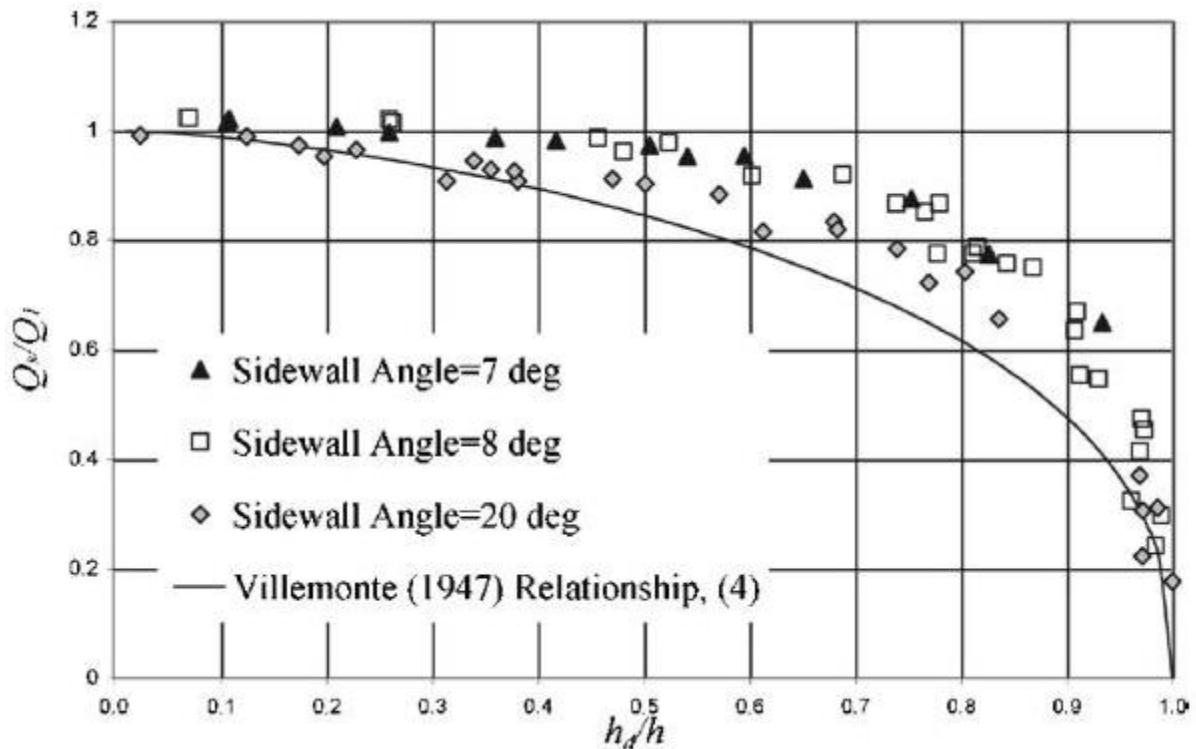


Figura 11. Comparación resultados experimentales obtenidos por Tullis et al. con los datos de Villemonte (1947). Fuente: Tullis et al. (2007).

En la Figura 12 observamos que cuando la relación H_d/H_o tiende a cero, la carga total aguas abajo del vertedero se aproxima a la altura del aliviadero, P , y la carga aguas arriba bajo los efectos de la sumergencia, H^* , tiende a igualar a la carga total aguas arriba en descarga libre, es decir $H^*/H_o = 1$. Cuando, H_d/H_o aumenta, el valor de H^*/H_o se aproxima a la línea de ángulo de 45° . Cuando los datos coinciden con la línea de ángulo de 45° , la carga aguas arriba será igual a la de aguas abajo.

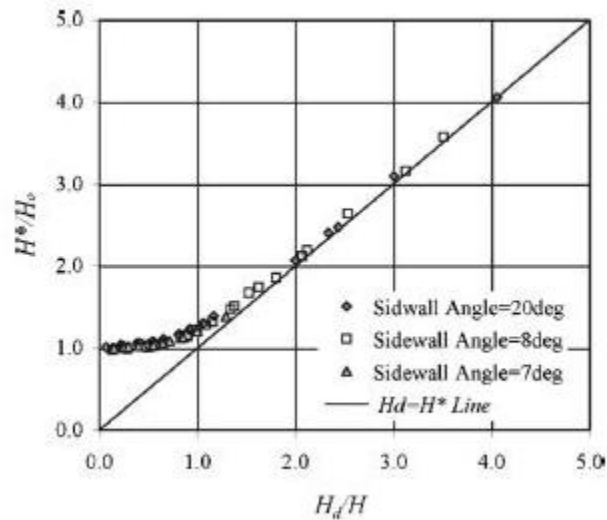


Figura 12. Relación adimensional carga total aguas arriba frente a la carga total aguas abajo para descarga sumergida. Fuente: Tullis et al. (2007).

Tullis et al. (2007) establecieron tres funciones para ajustar la curva de la Figura 12 a una ecuación, ya que con un solo ajuste no se conseguía suficiente precisión a los datos experimentales. Las ecuaciones para descarga sumergida en vertederos tipo laberinto son:

Para $0 \leq \left(\frac{H_d}{H_o}\right) \leq 1.53$:

$$\frac{H^*}{H_o} = 0.0332 \left(\frac{H_d}{H_o}\right)^4 + 0.2008 \left(\frac{H_d}{H_o}\right)^2 + 1 \quad (\text{Ec.5})$$

Para $1.53 \leq \left(\frac{H_d}{H_o}\right) \leq 3.5$:

$$\frac{H^*}{H_o} = 0.9379 \left(\frac{H_d}{H_o}\right) + 0.2174 \quad (\text{Ec.6})$$

Para $3.5 \leq \left(\frac{H_d}{H_o}\right)$:

$$H^* = H_d \quad (\text{Ec.7})$$

Otra alternativa al diseño en laberinto son los vertederos en tecla de piano, denominados también PK, por sus siglas en inglés “*Piano Key*”. Al igual que los vertederos en laberinto, este tipo de vertedero también aumenta la capacidad de descarga al tener mayor longitud de vertido (ventaja que se perderá si el calado aguas arriba aumenta considerablemente). Visto en planta, está formado por módulos rectangulares. En alzado, a diferencia de los aliviaderos en laberinto, las paredes del vertedero están inclinadas tanto aguas arriba como aguas abajo de la estructura. Esta última hace que su uso sea más eficaz cuando el espacio disponible para la estructura de control es limitado, ya que requiere de menor cimentación que el vertedero tipo laberinto. En la Figura 13 se aprecian las diferencias entre los tipos de aliviaderos no lineales.

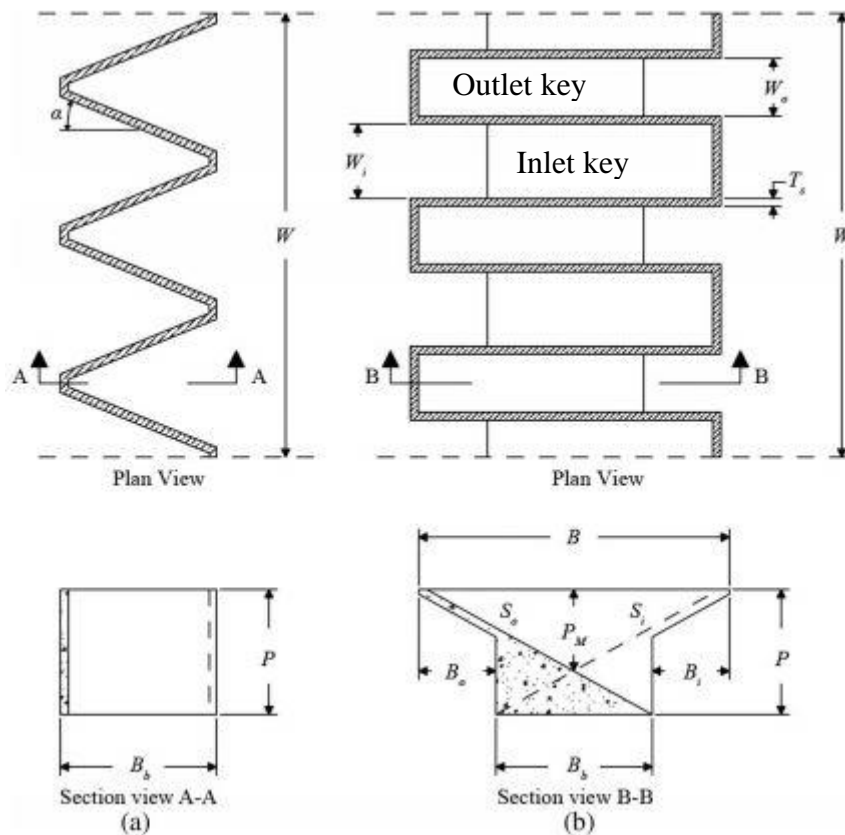


Figura 13. Geometría del aliviadero en laberinto (A) y en tecla de piano (B). Fuente: Anderson (2013).

En el estudio realizado por Paxson et al. (2013), se comparan costes de construcción de un aliviadero en laberinto de dos módulos con ángulo de 12° con un aliviadero PK de cuatro teclas y características de descarga similares. Se afirma que la cimentación y la base del vertedero en tecla de piano es menor que en laberinto. El costo estimado del vertedero PK es un 45% menor que el costo estimado para el vertedero en laberinto.

Paxson et al. (2013) también compararon el rendimiento hidráulico de ambos tipos de aliviadero usando el concepto de eficiencia introducido por Crookston y Tullis (2013). La eficiencia de ciclo representa la descarga por ciclo o módulos que componen el aliviadero ($\mathcal{E}' = C_d(\alpha^0) * (L_{ciclo}/W)$). En la Figura 14 se muestra esta comparación para aliviaderos en laberinto con el borde redondeado aguas arriba (*Quarter-Round*) y ángulos entre 10° y 20° . El aliviadero PK tiene una relación ancho de tecla de entrada (W_i) y salida (W_o) de 1.25 (1.25PK) y la relación entre la longitud total del vertedero y el ancho del canal, L/W es de 5.1. Los vertederos en laberinto tienen una relación L/w de 4.8 para el de 10° y $L/W = 2.5$ para el de 20° . La gráfica muestra la eficiencia del aliviadero 1.25PK a bajas relaciones de H_T/P . Para relaciones de H_T/P superiores a 0.4 aproximadamente, la eficiencia se asemeja a la de un vertedero tipo laberinto con paredes laterales a 15° , por lo que tendrá una capacidad de descarga similar a este.

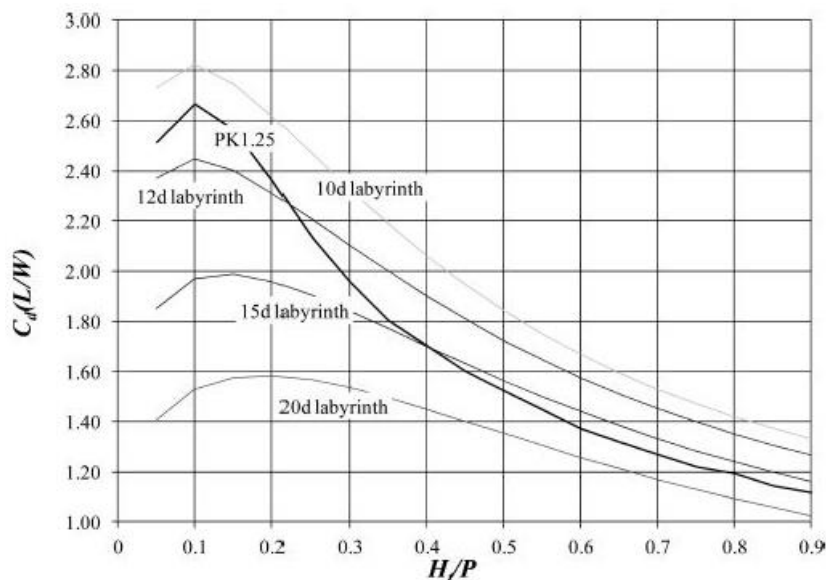


Figura 14. Eficiencia de ciclo frente a la relación H_i/P para aliviaderos en laberinto, “Quarter-Round” y en PK. Fuente: Paxson et al. (2013).





3. Método numérico.

Partiendo de los resultados obtenidos por Crookston y Tullis (2013), en este trabajo se analizan los coeficientes de descarga en descarga libre para vertederos no lineales tipo laberinto con ángulos entre 6 y 35° utilizando el programa IBER, un software bidimensional para la simulación de flujo en lámina libre. Para la descarga sumergida, se analiza el estudio realizado por Tullis et al. (2007).

El objetivo es comprobar la capacidad de este programa para resolver vertederos no lineales, y proponer alternativas o mejoras que permitan su simulación.

3.1 IBER.

Iber es un modelo matemático bidimensional para la simulación hidráulica, desarrollado por el grupo de Ingeniería Ambiental y del Agua (GEAMA) de la Universidad de A Coruña, el Instituto Flumen de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), y el Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE). La herramienta combina diferentes módulos: hidrodinámico, turbulencia, transporte de sedimentos, calidad del agua, procesos hidrológicos y hábitat, y utiliza el método de volúmenes finitos para resolver las ecuaciones correspondientes.

En este trabajo se emplearán el módulo hidrodinámico y el de turbulencia. Al módulo de cálculo se le ha adaptado una interfaz que se basa en el software de preproceso y postproceso GiD.

Se entiende por preproceso todos los trabajos necesarios para generar un modelo apto para ser ejecutado. Para esto, Iber dispone de una serie de menús y herramientas de gran utilidad. Finalizado el cálculo, o durante el mismo, se puede acceder al postproceso para visualizar y analizar los resultados.



3.1.1. Modelo hidrodinámico.

El módulo hidrodinámico, en el que nos vamos a centrar, resuelve las ecuaciones de Saint Venant bidimensionales [Ec.8, Ec.9 y Ec.10], incorporando los efectos de la turbulencia y posible rozamiento superficial por viento. Dichas ecuaciones asumen una distribución uniforme de presión hidrostática y una distribución relativamente uniforme de la velocidad en profundidad del agua. La suposición de presión hidrostática se satisface en ríos y en corrientes de marea en estuarios no estratificados. La hipótesis de la distribución uniforme de la velocidad generalmente se cumple en ríos y estuarios, siempre que no existan procesos de estratificación relevantes debidos a diferencias en salinidad, temperatura o viento.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0 \quad (\text{Ec.8})$$

$$\frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_x^2}{h} + g \frac{h^2}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_x q_y}{h} \right) = -gh \frac{\partial z_b}{\partial x} - \frac{\tau_{b,x}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x} \left(v_t h \frac{\partial U_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_t h \frac{\partial U_x}{\partial y} \right) \quad (\text{Ec.9})$$

$$\frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_x q_y}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_y^2}{h} + g \frac{h^2}{2} \right) = -gh \frac{\partial z_b}{\partial y} - \frac{\tau_{b,y}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x} \left(v_t h \frac{\partial U_y}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_t h \frac{\partial U_y}{\partial y} \right) \quad (\text{Ec.10})$$

El modelo hidrodinámico resuelve las ecuaciones de conservación de masa y cantidad de movimiento en las dos direcciones horizontales, tal y como se muestran en las siguientes ecuaciones que ofrece el Manual de referencia hidráulica de IBER.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h U_x}{\partial x} + \frac{\partial h U_y}{\partial y} = M_s \quad (\text{Ec.11})$$

$$\frac{\partial h U_x}{\partial t} + \frac{\partial h U_x^2}{\partial x} + \frac{\partial h U_x U_y}{\partial y} = -gh \frac{\partial Z_s}{\partial x} + \frac{\tau_{s,x}}{\rho} - \frac{\tau_{b,x}}{\rho} - \frac{g h^2}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} + 2\Omega \sin \lambda U_y + \frac{\partial h \tau_{xx}^e}{\partial x} + \frac{\partial h \tau_{xy}^e}{\partial y} + M_x \quad (\text{Ec.12})$$



$$\frac{\partial h U_y}{\partial t} + \frac{\partial h U_x U_y}{\partial x} + \frac{\partial h U_y^2}{\partial y} = -gh \frac{\partial Z_s}{\partial y} + \frac{\tau_{s,y}}{\rho} - \frac{\tau_{b,y}}{\rho} - \frac{g h^2}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial y} - 2\Omega \sin \lambda U_x + \frac{\partial h \tau_{xy}^e}{\partial x} + \frac{\partial h \tau_{yy}^e}{\partial y} + M_y \quad (\text{Ec.13})$$

donde h es el calado, U_x , U_y son las velocidades horizontales promediadas en profundidad, g la aceleración de la gravedad, Z_s la elevación de la lámina libre, τ_s la fricción en la superficie libre debida al rozamiento producido por el viento, τ_b la fricción debida al rozamiento del fondo, ρ la densidad del agua, Ω la velocidad angular de rotación de la tierra, λ es la latitud del punto considerado, τ_{xx}^e , τ_{yy}^e , τ_{xy}^e son las tensiones tangenciales efectivas horizontales, y M_s , M_x , M_y son términos fuente/sumidero de masa y momento, mediante la cual se realiza la modelización de precipitación, infiltración y sumideros.

Los términos fuente incluidos en las ecuaciones hidrodinámicas son:

- Presión hidrostática.
- Pendiente de fondo.
- Tensiones tangenciales viscosas y turbulentas
- Rozamiento del fondo.
- Rozamiento superficial por viento.
- Precipitación
- Infiltración.

La fuerza de rozamiento realizada por el viento sobre la superficie libre se puede calcular a partir de la velocidad del viento a 10 metros de altura y un coeficiente de arrastre, utilizando la ecuación de Van Dorn, [Ec.14]:

$$\tau_s = \rho C_{vd} V_{10}^2 \quad [\text{Ec.14.}]$$

donde ρ es la densidad del agua, V_{10} la velocidad del viento a 10 metros de altura y C_{vd} el coeficiente de arrastre superficial que por defecto toma un valor de $2.5 \cdot 10^{-6}$.

La fricción con el fondo tiene un doble efecto en las ecuaciones de flujo. Por un lado produce una fuerza de fricción que se opone a la velocidad media. Y por otro lado, produce turbulencia.



El fondo ejerce una fuerza de rozamiento sobre el fluido que es equivalente al rozamiento con una pared, con la particularidad de que, en general, en ingeniería hidráulica la rugosidad del fondo es elevada. Se evalúa mediante la fórmula de Manning que utiliza el siguiente coeficiente de rugosidad.

$$C_f = g \frac{n^2}{h^{1/3}} \quad (\text{Ec.15})$$

La cual utiliza el coeficiente de Manning, n , como parámetro. Cuanto más alto es el valor del coeficiente, mayor es la rugosidad de la superficie de contacto.

3.1.2. Modelo de turbulencia.

En cuanto al módulo de turbulencia Iber incluye cuatro modelos, lo que permite seleccionar el más adecuado en cada caso de estudio teniendo en cuenta la complejidad del flujo y del modelo. Los modelos son:

- **Viscosidad turbulenta constante.** El orden de magnitud de la viscosidad turbulenta se puede fijar de forma aproximada en función del flujo considerado. Este enfoque es muy sencillo y no se puede considerar como un modelo de turbulencia adecuado ni realista en ningún caso, ya que no tiene en cuenta que la viscosidad turbulenta varía fuertemente de un punto a otro.
- **Modelo parabólico.** Asume una distribución parabólica en profundidad de la viscosidad turbulenta, calculándose a partir de dicha distribución una viscosidad promediada en profundidad. Debido a la sencillez del modelo, a veces se utiliza un coeficiente multiplicador para permitir ajustar mejor el valor de la viscosidad turbulenta.
- **Modelo de longitud de mezcla.** Modelo algebraico relativamente sencillo, que permite obtener resultados aceptables en flujos en los que la turbulencia está generada localmente y principalmente por el rozamiento del fondo. En flujos con zonas de recirculación fuertes los resultados obtenidos con este modelo empeoran.
- **Modelo k - ϵ de Rastogi y Rodi.** Se trata de un modelo relativamente sofisticado. Resuelve una ecuación de transporte de energía cinética turbulenta k para la tasa de



disipación de energía turbulenta \mathcal{E} . En flujos turbulentos poco-profundos proporciona resultados buenos, siendo uno de los modelos más utilizados en dicho ámbito cuando el nivel de turbulencia es importante. Aunque, su grado de complejidad no garantiza resultados correctos en cualquier tipo de flujo.

En general el modelo de longitud de mezcla proporciona resultados satisfactorios en ríos y estuarios. En estructuras hidráulicas como canales en lámina libre con codos pronunciados y zonas de recirculación, suele ser necesario utilizar por lo menos un modelo de longitud de mezcla o un modelo k - \mathcal{E} . La elección de uno u otro depende del usuario, teniendo en cuenta que cuanto más complejo es el modelo, más compleja es la resolución de las ecuaciones y mayor es el tiempo de cálculo. El modelo empleado en este trabajo es el modelo k - \mathcal{E} .

El objetivo de los modelos de turbulencia es proporcionar la viscosidad turbulenta (ν_t) necesaria para calcular las tensiones de Reynolds. En los modelos utilizados por Iber, las tensiones de Reynolds se evalúan con la siguiente expresión:

$$-\overline{u_i u_j} = \nu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (\text{Ec.20})$$

3.1.2. Condiciones de contorno.

En un problema bidimensional es necesario distinguir entre dos tipos de contornos: abiertos y cerrados. Los contornos cerrados, llamados también de tipo pared, son impermeables, no permitiendo el paso de fluido a través de ellos. Su presencia genera una fuerza de rozamiento lateral en el fluido, similar a la fricción ejercida por el rozamiento del fondo. Las condiciones de contorno tipo pared que se pueden imponer son:

- Condición de deslizamiento libre. Equivale a despreciar la tensión de rozamiento generada por los contornos tipo pared sobre el fluido (tensión tangencial nula).
- Condición de fricción de pared. Funciones de pared.



En general en ingeniería hidráulica, y especialmente en ingeniería fluvial, la superficie de contacto con los contornos laterales es mucho menor que en la superficie de contacto con el fondo debido a la separación entre escalas horizontal y vertical, por lo que la fuerza de rozamiento en los contornos de pared se puede despreciar. En este caso se impondría una condición de deslizamiento libre en los contornos cerrados. Cuando la dimensión horizontal y vertical son similares, (canales de sección muy estrecha) esta fuerza de rozamiento puede tener cierta importancia en el desarrollo del flujo, aunque, por lo general la influencia es pequeña.

Si se quiere tener en cuenta el efecto del rozamiento lateral se puede introducir una condición de contorno tipo fricción, que consiste en imponer una fuerza tangencial en dirección opuesta al flujo en el contorno. Iber distingue entre régimen turbulento liso, turbulento rugoso y transición entre turbulento liso y rugoso en función de la rugosidad de la pared y de la velocidad del flujo en las proximidades de la pared.

En los contornos abiertos se pueden imponer diferentes tipos de condiciones de contorno. Para que las ecuaciones de aguas someras (o Saint Venant) estén bien planteadas desde el punto de vista matemático, el número de condiciones a imponer en los contornos abiertos depende de si se trata de un contorno de entrada o de salida de flujo, así como del tipo de régimen en el contorno, rápido o lento.

Para un contorno de entrada es necesario imponer tres condiciones de contorno si el régimen es supercrítico, una por cada una de las ecuaciones de Saint Venant, mientras que si se produce régimen subcrítico será suficiente con imponer dos condiciones. En un contorno de salida una única condición es suficiente si el régimen es subcrítico. Si el régimen es supercrítico no es necesario imponer ninguna condición. Si se imponen menos condiciones de las necesarias desde el punto de vista matemático, las ecuaciones serán indeterminadas y no se obtendrá una solución correcta. Las condiciones a imponer pueden ser el calado, las componentes de la velocidad o una combinación de ambos. Iber considera diferentes opciones para imponer las condiciones de contorno, las cuales se recogen en la Figura 15.



Contorno	Régimen	Condiciones impuestas
Entrada	Subcrítico / Crítico	Caudal total en dirección normal al contorno
		Caudal total en dirección normal al contorno y velocidad media
	Supercrítico	Caudal específico en dirección normal al contorno
		a) Caudal específico en dirección normal al contorno y calado b) Caudal específico en dirección normal al contorno y cota de agua
Salida	Subcrítico	a) Calado
		b) Cota de agua
	Supercrítico / Crítico	c) Vertedero (cota y coeficiente de descarga)
		d) Curva de gasto
		No es necesario imponer ninguna condición

Figura 15. Condiciones de contorno para los contornos abiertos. Fuente: Manual de referencia hidráulico de IBER (2014).

3.1.3. Condiciones iniciales.

Son las que definen el estado del modelo en el inicio de la simulación. Asumen que la velocidad el agua es nula en el instante inicial y permiten establecer el calado o nivel de lámina de agua inicial. Se asignan sobre las superficies y no sobre las líneas, como se hace con las condiciones de contorno, y se deben de asignar a todo el modelo para que pueda comenzar el cálculo.

En la ventana de asignación de condiciones iniciales (Figura 16) se puede seleccionar o calado o nivel de la lámina de agua. Para considerar que todo el dominio está seco al inicio de la simulación, se asignará una condición de calado igual a cero.

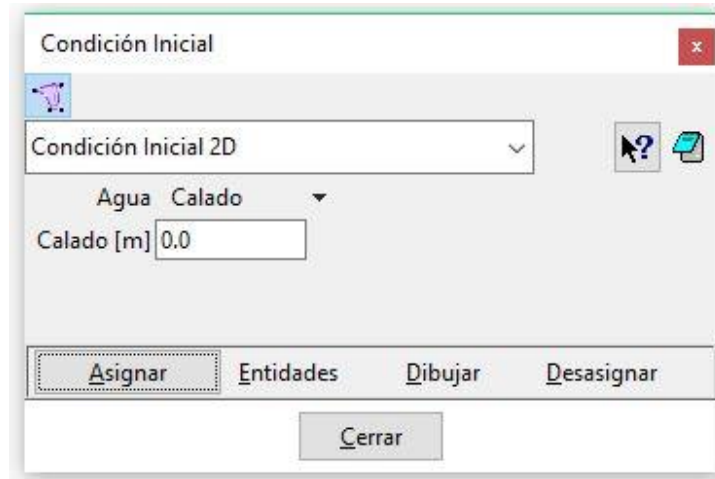


Figura 16. Ventana de asignación de la condición inicial.

3.1.4. Condiciones internas.

Las condiciones de contorno internas se utilizan para modelar estructuras hidráulicas tipo compuertas, vertederos o puentes. Las implementadas en Iber son:

- A. Flujo bajo compuerta.
- B. Flujo sobre vertedero en lámina libre.
- C. Combinación de compuerta y vertedero.
- D. Pérdida localizada.



Apartado A. Flujo bajo compuerta.

Iber detecta automáticamente si una compuerta funciona en régimen libre o con descarga sumergida, en función de la diferencia de niveles aguas arriba y aguas debajo de la misma. Para las compuertas se considera la ecuación de desagüe bajo compuerta, que puede funcionar libre o anegada. En función de la relación entre el calado aguas arriba y aguas debajo de la compuerta, la ecuación de descarga utilizada por Iber será:

Compuerta libre:

$$0.0 \leq \frac{Z_D - Z_B}{Z_U - Z_B} \leq 0.67 \quad Q = C_d B h \sqrt{2g (Z_u - Z_B)} \quad (\text{Ec.16})$$

Transición:

$$0.67 \leq \frac{Z_D - Z_B}{Z_U - Z_B} \leq 0.80 \quad Q = C_d B h \sqrt{6g (Z_u - Z_D)} \quad (\text{Ec.17})$$

Compuerta

Anegada:

$$0.80 \leq \frac{Z_D - Z_B}{Z_U - Z_B} \leq 1 \quad Q = C_d B h \sqrt{2g (Z_u - Z_D)} \quad (\text{Ec.18})$$

donde Z_u es la cota del agua aguas arriba de la compuerta. Z_B la cota de fondo y Z_D la cota del agua, aguas abajo de la compuerta. C_d es el coeficiente de descarga, por defecto se toma un valor de 0.6. B es el ancho del canal, h la apertura de la compuerta y g la constante gravitatoria.

Esta condición supone una compuerta de altura indefinida e irrebasable. La ventana de condición de compuerta (Figura 17) pide la cota del apoyo de la compuerta y del borde inferior de la misma. La diferencia entre estas dos cotas es la apertura. El ancho de la longitud de la compuerta será el de la línea a la que se asigne, si se quiere reducir o aumentar su longitud se modificará el porcentaje del ancho de la compuerta.

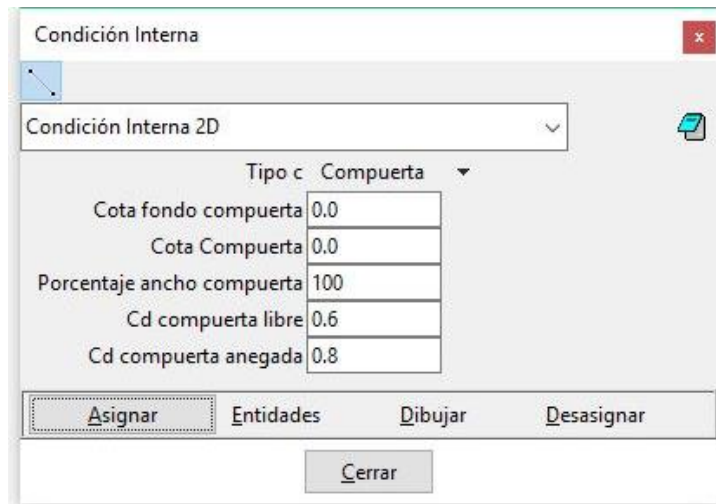


Figura 17. Asignación de condiciones internas tipo compuerta.

Apartado B. Flujo sobre vertedero en lámina libre.

La condición de vertedero permite introducir en medio del cauce una estructura rebasable. Es necesario introducir la cota del umbral de la estructura, el ancho del vertedero que, al igual que en compuertas, se puede ajustar con el porcentaje de longitud del vertedero, y el coeficiente de descarga. En la Figura 18 se puede ver la ventana de condición interna tipo vertedero.

En este caso, se considera la ecuación de desagüe para vertedero rectangular, que puede funcionar libre o anegado. En función de la relación entre el calado aguas arriba y aguas abajo de la compuerta, la ecuación de descarga utilizada por Iber será:

Vertedero libre:

$$\frac{Z_D - Z_W}{Z_U - Z_W} < 0.67 \quad Q = C_d B (Z_U - Z_W)^{1.5} \quad (\text{Ec.19})$$

Vertedero Anegado:

$$\frac{Z_D - Z_W}{Z_U - Z_W} > 0.67 \quad Q = 2.6 C_{dw} B (Z_D - Z_W) (Z_U - Z_D)^{0.5} \quad (\text{Ec.20})$$

donde Z_u es la cota del agua aguas arriba de la compuerta, Z_B la cota de fondo, Z_D la cota del agua, aguas abajo de la compuerta, Z_W la cota del vertedero y B el ancho del canal. El coeficiente de descarga que se toma por defecto es de 1.7.

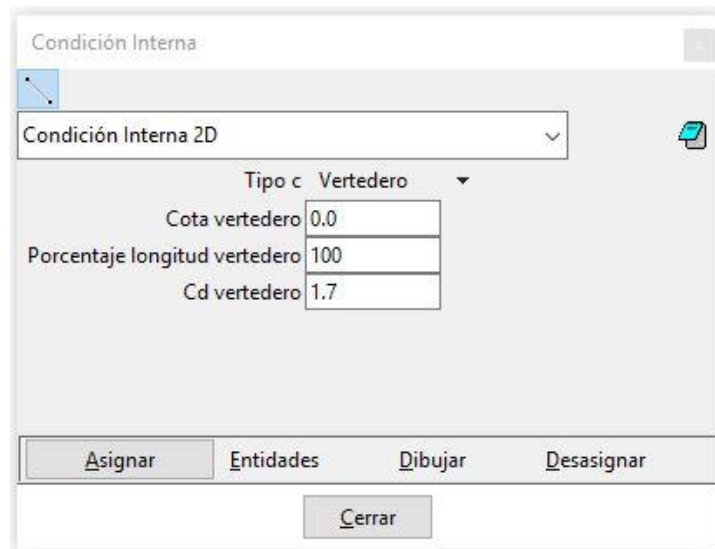


Figura 18. Ventana de condición interna tipo vertedero.

Apartado C. Combinación vertedero-compuerta.

Para la opción de combinación compuerta con vertedero, se deben indicar tanto los parámetros de la compuerta como los del vertedero (Figura 19). El caudal total desaguado es la suma del caudal bajo compuerta y del caudal sobre vertedero.

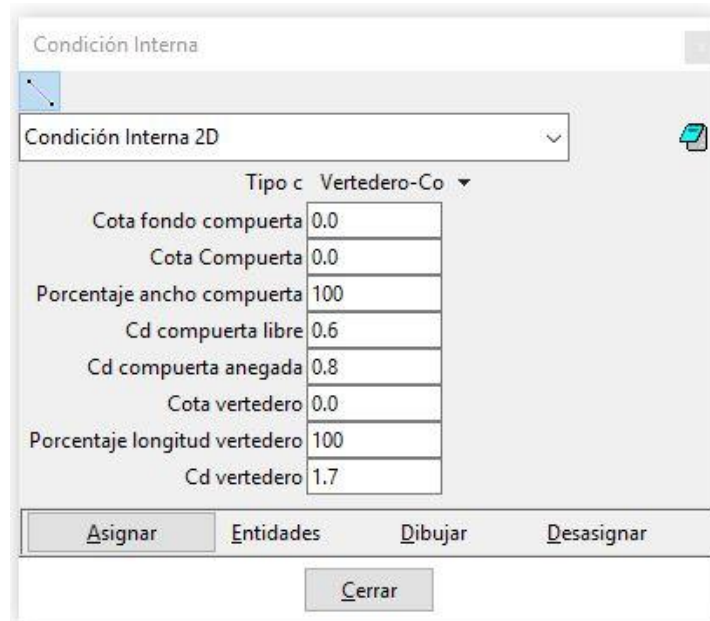


Figura 19. Asignación de condiciones internas tipo vertedero-compuerta.

En la Figura 20 se definen esquemáticamente las variables nombradas anteriormente en la imposición de las condiciones internas. A la izquierda se sitúa la compuerta sin vertedero, en el centro el vertedero sin compuerta y a la derecha la combinación de ambas.

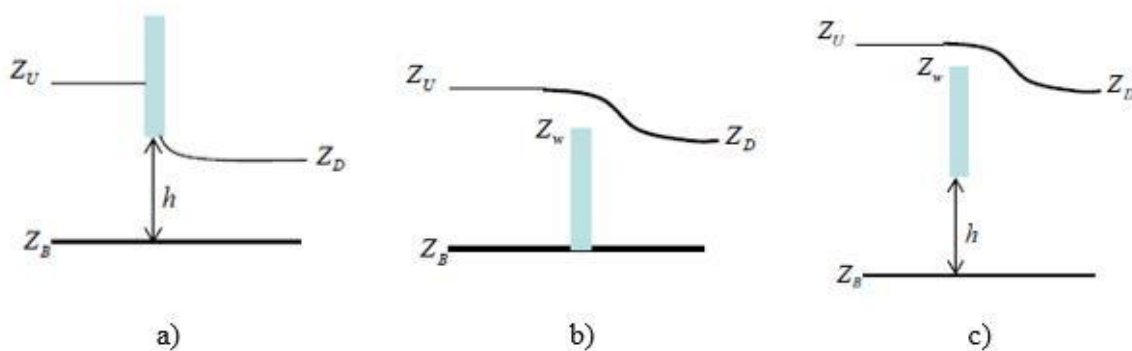


Figura 20. Definición esquemática de las variables utilizadas en la imposición de condiciones interna, a) compuerta sin vertedero, b) vertedero sin compuerta y c) compuerta vertedero. Fuente: Bladé et all (2014).

Apartado D. Pérdida localizada.

Esta opción permite introducir una pérdida de carga local (Figura 21). Para ello se introduce un coeficiente de pérdidas del término de la energía cinética lambda, λ . La condición tipo pérdida localizada es útil cuando se tiene este coeficiente calibrado.

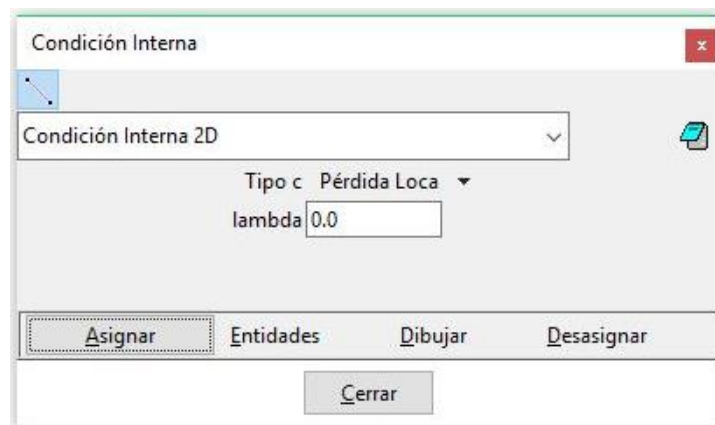


Figura 21. Asignación de condiciones internas. Pérdida local.

La transferencia de caudal entre dos volúmenes finitos se considera una pérdida de energía localizada de valor $\Delta H = \lambda v^2/2g$. Las ecuaciones de Saint Venant son la expresión matemática de las leyes de conservación de la masa y de la cantidad de movimiento, por lo que para poder considerar dicha pérdida de energía se actúa sobre el término de la pendiente motriz. Para ello se le añade a la pendiente motriz, a través de un contorno de un volumen finito S_f , un término adicional igual a $\Delta H/V$, siendo V el volumen del elemento. La pérdida de energía a través de dicho contorno será $\Delta H + S_f L$, donde L es la distancia entre centros de elementos a ambos lados del contorno donde se aplica la pérdida localizada.



3.1.5. Generación de la malla de cálculo.

Una vez establecidas las condiciones se procederá al mallado. Para resolver una ecuación diferencial por el método de volúmenes finitos es necesario realizar previamente una discretización espacial del dominio a estudiar. Para ello se divide el dominio de estudio en celdas de tamaño relativamente pequeño. La malla es un elemento indispensable para poder realizar la simulación en Iber, puesto que si no hay malla de cálculo no se puede simular. La generación de una buena malla de cálculo es fundamental para conseguir buenos resultados. Iber dispone de diferentes formas de conseguirlo, en función de las características del problema será más adecuado un tipo u otro de malla.

Iber trabaja tanto con elementos triangulares como con cuadriláteros, o con mallas mixtas de triángulos y cuadriláteros. Las mallas de cálculo pueden ser a su vez regulares o irregulares, así como estructuradas o no estructuradas.

Las mallas no estructuradas están formadas por elementos que pueden tener 3 o 4 lados. Se pueden combinar elementos irregulares de 3 y 4 lados dentro de la misma malla. La ventaja de trabajar con mallas no estructuradas es la facilidad con la que se adaptan a cualquier geometría del contorno. Pues no es necesario que la malla tenga ningún tipo de organización o estructura interna. Este tipo de malla es más adecuada para geometrías complejas e irregulares como son los terrenos.

Las mallas estructuradas están constituidas por elementos cuadrangulares que se adaptan a la geometría de los contornos, siendo más adecuada cuando la geometría está constituida por elementos geométricos sencillos.

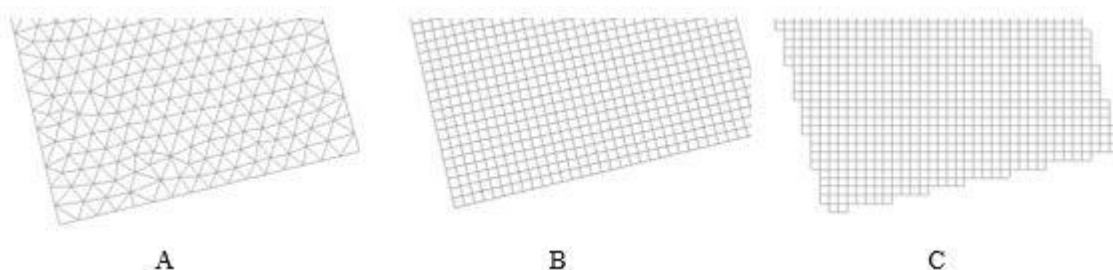


Figura 22. Tipos de mallas: A) No estructurada, B) Estructurada y C) Cartesiana.

Una malla cartesiana es una malla constituida por elementos cuadrados orientados según los ejes coordenados y que no se adapta a los contornos. Este tipo de mallas no se suele emplear en Iber.

En el presente trabajo las mallas generadas en los modelos de las simulaciones de Iber serán no estructuradas. La asignación se puede realizar sobre puntos, líneas y superficies. Lo habitual es asignar sobre superficies aunque también se pueden aplicar a líneas. Al seleccionar la opción *Asignar tamaño a superficies* aparece una ventana (Figura 23), en la que se introduce el tamaño del lado del triángulo que se asigna a las superficies. El procedimiento es el mismo para líneas y para puntos.

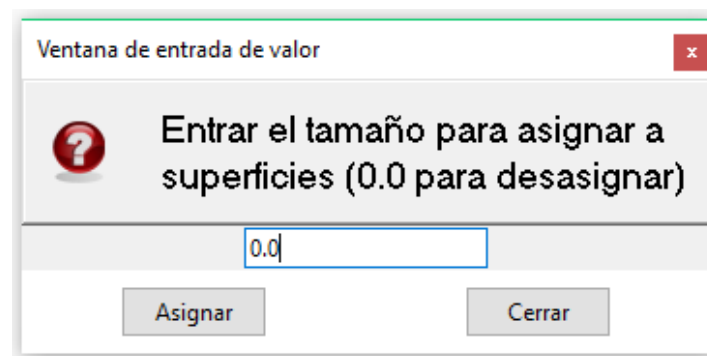


Figura 23. Ventana de asignación del tamaño de elemento a la malla.

Al generar la malla, aparece una nueva ventana con el campo *Entrar el tamaño de los parámetros a generar* (Figura 24) aparece un valor que Iber utilizará por defecto como tamaño de malla para aquellos elementos de la geometría que no tengan asignada ninguna condición de mallado. La opción *Obtener parámetros de mallado del modelo*, remalla el modelo con las mismas opciones que se utilizaron la última vez para crear la malla.

Las mallas utilizadas en las diferentes hipótesis que se van a simular en el presente trabajo, y que posteriormente se explicarán, han sido sometidas a un análisis de sensibilidad. Con este análisis se estudia la influencia del tamaño de la malla sobre los resultados de la simulación.

Aunque se traten de una malla no estructurada, el objetivo es crear una malla homogénea cuyos triángulos tengan un tamaño similar entre ellos y estén repartidos equitativamente por toda la estructura.

El mallado que domina es el del entorno al vertedero, pero, primero se ajusta el tamaño de malla en las superficies. Asignado este valor, se reduce el tamaño de la malla en las líneas y puntos que forman el aliviadero para conseguir una mayor precisión de los cálculos. De esta forma, la triangulación se ajusta mejor a la estructura.

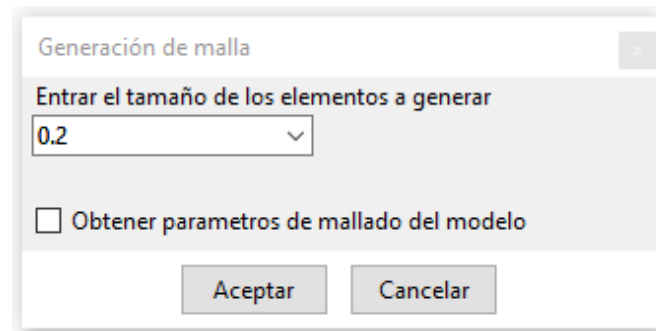


Figura 24. Ventana de generación de malla.

Una vez generada la malla de cálculo e introducidas las condiciones de contorno, iniciales e internas, y el resto de parámetros, es necesario configurar los parámetros de cálculo y activar los módulos que se ejecutarán.

3.2 Desarrollo de la metodología empleada.

Para crear la geometría en Iber se dibujan puntos, líneas y superficies, considerando la jerarquía de entidades (líneas formadas por puntos y superficies formadas por polígonos cerrados). El canal simulado en el programa cumple con las características del canal de laboratorio empleado por Crookston (2010). Se trata de un canal de 1.0 m de ancho y 14.6 m de longitud de paredes y fondo acrílicos. Al ser un programa bidimensional solo se dibuja el canal en planta. La longitud del canal no afecta a los resultados si aguas abajo del aliviadero la condición de flujo es supercrítica. El aliviadero tiene una altura de 0.3048 m, está formado por dos módulos y se



sitúa aproximadamente a una distancia $3P$ de la entrada del canal. El resto de parámetros varían en función del ángulo que formen las paredes del aliviadero.

Con ayuda de las recomendaciones de diseño del artículo de Crookston y Tullis se realiza una hoja de cálculo para agilizar la obtención de las coordenadas que se utilizarán como puntos en Iber. Conocidas las dimensiones del canal (ancho y largo), el número de módulos, la altura del aliviadero y los ángulos de estudio (6, 8, 10, 12, 15, 20, 35 y 90°), se calculan el resto de parámetros necesarios siguiendo las ecuaciones del apartado 2.1. La longitud de la línea central de la pared lateral se obtiene con AutoCAD para cada ángulo. La longitud total de la línea central del vertedero según los parámetros establecidos para cada ángulo es:

Ángulo	L_c (m)
6°	7.029
8°	5.333
10°	4.329
12°	3.661
15°	2.995
20°	2.314
35°	1.463
90°	1.000

Se analiza el aliviadero tipo laberinto para descarga libre y sumergida. El número de Manning establecido para la rugosidad del canal es de 0.01 correspondiente al material acrílico con el que se construyó el canal del laboratorio. El tiempo total de simulación empleado es de 180 segundos, el cual permite igualar el caudal de entrada y salida, y llegar a una situación de flujo permanente.

- **Aliviaderos con descarga libre.**

En aliviaderos descarga libre, los parámetros que introducimos en el programa como condiciones de contorno son el calado de aguas arriba del aliviadero medido desde el fondo del



canal (Y), el coeficiente de descarga (C_d) y la altura del vertedero (P). Se comprueba para para el vertedero con el borde redondeado aguas arriba (“*Quarter-Round*”) y para el de ambos bordes redondeados (“*Half-Round*”).

La forma de trabajar los resultados de Crookston y Tullis (2013) es la siguiente.

Partiendo de las gráficas de la investigación de Crookston y Tullis, para cada valor de la relación H_T/P desde 0.05 hasta 1.00 en intervalos de 0.05 se calcula el coeficiente de descarga correspondiente. Para mayor precisión se utilizan las fórmulas propuestas para C_d en aliviaderos en laberinto [Ec.2 y Ec.3].

La ecuación general de descarga en vertederos [Ec.1] no corresponde con la ecuación de descarga en vertedero utilizada por Iber [Ec.21]. Para igualar ambas formulaciones se multiplica el coeficiente de descarga de Crookston y Tullis por $(2/3)\sqrt{2g}$, obteniendo un C_d modificado.

Fórmula de Crookston y Tullis:

$$Q = \frac{2}{3} C_{d(\alpha^\circ)} L \sqrt{2g} H_T^{3/2} \quad (\text{Ec.1})$$

Fórmula de Iber:

$$Q = C_d B h^{1.5} \quad (\text{Ec.21})$$

Formula de C_d modificada:

$$C_{d,Iber} = \frac{2}{3} C_{d(\alpha^\circ)} \sqrt{2g} \quad (\text{Ec.22})$$

Para calcular el calado desde el fondo del canal (Y) se utiliza la relación H_T/P de donde despejamos H_T . La carga total [Ec.23] es la suma del calado sobre vertedero, h y la componente de velocidad ($V^2/2g$). Con la hoja de cálculo obtenemos el valor del calado h al que le sumamos la altura del aliviadero consiguiendo el valor del calado “ Y ”. En la figura 25 se explica esquemáticamente el proceso a seguir mediante un diagrama de flujo.

$$H_T = h + \frac{V^2}{2g} = h + \frac{Q^2}{((h + P) * W)^2 2g} \quad (\text{Ec.23})$$

Como condición de entrada para las comprobaciones con aliviadero con descarga libre se escoge la opción de *cota de agua* (ver Figura 26) y se introduce el calado aguas arriba de la estructura, Y , calculado anteriormente para cada valor de la relación H_T/P . La condición de salida elegida es de flujo supercrítico/crítico. (Ver Figura 27).

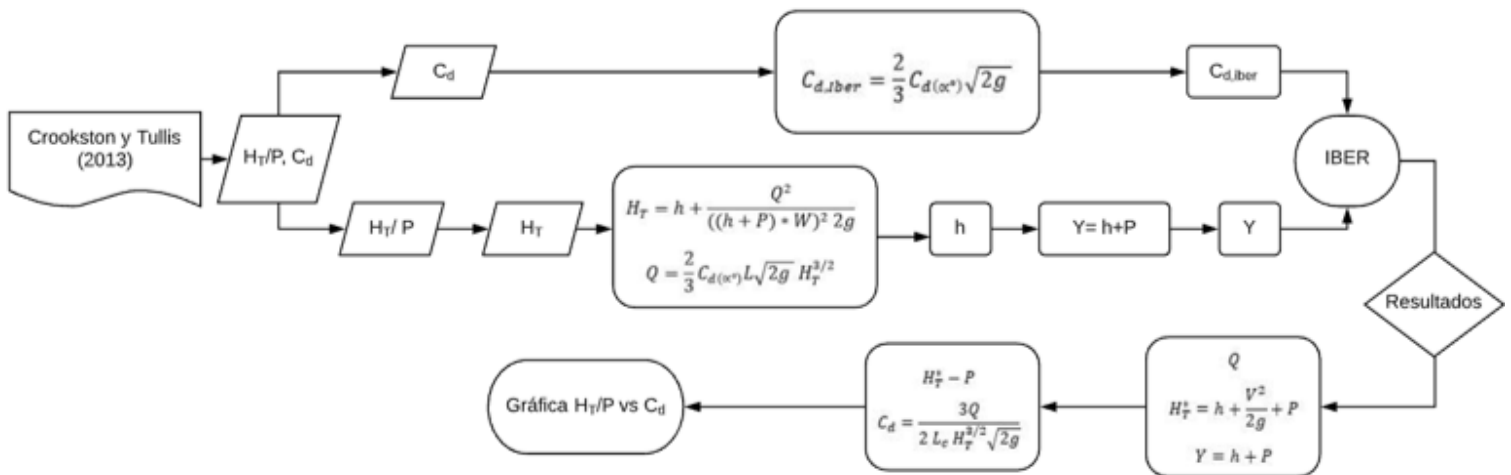


Figura 25. Diagrama de flujo. Proceso de cálculo empleado en descarga libre.

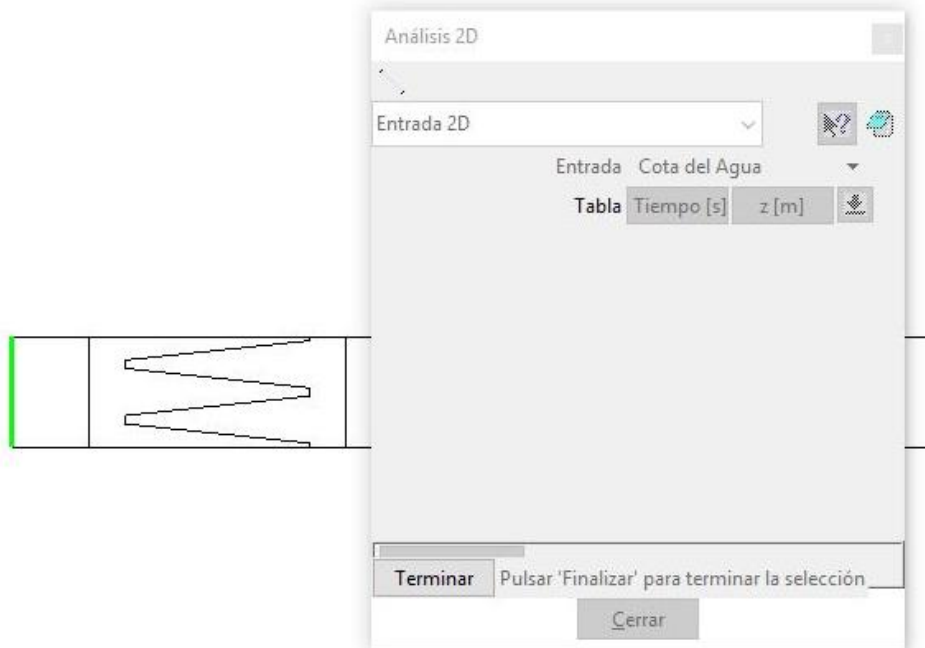


Figura 26. Ventana de condición de entrada y línea a la que se le asigna dicha condición. Empleada para descarga libre.

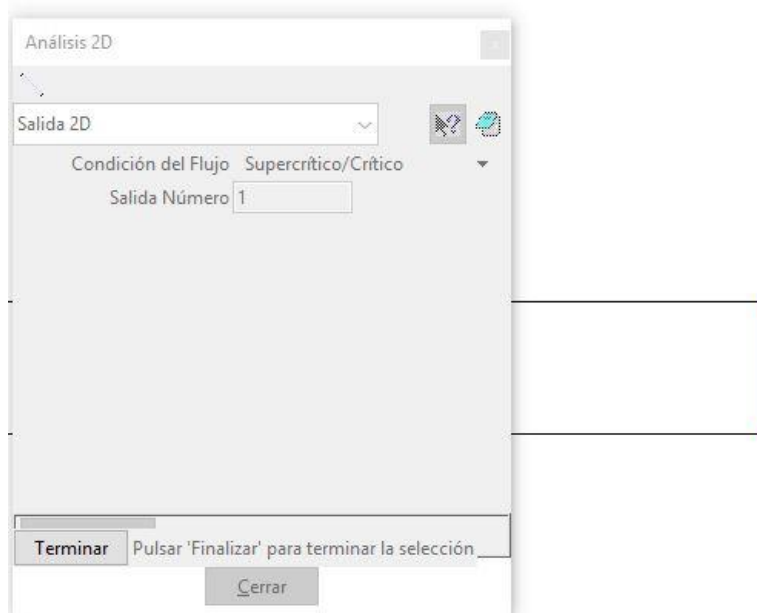


Figura 27. Ventana de condición de salida y línea a la que se le asigna dicha condición. Empleada para descarga libre.

El aliviadero tipo laberinto se puede introducir en la simulación como una condición interna o como parte de la geometría del canal. Las opciones analizadas son:

Hipótesis n°1

Dibujada la geometría del aliviadero tipo laberinto (Figura 28), se le asigna una condición interna tipo vertedero. Los datos de entrada son el coeficiente de descarga modificado [Ec.22], el porcentaje de longitud de vertedero y la cota del vertedero, P . El ancho del vertedero corresponde con las líneas asignadas como tal, por lo que el porcentaje de longitud de vertedero será el 100%.

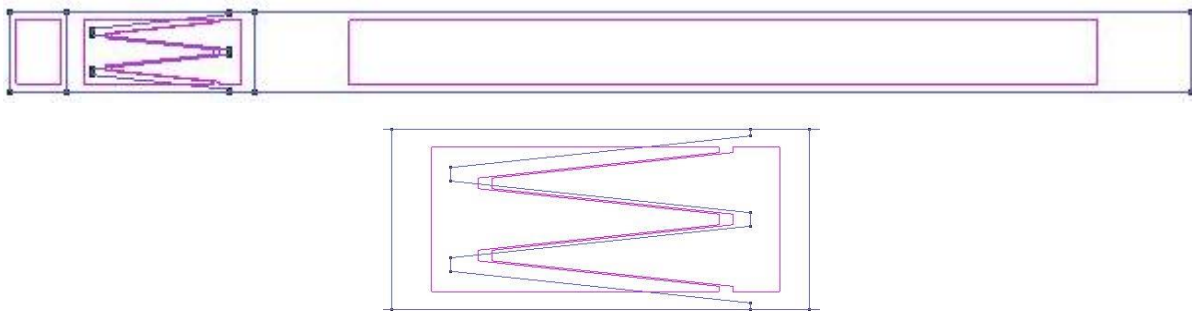


Figura 28. Geometría de un aliviadero en laberinto de 6° introducido en Iber. Hipótesis 1 con descarga libre.

A continuación se muestra una tabla resumen con las condiciones impuestas al programa.

Hidrodinámica		Datos
Condiciones internas	Vertedero	
	Cota del vertedero	P (metros)
	Porcentaje de longitud de vertedero	100 (%)
	C_d vertedero	$C_{d, Iber}$

Tabla 3. Condiciones internas para el aliviadero empleada en la hipótesis 1 en descarga libre.



Figura 29. Asignación de la condición interna tipo vertedero. Hipótesis 1 de descarga libre.

Para comprobar que el tamaño de malla elegido no influye en los resultados de la simulación, se realiza un análisis de sensibilidad. La prueba se realiza sobre un vertedero tipo laberinto con paredes inclinadas 6° y una carga sobre vertedero dada. En las Gráficas 30, 31 y 32 se observan los calados, coeficientes de descarga y caudales obtenidos para los diferentes tamaños de malla considerados entorno al vertedero.

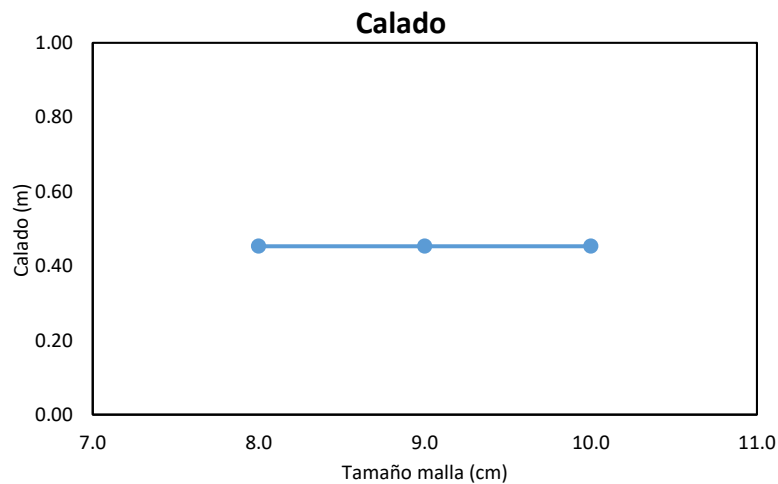


Figura 30. Calado en función del tamaño de la malla en las proximidades al vertedero en la hipótesis 1 para descarga libre.

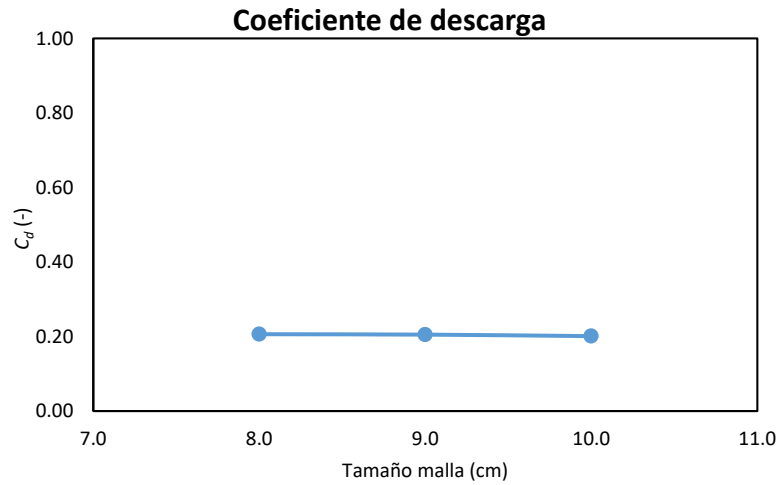


Figura 31. Valor del coeficiente de descarga en función del tamaño de la malla en las proximidades al vertedero en la hipótesis 1 para descarga libre.

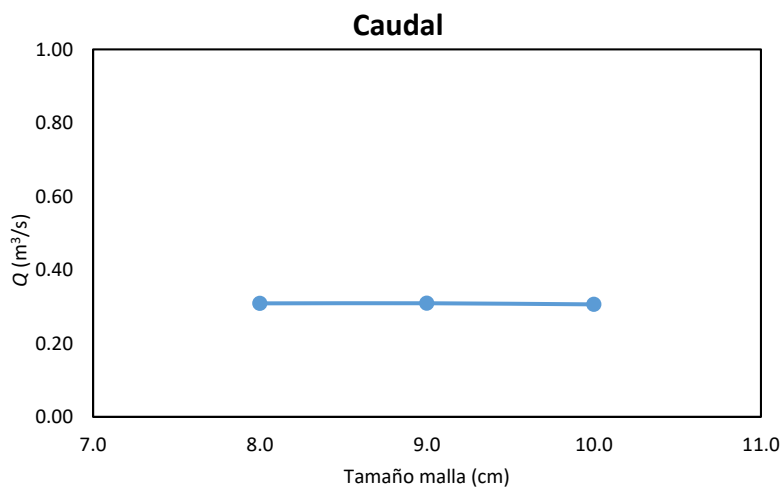


Figura 32. Caudal obtenido en función del tamaño de la malla en las proximidades al vertedero en la hipótesis 1 para descarga libre.

Como se puede comprobar, las diferencias entre los resultados son despreciables, por lo que se puede decir que son independientes al tamaño de malla.

Finalmente, se asigna un tamaño de 10 cm a las superficies y a las líneas que forman las superficies rectangulares, 8 cm a las paredes laterales del aliviadero y a las paredes del canal

que conectan con el vertedero y 4 cm a las líneas más pequeñas que forman el aliviadero (Figura 33).



Figura 33. Tamaño asignado a las líneas para generar la malla.

Generada la malla, se da por terminado el preproceso y se puede calcular. Se repite el mismo procedimiento para cada ángulo y relación de H_T/P mencionada anteriormente.

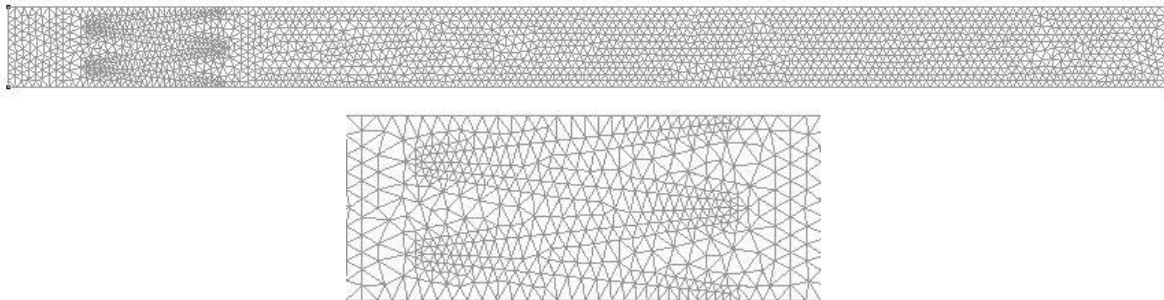


Figura 34. Malla no estructurada generada para un aliviadero en laberinto de 6°.

Hipótesis nº2

En la segunda comprobación, se introduce la geometría del aliviadero lineal y se le asigna, al igual que en la hipótesis 1, la condición interna tipo vertedero disponible en Iber (Figura 35). Como la longitud del vertedero en laberinto es mayor que la longitud del vertedero lineal, modificaremos el porcentaje de longitud del vertedero siendo este mayor que el 100% [Ec.24].

El coeficiente de descarga aplicado sigue siendo el modificado [Ec.22] y la altura del aliviadero, P .

$$\% \text{ Longitud del vertedero} = \frac{L_c}{W} \times 100 \quad (\text{Ec.24})$$

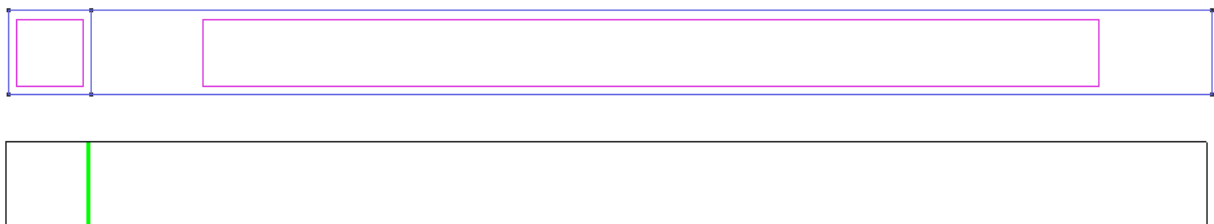


Figura 35. Geometría de un aliviadero lineal y asignación de la condición interna para la Hipótesis 2 de descarga libre.

Los datos Crookston y Tullis (2013) se trabajan de igual modo para todas las hipótesis de vertederos con descarga libre (Figura 25). En la Tabla 4 se muestra un resumen de las condiciones impuestas en el programa.

Hidrodinámica		Datos
Condiciones internas	Vertedero	
	Cota del vertedero	P (metros)
	Porcentaje de longitud de vertedero	$(L_c/W) * 100$ (%)
	C_d vertedero	$C_{d, \text{Iber}}$

Tabla 4. Condiciones internas para el aliviadero empleada en la hipótesis 2 en descarga libre.

Mediante un análisis de sensibilidad se escoge un tamaño de malla para el modelo. En las Gráficas 37, 38 y 39 se pueden ver como los resultados de calado, coeficiente de descarga y caudal son similares en todos los tamaños analizados para un aliviadero tipo laberinto que



paredes inclinadas 6°. Esto quiere decir que los resultados son independientes al tamaño de malla.

El tamaño impuesto a las superficies y líneas para la malla no estructurada es de 7cm (Figura 36). La elección de uno u otro se basa en el tiempo de simulación. Como no se trata de una única simulación, si no que se calcula para un amplio abanico de valores de entrada, se busca que el cálculo sea lo más rápido posible sin que afecte a los resultados.

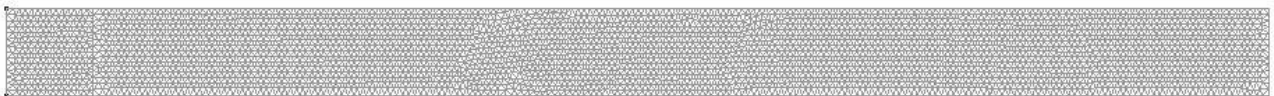


Figura 36. Malla generada en Iber para la hipótesis 2 de descarga libre.

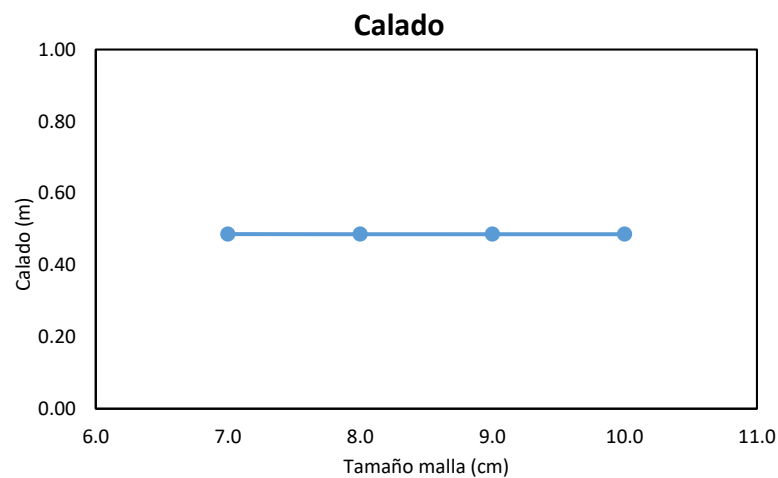


Figura 37. Calado en función del tamaño de la malla en las proximidades al vertedero en la hipótesis 2 para descarga libre.

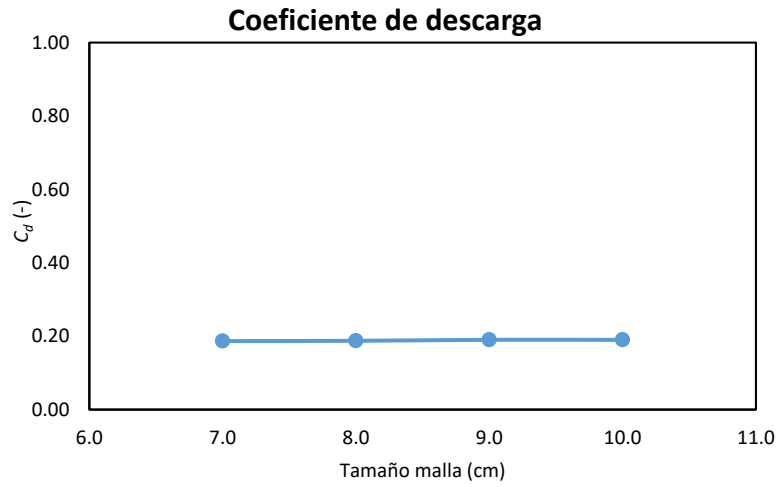


Figura 38. Valor del coeficiente de descarga en función del tamaño de la malla en las proximidades al vertedero en la hipótesis 2 para descarga libre.

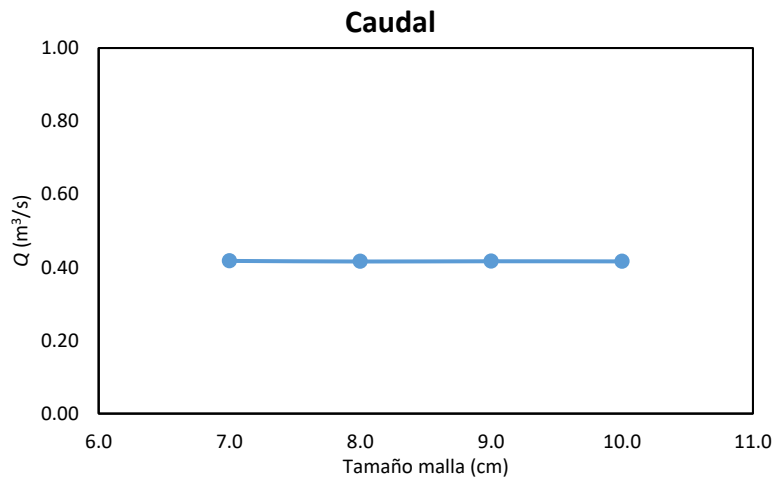


Figura 39. Caudal obtenido en función del tamaño de la malla en las proximidades al vertedero en la hipótesis 2 para descarga libre.

Se calcula siguiendo el mismo procedimiento para cada ángulo y relación Ht/P mencionada anteriormente.

Hipótesis nº3

En esta comprobación se introduce la geometría del aliviadero en laberinto, pero no se considera como una condición interna, si no que forma parte de la geometría del canal. Se considera también su elevación sobre el terreno, trabajando en tres dimensiones (ancho y largo del canal y cota del aliviadero). El aliviadero actúa como un obstáculo al paso del flujo.

Iber no es capaz de procesar los datos si en la geometría se encuentra con paredes completamente verticales, por lo que introduciremos el vertedero con las paredes ligeramente inclinadas tomando como longitud característica la línea central del vertedero. Para obtener estas coordenadas usamos la hoja de cálculo. Al introducir los parámetros de diseño correspondientes (ancho y largo del canal, número de módulos del aliviadero, ángulo de las paredes del aliviadero, etc.), se obtienen dichos puntos directamente. Se crean superficies para todas las paredes del vertedero y del canal a excepción de las paredes de la estructura colindantes a las paredes del canal.

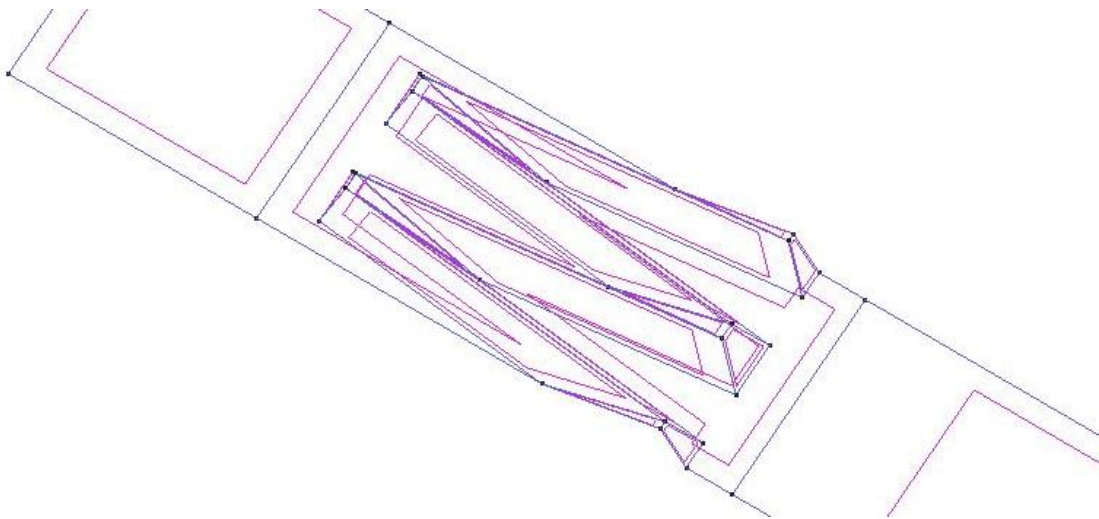


Figura 40. Superficies creadas en Iber para la hipótesis 3.

A las superficies que forman las paredes y lados del aliviadero no se les asigna ninguna condición de contorno como se puede observar en la Figura 41.

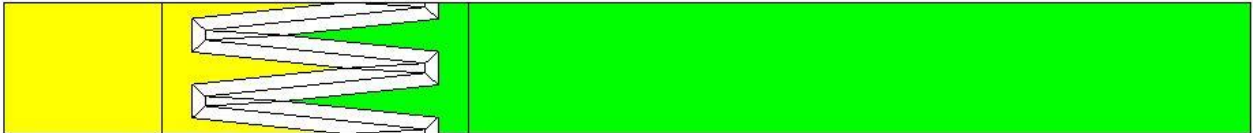


Figura 41. Condiciones iniciales asignadas a las superficies aguas arriba y aguas debajo del aliviadero en Iber.

Realizado el análisis de sensibilidad del mallado para la hipótesis (Figuras 42, 43 y 44) el tamaño asignado a las superficies y líneas para crear la malla no estructurada es de 10 cm (Figura 45). El ensayo se realiza para un aliviadero tipo laberinto con paredes laterales inclinadas 6° .

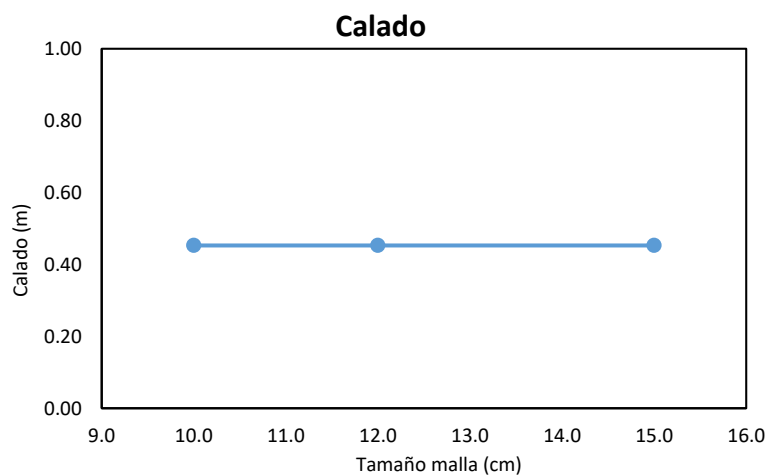


Figura 42. Calado en función del tamaño de la malla en las proximidades al vertedero en la hipótesis 3 para descarga libre.

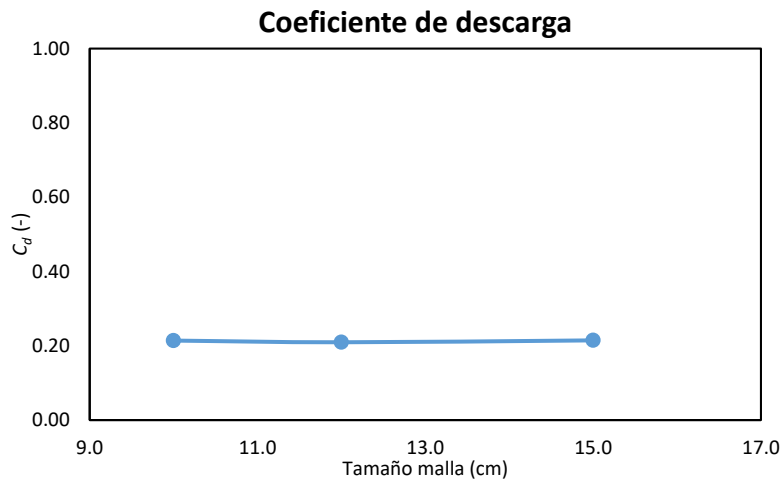


Figura 43. Valor del coeficiente de descarga en función del tamaño de la malla en las proximidades al vertedero en la hipótesis 3 para descarga libre.

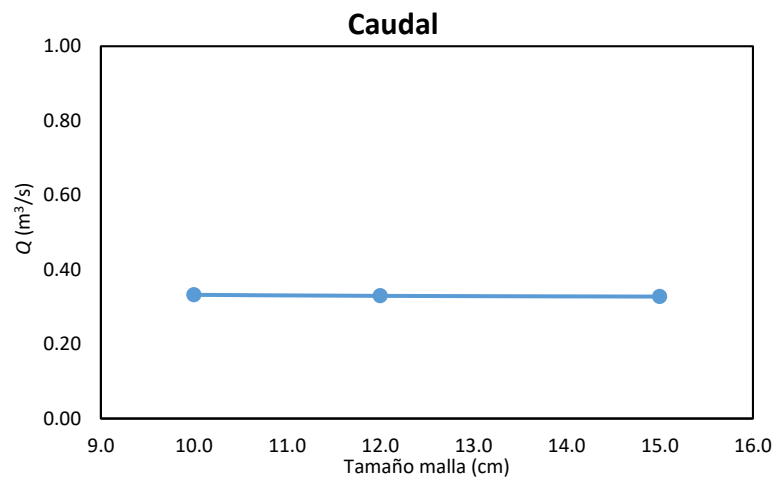


Figura 44. Caudal obtenido en función del tamaño de la malla en las proximidades al vertedero en la hipótesis 3 para descarga libre.

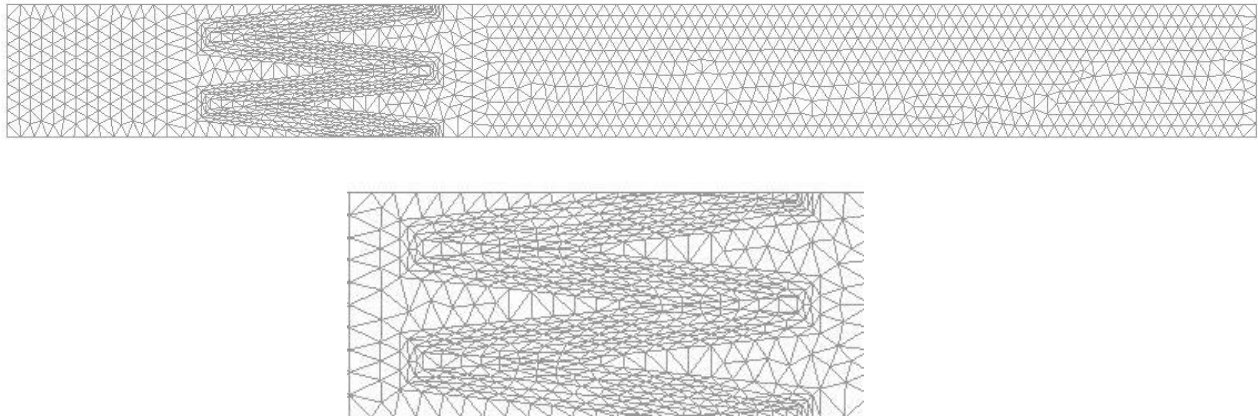


Figura 45. Malla generada para un aliviadero tipo laberinto de ángulo 6° correspondiente a la hipótesis 3 de descarga libre.

Se repite el mismo procedimiento de cálculo para cada ángulo y valor de Ht/P .

- **Aliviaderos con descarga sumergida.**

En el caso de que la descarga del vertedero sea sumergida, se analizarán los resultados experimentales obtenidos de las simulaciones en Iber para descarga libre, comprobando las cargas totales aguas arriba, H^* y aguas abajo, H_d normalizadas con la carga total aguas arriba bajo condiciones de descarga libre, H_o y se compararán con los resultados de propuestos por Tullis (2007). Estos resultados se pueden consultar en la Figura 12.

Puesto que partimos de los resultados de las hipótesis en descarga libre, los parámetros de diseño del aliviadero son los mismos. Tullis (2007) trabaja con aliviaderos con ambos bordes redondeados (“*Half-Round*”) y ángulos 7, 8 y 20° , así que analizaremos únicamente los ángulos de 8 y 20° . (En descarga libre no se trabaja con aliviaderos de 7°). Para agilizar el proceso de cálculo de las simulaciones, la longitud del canal se reduce de 14.6 m (longitud del canal utilizado en las hipótesis anteriores) a 7.3 m, que precisamente es la longitud del canal de experimentación utilizado por Tullis (2007).



El aliviadero se sitúa aproximadamente a una distancia $3.5P$ de la entrada al canal. Los puntos de medición de Tullis se colocan a $3.5P$ aguas arriba del vertedero y entre $5-9P$ aguas abajo.

El aliviadero tipo laberinto, del mismo modo que en el apartado anterior, se puede introducir en la simulación como una condición interna o como parte de la geometría del canal. Las hipótesis de estudio son equivalentes a los casos 1 y 3 anteriores cambiando la forma de descarga de libre a sumergida. Como necesitamos la carga total aguas arriba del vertedero en descarga libre (H_o) para obtener la curva H^*/H_o vs H_d/H_o utilizaremos los resultados obtenidos en ellas. Las opciones analizadas son:

Hipótesis n°1

En esta comprobación, se introduce la geometría del aliviadero en laberinto en Iber como condición interna-vertedero. Se trabaja con la línea central del aliviadero.

Los datos de entrada en Iber son la carga total aguas arriba (H^*) y aguas abajo para aliviaderos con descarga sumergida (H_d) y el coeficiente de descarga correspondiente a la carga total aguas arriba (H^*).

Con la ayuda de la hoja de cálculo, a raíz de los resultados de la primera comprobación con descarga libre, para la relación H_T/P igual a 0.25, 0.5, 0.75 y 1.00 tenemos la carga total aguas arriba del vertedero H_o , el calado h_o y el caudal Q . Para cada valor de la relación H_d/H_o en intervalos de 0.25 se calcula mediante las ecuaciones [Ec.5, Ec.6 y Ec.7] el valor de la relación H^*/H_o . Conocido H_o , obtenemos H_d y H^* . Por último, mediante la ecuación general de descarga en vertederos [Ec.1] tomando la carga total H_T como la correspondiente a la carga total aguas arriba del aliviadero en descarga sumergida (H^*) obtenemos el coeficiente de descarga C_d . En la siguiente figura se explica esquemáticamente mediante un diagrama de flujo el procedimiento a seguir.

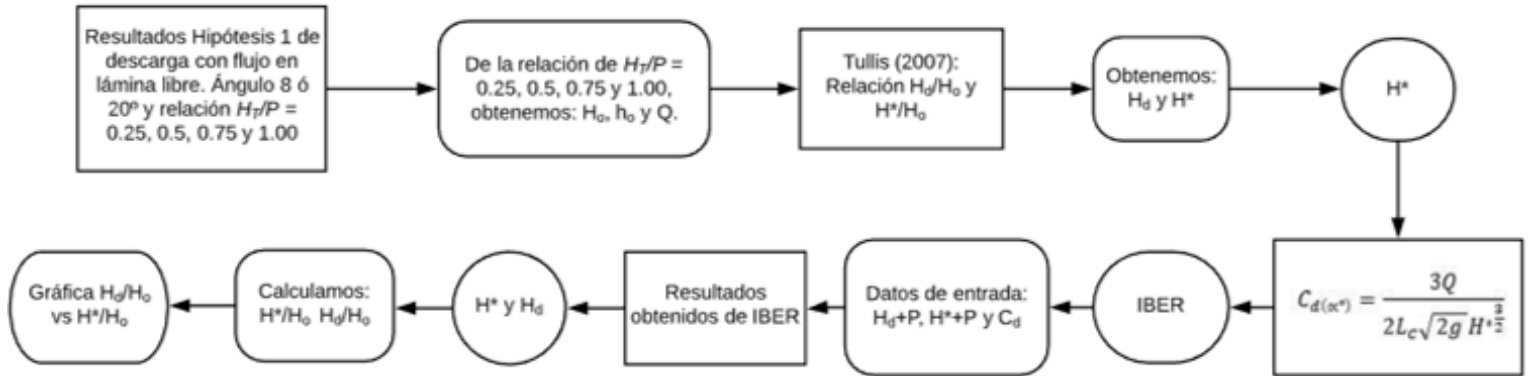


Figura 46. Diagrama de flujo para la hipótesis 1 de descarga sumergida.

Como condición de entrada se escoge la opción de *cota de agua* (ver Figura 26) y se introduce la carga total aguas arriba del aliviadero para descarga sumergida, H^* calculado anteriormente. La condición de salida elegida es de *flujo subcrítico* tipo *nivel dado* (Figura 47) el valor introducido es la carga total aguas abajo del aliviadero para descarga sumergida, H_d .

Los parámetros necesarios para asignar el vertedero como condición interna son en la altura del aliviadero P , el porcentaje de longitud del vertedero que será el 100% y el coeficiente de descarga calculado, C_d .

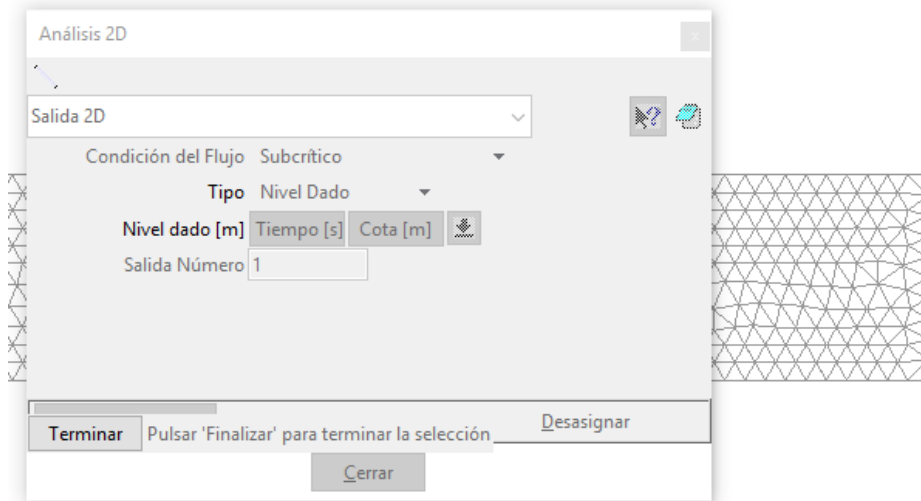


Figura 47. Ventana de condición de salida y línea a la que se le asigna dicha condición. empleada para descarga sumergida.

Las condiciones de contorno impuestas en el programa son las siguientes:

Hidrodinámica		Datos
Condiciones de contorno	Entrada Cota del agua	H^* (metros)
	Salida Condición de Flujo Subcrítico Nivel dado	H_d (metros)
Condiciones internas	Vertedero Cota del vertedero	P (metros)
	Porcentaje de longitud de vertedero	100 (%)
	Cd vertedero	$C_{d, lber}$

Tabla 5. Condiciones para el aliviadero empleadas en la hipótesis 1 en descarga sumergida.

Se utiliza el mismo mallado que en la hipótesis 1 de descarga libre, aun así se realiza también el análisis de sensibilidad sobre el aliviadero de 8° para comprobar que los resultados de la simulación son independientes al tamaño de malla.



En las Gráficas 48 y 49 se observa como los resultados para la carga total aguas arriba (H^*) y aguas abajo (H_d) del vertedero con descarga sumergida son prácticamente iguales en todas las mallas probadas.

Se le asigna un tamaño de 10 cm a las superficies y a las líneas que forman las superficies rectangulares, 8 cm a las paredes laterales del aliviadero y a las paredes del canal que conectan con el vertedero y 4 cm a las líneas más pequeñas que forman el aliviadero.

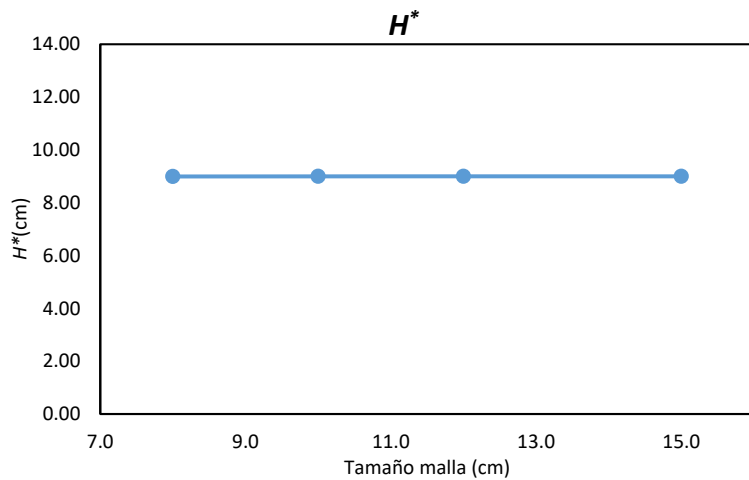


Figura 48. Carga total aguas arriba del aliviadero obtenido en función del tamaño de la malla en las proximidades al vertedero en la hipótesis 1 para descarga sumergida.

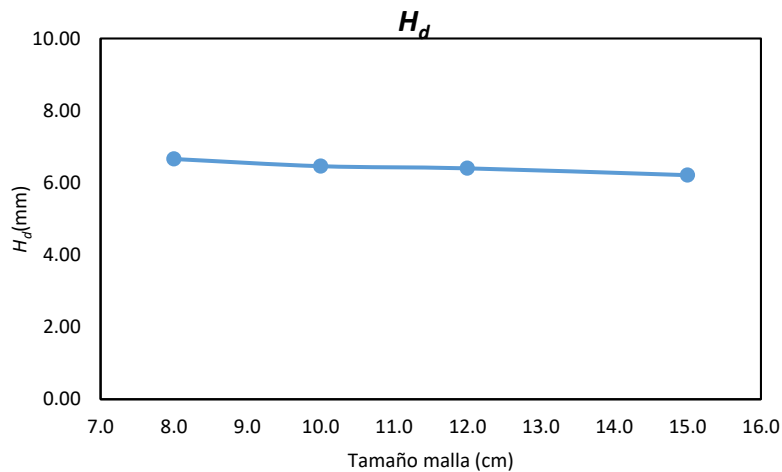


Figura 49. Carga total aguas abajo del aliviadero obtenido en función del tamaño de la malla en las proximidades al vertedero en la hipótesis 1 para descarga sumergida.

Completado el preproceso se puede ejecutar el programa. Se realiza el mismo procedimiento para cada ángulo y valor de la relación H^*/H_o y H_d/H_o hasta completar la curva.

- Hipótesis N°2-

Para esta comprobación, se introduce la geometría del aliviadero en laberinto como parte de la geometría del canal. Al igual que en la hipótesis 3 de descarga libre, el vertedero es un obstáculo al paso del agua, pero en este caso se analiza para descarga sumergida. La forma de introducir la geometría y las superficies es idéntica a la hipótesis 3 de vertederos con descarga libre, únicamente cambia la longitud del canal.

En la hoja de cálculo, partiendo de los resultados de la tercera comprobación para descarga libre, para la relación H_t/P igual a 0.25, 0.5, 0.75 y 1.00 tenemos la carga total aguas arriba del vertedero H_o , el calado h_o y el caudal Q . En cada simulación introducimos como condición de contorno de entrada el caudal Q correspondiente a la relación H_t/P . La condición de contorno de salida será el calado aguas abajo del aliviadero (H_d). Este último comenzará siendo igual a la altura del vertedero e irá incrementando ΔP conforme se realicen las simulaciones. En la siguiente figura se explica esquemáticamente mediante un diagrama de flujo el procedimiento a seguir.

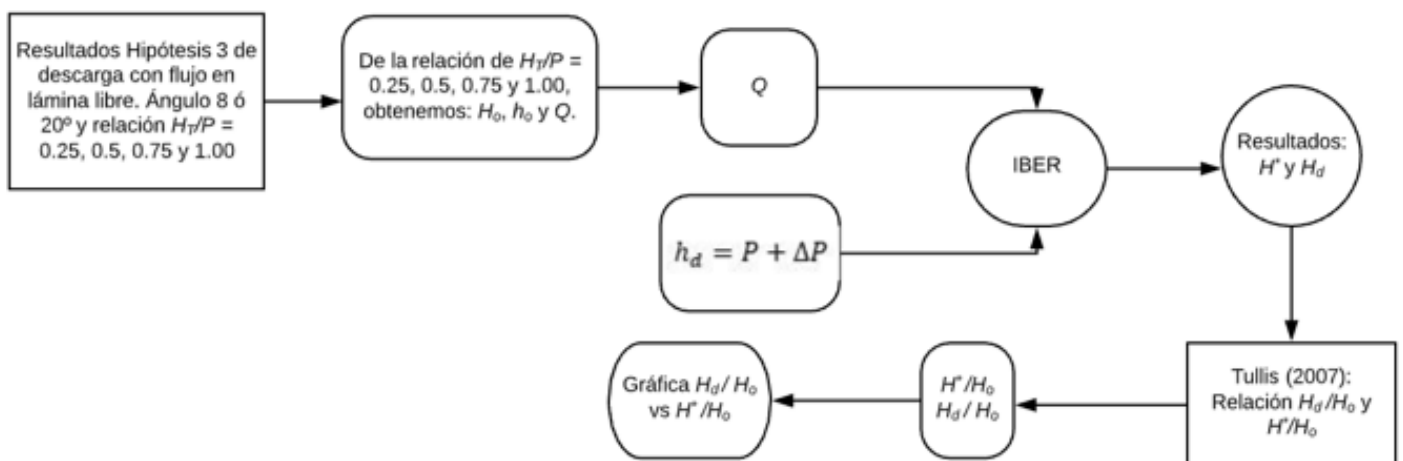


Figura 50. Diagrama de flujo para la hipótesis 2 de descarga sumergida.



Las condiciones de contorno aplicadas en Iber son:

Hidrodinámica		Datos
Condiciones de contorno	Entrada Caudal total Crítico/subcrítico	$Q (Ht/P) (m^3/s)$
	Salida Condición de Flujo Subcrítico Nivel dado	$P+\Delta P$ (metros)

Tabla 6. Condiciones para el aliviadero empleadas en la hipótesis 1 en descarga sumergida.

A las superficies que forman las paredes y lados del aliviadero no se les asigna ninguna condición como se puede observar en la figura 41. El tamaño asignado a las superficies y líneas para crear la malla no estructurada tras realizar el análisis de sensibilidad es de 10 cm.

En las Gráficas 51 y 52 se observan los resultados de la carga total aguas arriba y aguas abajo del aliviadero sumergido obtenidos en el análisis para los distintos mallados estudiados.

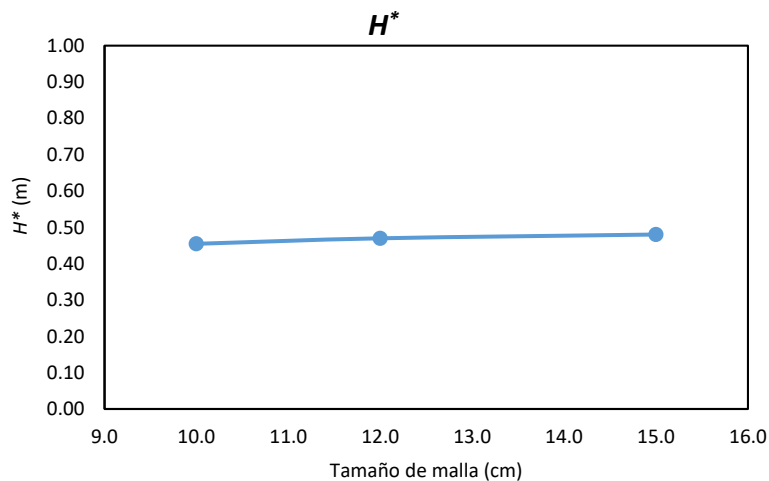


Figura 51. Carga total aguas arriba del aliviadero obtenido en función del tamaño de la malla en las proximidades al vertedero en la hipótesis 2 para descarga sumergida.

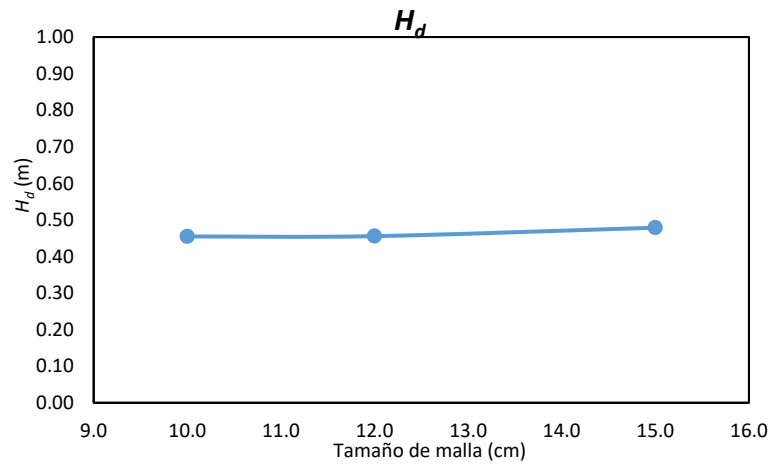


Figura 52. Carga total aguas abajo del aliviadero obtenido en función del tamaño de la malla en las proximidades al vertedero en la hipótesis 2 para descarga sumergida.

Se repite el mismo procedimiento de cálculo para cada ángulo y valores de H_d/H^* y H_o/H^* .



4. Resultados.

4.1 Aliviaderos con descarga libre.

De las simulaciones de Iber, en la ventana de postproceso obtenemos la carga total aguas arriba del vertedero H_T , el calado Y (sin la carga de energía) y el caudal Q . Con estos datos calculamos el coeficiente de descarga correspondiente con la ecuación general de descarga en vertederos [Ec.1]. Con el coeficiente de descarga y la relación H_T/P representamos la curva Cd vs H_T/P . Realizadas las hipótesis y simulados todos los casos pasamos al análisis de resultados. Para comparar los resultados obtenidos en el presente trabajo con los resultados de Crookston y Tullis (2013), aplicamos las ecuaciones [Ec.2 y Ec.3] para hallar el coeficiente de descarga mediante las fórmulas propuestas en su investigación. La relación H_T/P que introducimos en las ecuaciones es el resultado de las simulaciones en Iber.

A continuación se muestran los resultados para cada hipótesis:

Hipótesis 1.

En las siguientes gráficas se comparan los resultados de Iber con los de Crookston y Tullis (2013) para cada uno de los ángulos del aliviadero en laberinto estudiados tanto para perfiles “*Half-Round*” como “*Quarter-Round*”. Como se puede observar, los coeficientes de descarga obtenidos en Iber son menores que los propuestos por Crookston y Tullis.

En los resultados de Crookston y Tullis se diferencia entre valores experimentales, siendo aquellos que se encuentran dentro del rango de valores utilizados en su investigación, y los extrapolados que estarán fuera de ese intervalo.

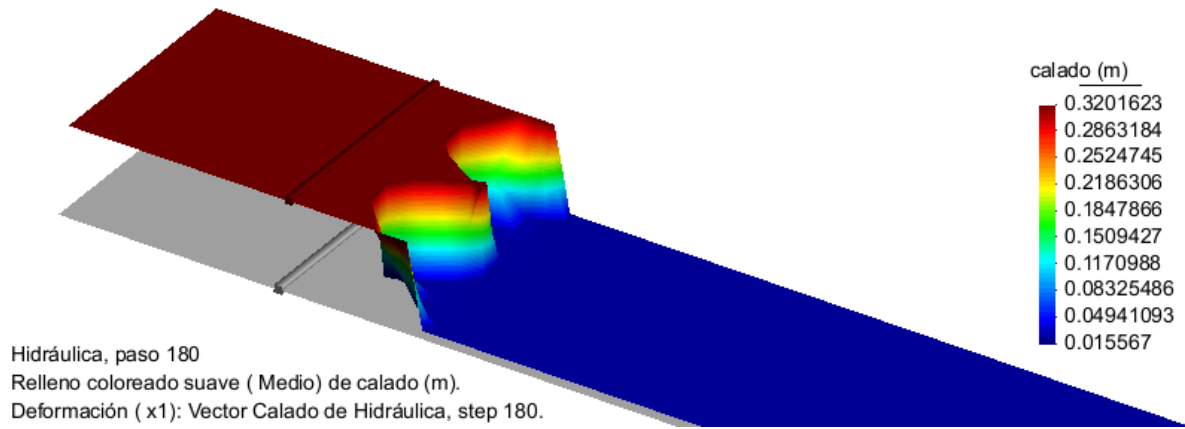


Figura 53. Calados obtenidos en Iber tras la simulación para un aliviadero de 35° y perfil “Half-Round” para $H_T/P = 0.05$.

- Aliviaderos en laberinto, perfil “Half-Round”:

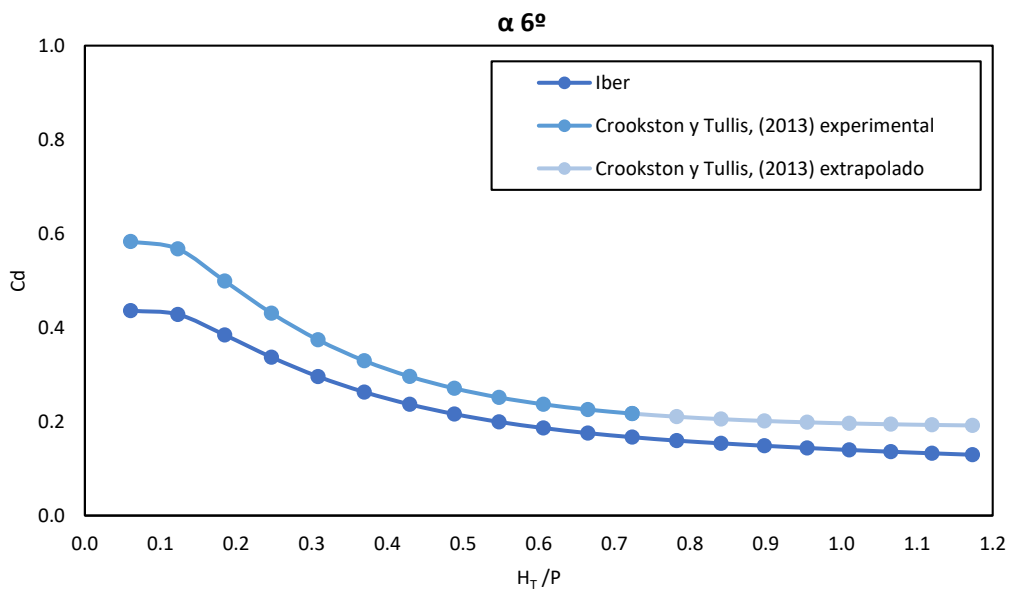


Figura 54. Comparación del coeficiente de descarga obtenido de las simulaciones en Iber con el calculado por Crookston y Tullis (2013) para aliviaderos en laberinto de 6°, “Half-Round”. Hipótesis 1 descarga libre.

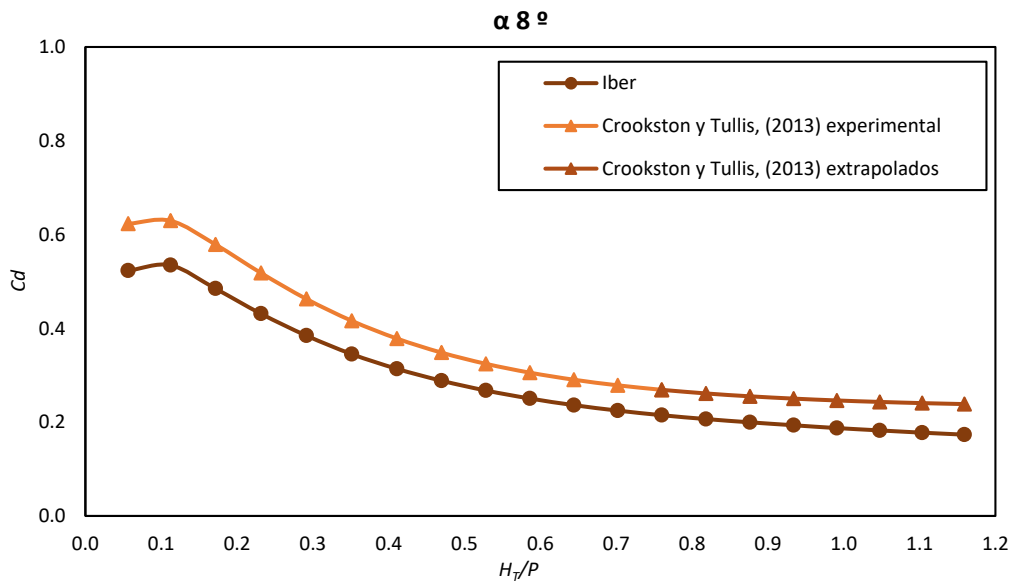


Figura 55. Comparación del coeficiente de descarga obtenido de las simulaciones en Iber con el calculado por Crookston y Tullis (2013) para aliviaderos en laberinto de 8° , “Half-Round”. Hipótesis 1 descarga libre.

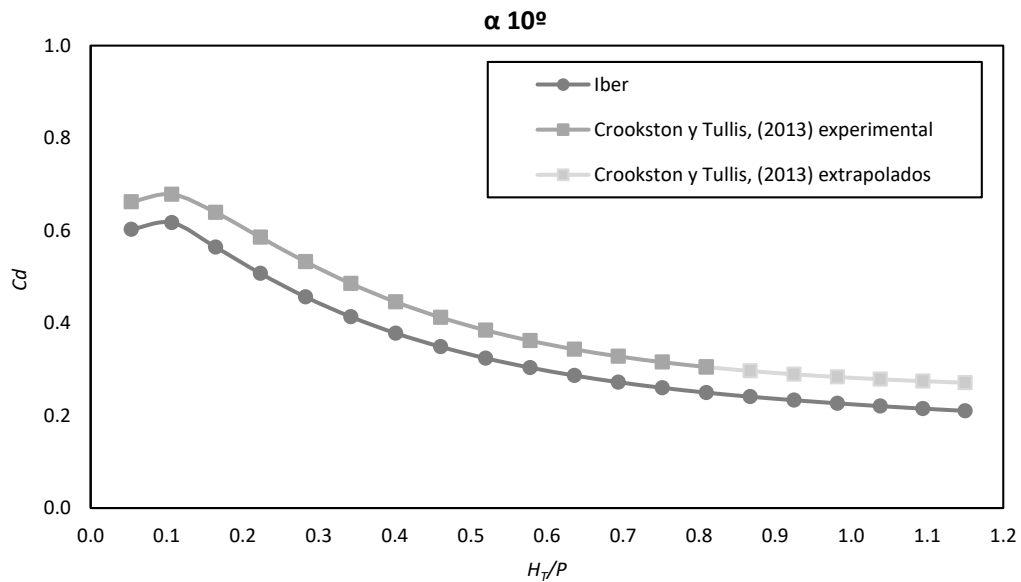


Figura 56. Comparación del coeficiente de descarga obtenido de las simulaciones en Iber con el calculado por Crookston y Tullis (2013) para aliviaderos en laberinto de 10° , “Half-Round”. Hipótesis 1 descarga libre.

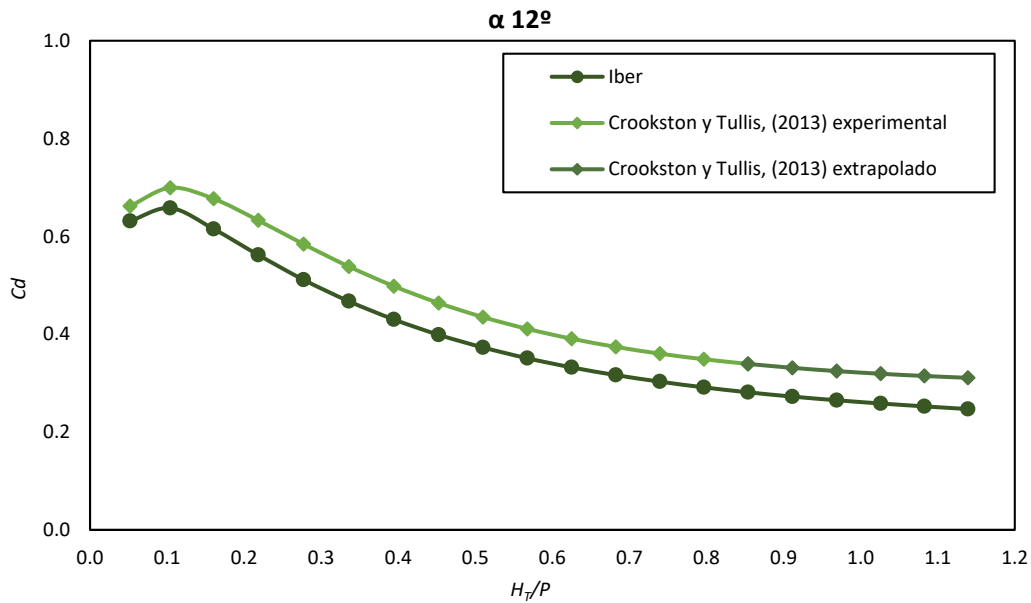


Figura 57. Comparación del coeficiente de descarga obtenido de las simulaciones en Iber con el calculado por Crookston y Tullis (2013) para aliviaderos en laberinto de 12° , “Half-Round”. Hipótesis 1 descarga libre.

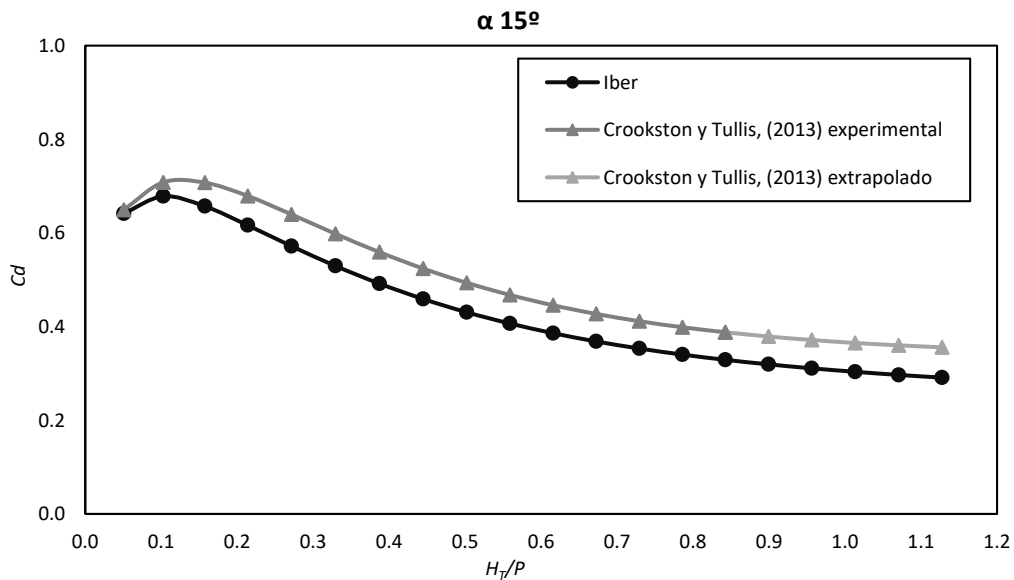


Figura 58. Comparación del coeficiente de descarga obtenido de las simulaciones en Iber con el calculado por Crookston y Tullis (2013) para aliviaderos en laberinto de 15° , “Half-Round”. Hipótesis 1 descarga libre.

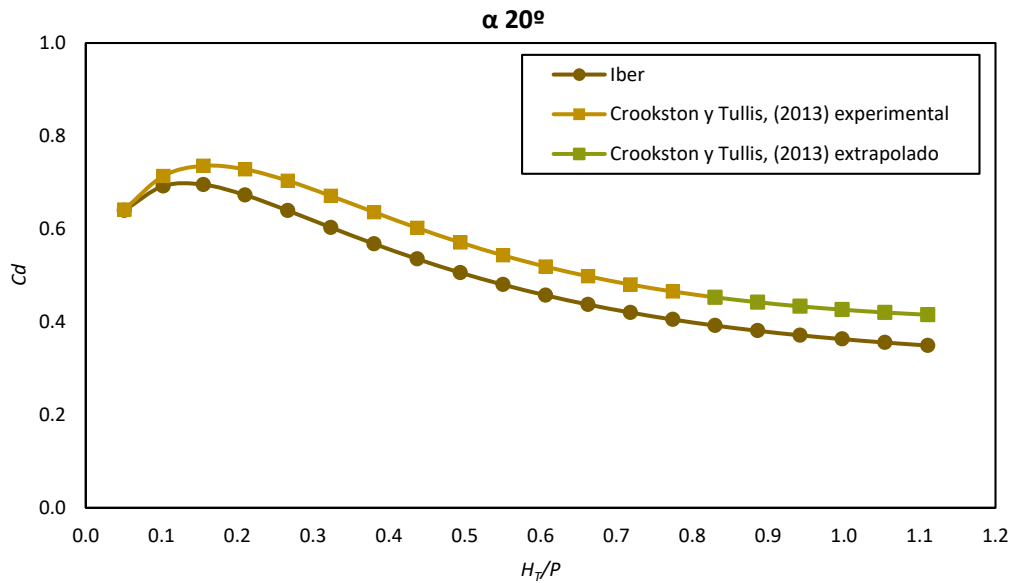


Figura 59. Comparación del coeficiente de descarga obtenido de las simulaciones en Iber con el calculado por Crookston y Tullis (2013) para aliviaderos en laberinto de 20° , “Half-Round”. Hipótesis 1 descarga libre.

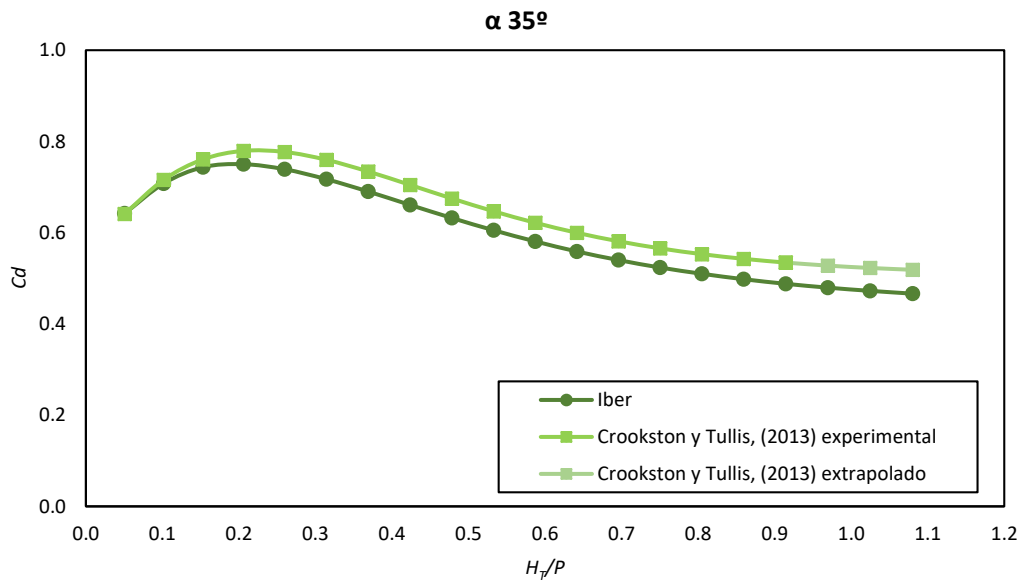


Figura 60. Comparación del coeficiente de descarga obtenido de las simulaciones en Iber con el calculado por Crookston y Tullis (2013) para aliviaderos en laberinto de 35° , “Half-Round”. Hipótesis 1 descarga libre.

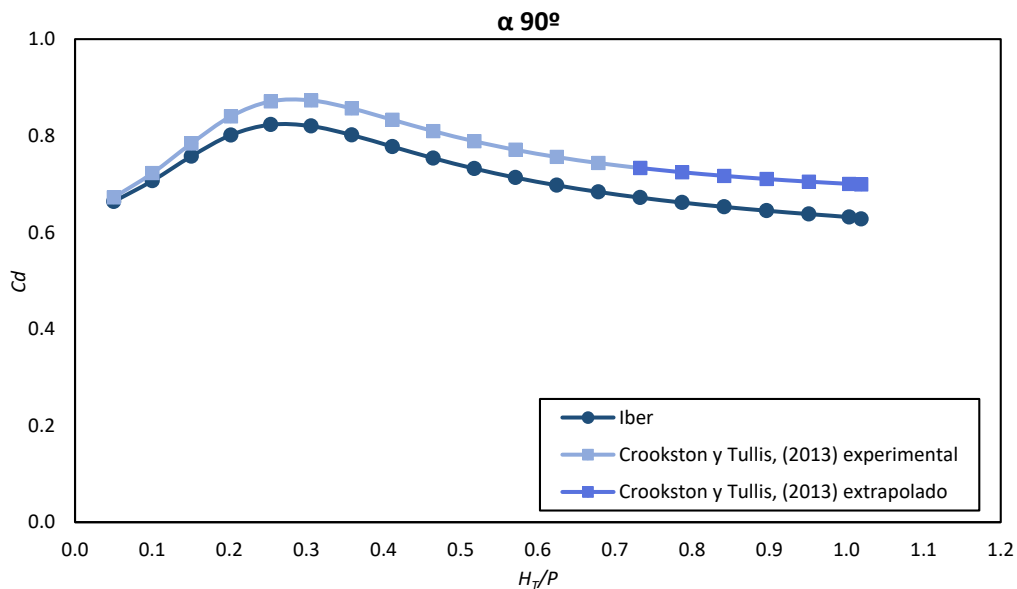


Figura 61. Comparación del coeficiente de descarga obtenido de las simulaciones en Iber con el calculado por Crookston y Tullis (2013) para aliviaderos en laberinto de 90°, “Half-Round”. Hipótesis 1 descarga libre.

En general en este tipo de perfil, se obtiene un mejor ajuste del coeficiente de descarga para valores $0.5 < H_T/P < 0.9$. A medida que la relación H_T/P excede el 0.9 el ajuste empeora, ligeramente aumentando el error.

En los aliviaderos con ángulos de 6°, 8° y 10°, (Gráficas 54, 55 y 56) para una baja relación H_T/P el error cometido es mayor, aunque disminuye conforme se aproxima a 0.5.

Para ángulos de 12°, 15° y 20° (Gráficas 57, 58 y 59) y valores de H_T/P en torno a 0-0.1, el coeficiente descarga obtenido es similar al de Crookston y Tullis (2013), pero conforme aumenta esta relación también aumenta Cd .

Para ángulos de 35° y 90° (Gráficas 60 y 61) y valores de $H_T/P < 0.2$ el coeficiente de descarga se aproxima al obtenido por Crookston y Tullis (2013).

Los resultados para $\alpha = 35^\circ$ son los que más se aproximan a los obtenidos por Crookston y Tullis (2013).

- Aliviadero en laberinto, perfil “Quarter-Round”:

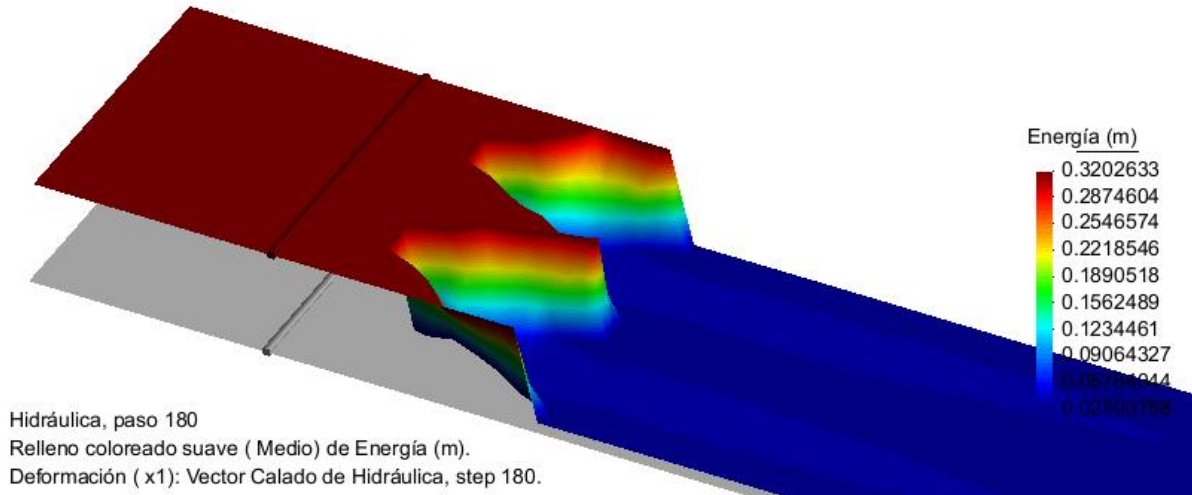


Figura 62. Energía obtenida en Iber tras la simulación para un aliviadero de 20° y perfil “Quarter-Round” para $H_T/P = 0.05$.

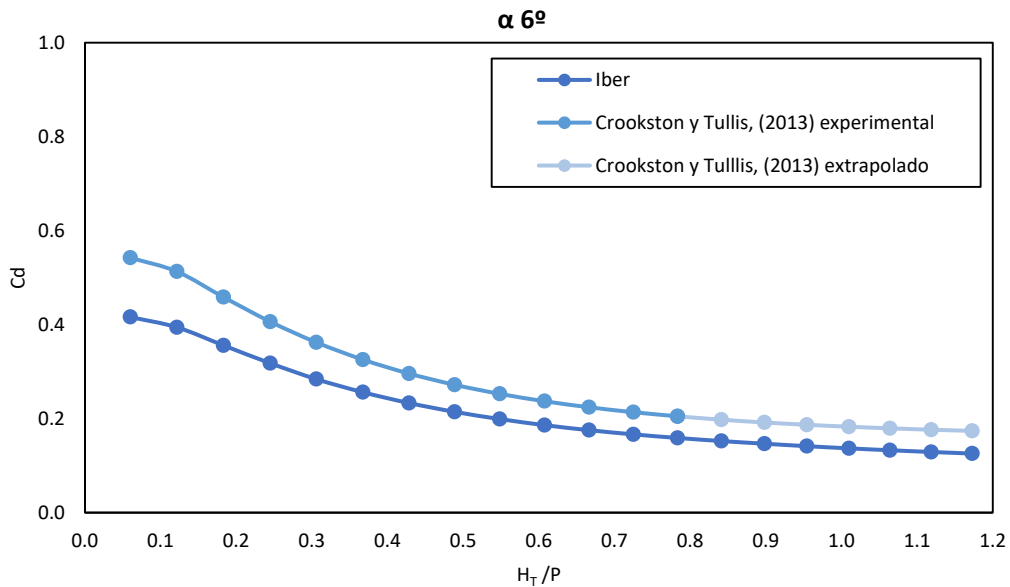


Figura 63. Comparación del coeficiente de descarga obtenido de las simulaciones en Iber con el calculado por Crookston y Tullis (2013) para aliviaderos en laberinto de 6°, “Quarter-Round”. Hipótesis 1 descarga libre.

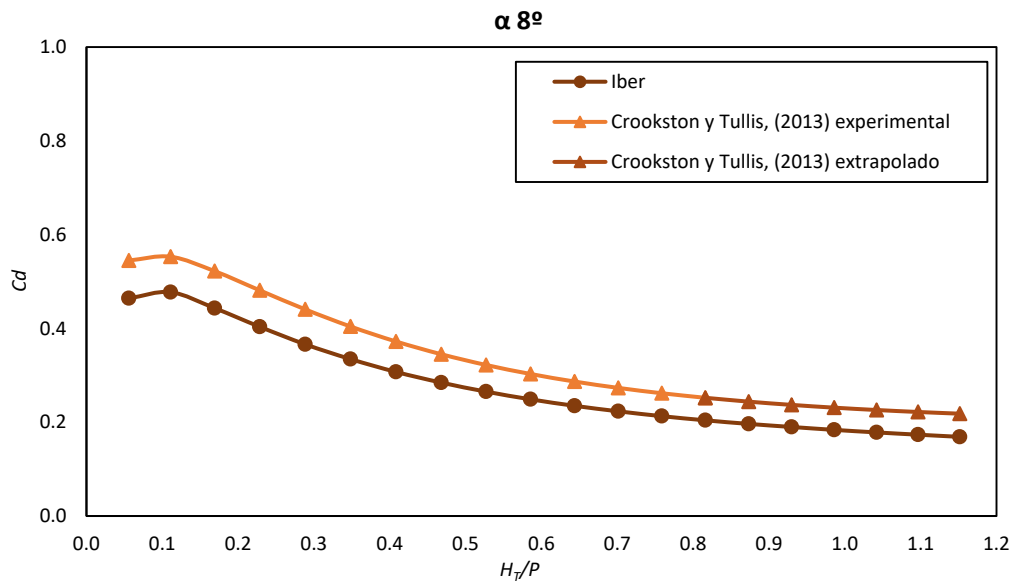


Figura 64. Comparación del coeficiente de descarga obtenido de las simulaciones en Iber con el calculado por Crookston y Tullis (2013) para aliviaderos en laberinto de 8° , “Quarter-Round”. Hipótesis 1 descarga libre.

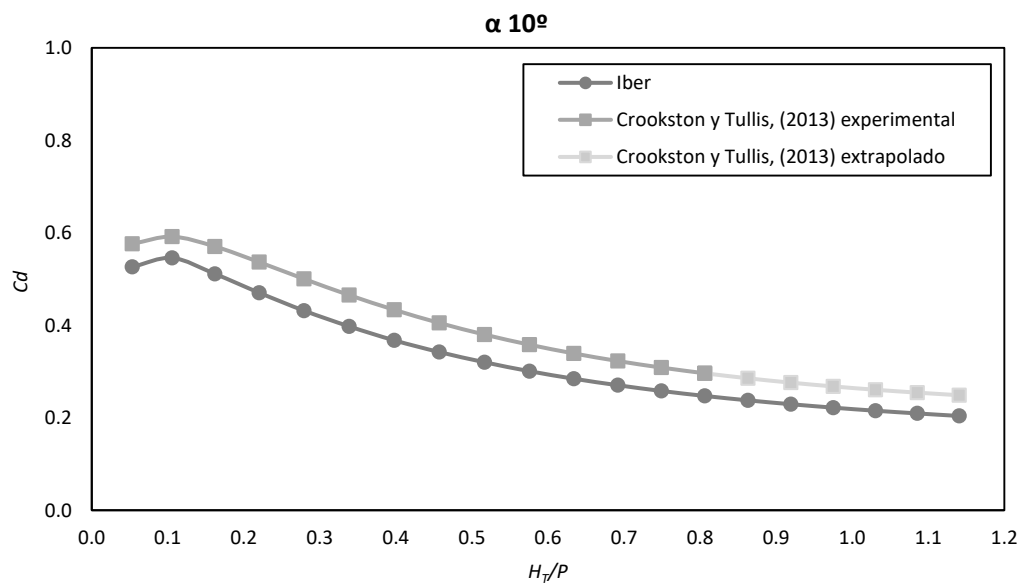


Figura 65. Comparación del coeficiente de descarga obtenido de las simulaciones en Iber con el calculado por Crookston y Tullis (2013) para aliviaderos en laberinto de 10° , “Quarter-Round”. Hipótesis 1 descarga libre.

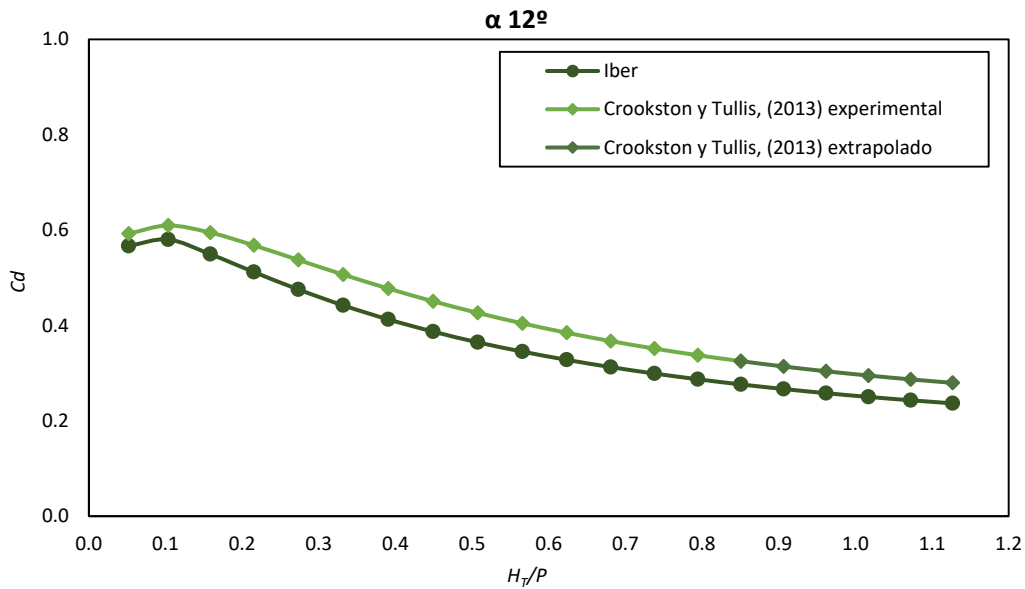


Figura 66. Comparación del coeficiente de descarga obtenido de las simulaciones en Iber con el calculado por Crookston y Tullis (2013) para aliviaderos en laberinto de 12° , “Quarter-Round”. Hipótesis 1 descarga libre.

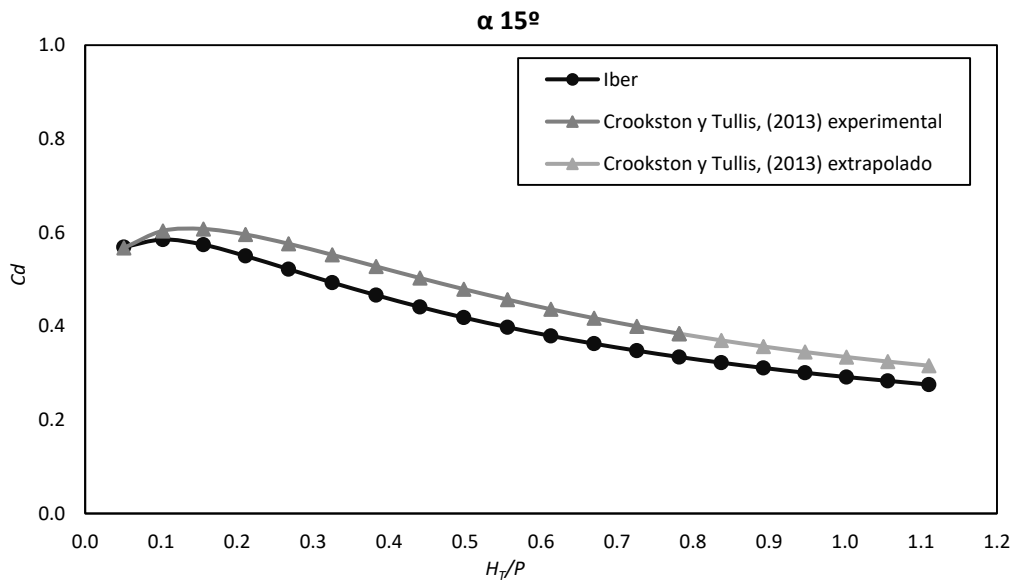


Figura 67. Comparación del coeficiente de descarga obtenido de las simulaciones en Iber con el calculado por Crookston y Tullis (2013) para aliviaderos en laberinto de 15° , “Quarter-Round”. Hipótesis 1 descarga libre.

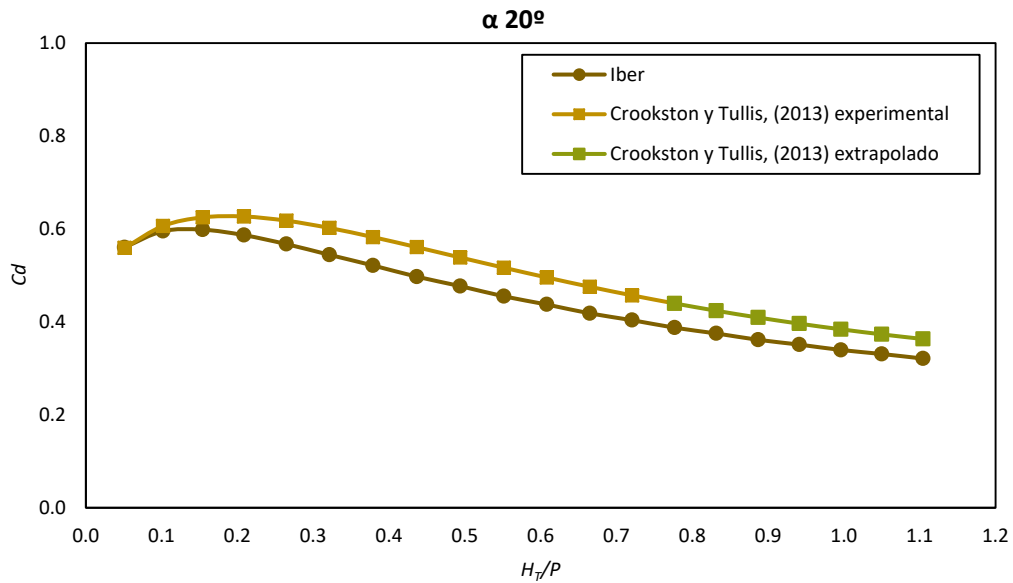


Figura 68. Comparación del coeficiente de descarga obtenido de las simulaciones en Iber con el calculado por Crookston y Tullis (2013) para aliviaderos en laberinto de 20° , “Quarter-Round”. Hipótesis 1 descarga libre.

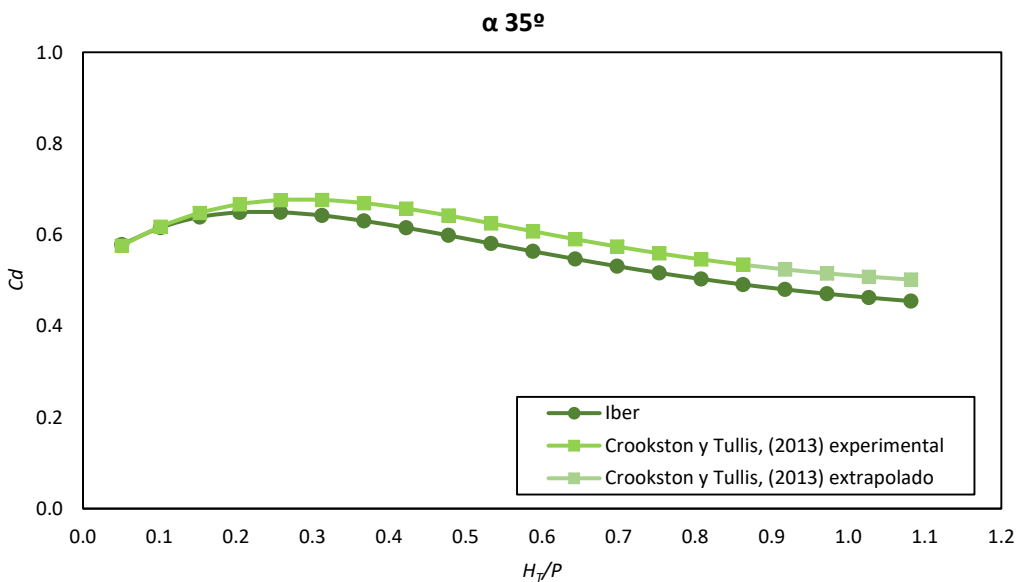


Figura 69. Comparación del coeficiente de descarga obtenido de las simulaciones en Iber con el calculado por Crookston y Tullis (2013) para aliviaderos en laberinto de 35° , “Quarter-Round”. Hipótesis 1 descarga libre.

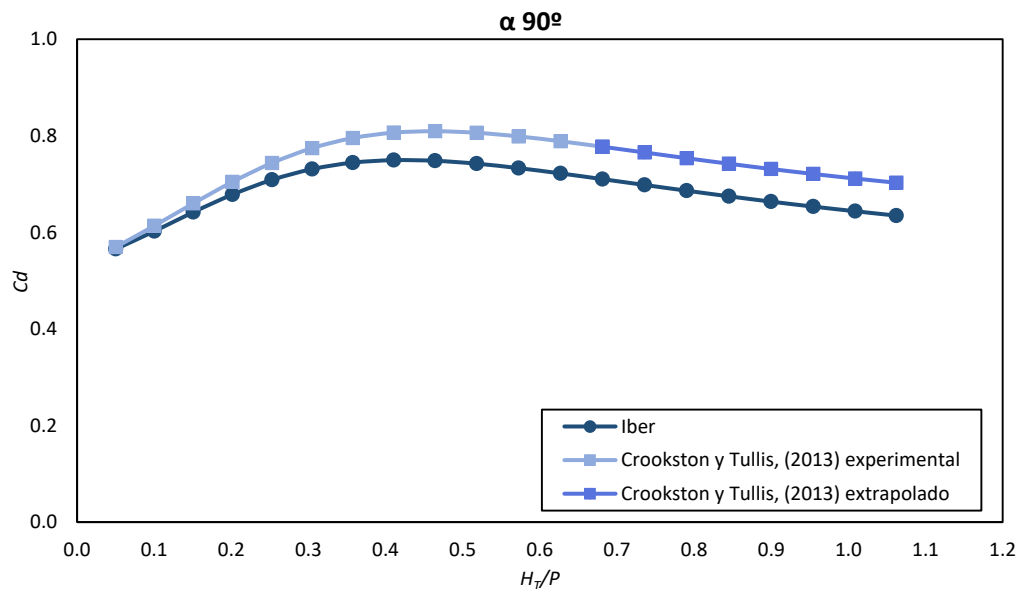


Figura 70. Comparación del coeficiente de descarga obtenido de las simulaciones en Iber con el calculado por Crookston y Tullis (2013) para aliviaderos en laberinto de 90° , “*Quarter-Round*”. Hipótesis 1 descarga libre.

Para este perfil de aliviadero, los resultados obtenidos de las simulaciones en Iber parecen acercarse un poco más a los resultados de Crookston y Tullis (2013). El comportamiento de las gráficas es similar a las del perfil “*Half-Round*”.

Hipótesis 2.

Los resultados obtenidos en esta hipótesis tienen una tendencia muy parecida a los de la hipótesis anterior, aunque para valores de $H_T/P < 0.1$ el coeficiente de descarga se aproxima al resultado de Crookston y Tullis, (2013). Los mejores resultados se obtienen para $0.4 < H_T/P < 1.1$ en perfiles “*Half-Round*” y para $0.5-0.6 < H_T/P < 1.1$ en perfiles “*Quarter-Round*”. Para el perfil “*Quarter-Round*” se obtienen resultados más precisos que en el perfil “*Half-Round*”.

- Aliviadero en laberinto, perfil “Half-Round”:

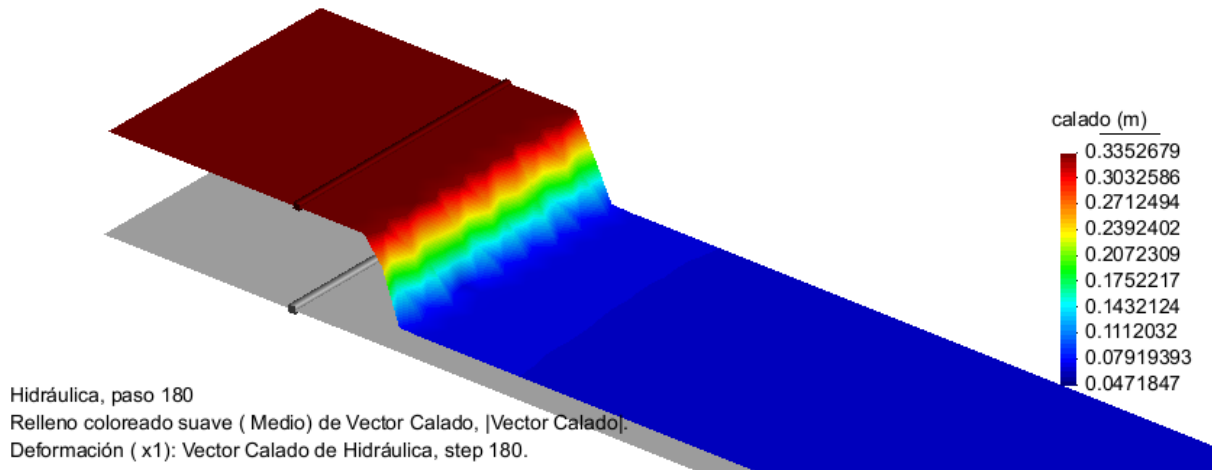


Figura 71. Calado obtenido en Iber tras la simulación para un aliviadero de 15° y perfil “Half-Round” para $H_T/P=0.1$.

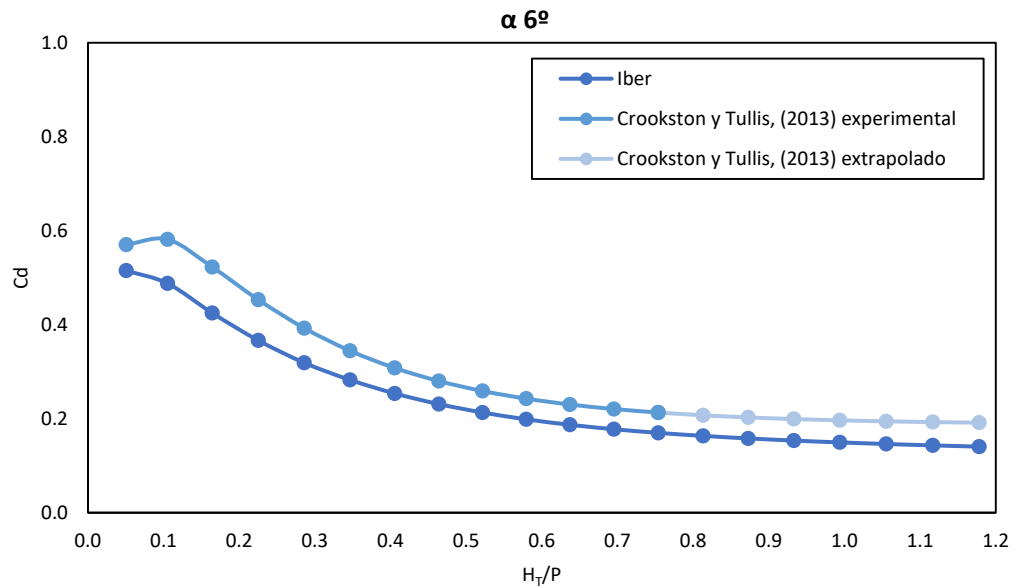


Figura 72. Comparación del coeficiente de descarga obtenido de las simulaciones en Iber con el calculado por Crookston y Tullis (2013) para aliviaderos en laberinto de 6°, “Half-Round”. Hipótesis 2 descarga libre.

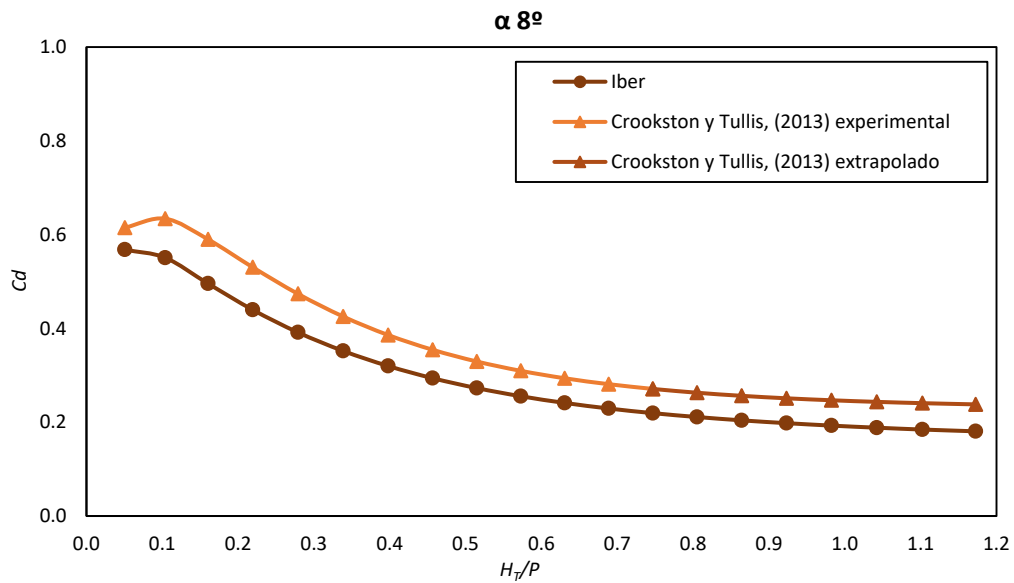


Figura 73. Comparación del coeficiente de descarga obtenido de las simulaciones en Iber con el calculado por Crookston y Tullis (2013) para aliviaderos en laberinto de 8° , “Half-Round”. Hipótesis 2 descarga libre.

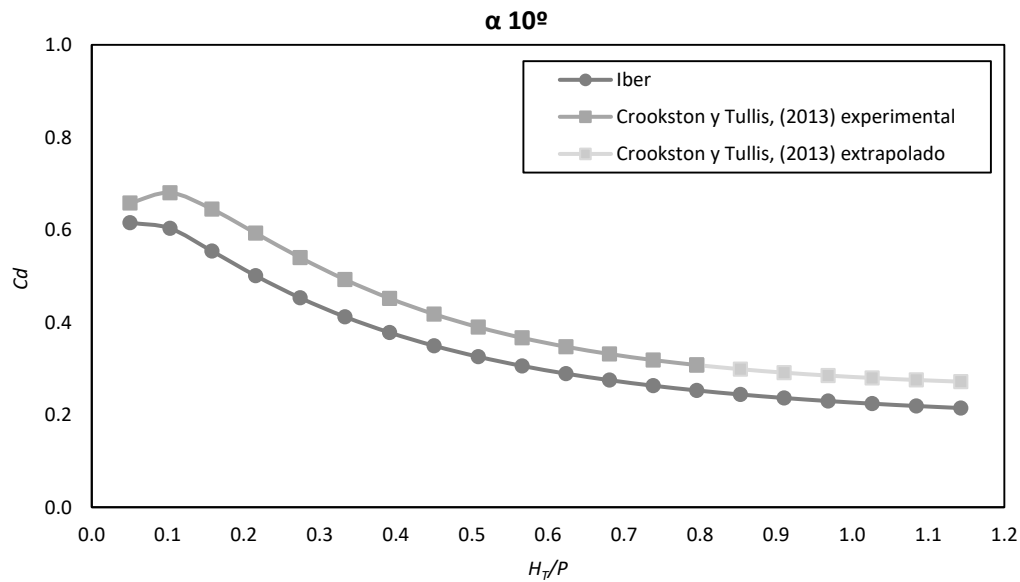


Figura 74. Comparación del coeficiente de descarga obtenido de las simulaciones en Iber con el calculado por Crookston y Tullis (2013) para aliviaderos en laberinto de 10° , “Half-Round”. Hipótesis 2 descarga libre.

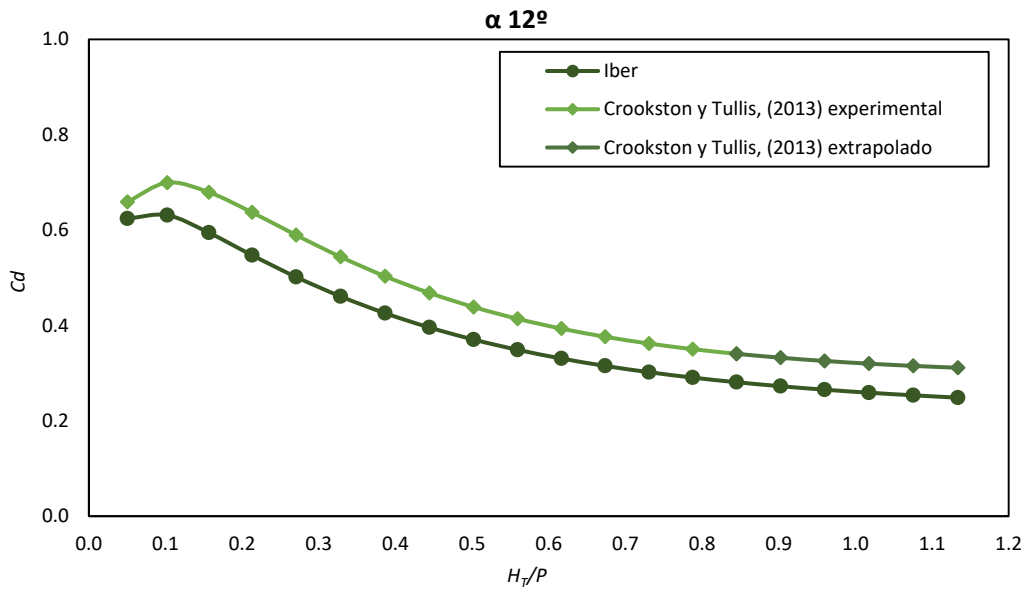


Figura 75. Comparación del coeficiente de descarga obtenido de las simulaciones en Iber con el calculado por Crookston y Tullis (2013) para aliviaderos en laberinto de 12° , “Half-Round”. Hipótesis 2 descarga libre.

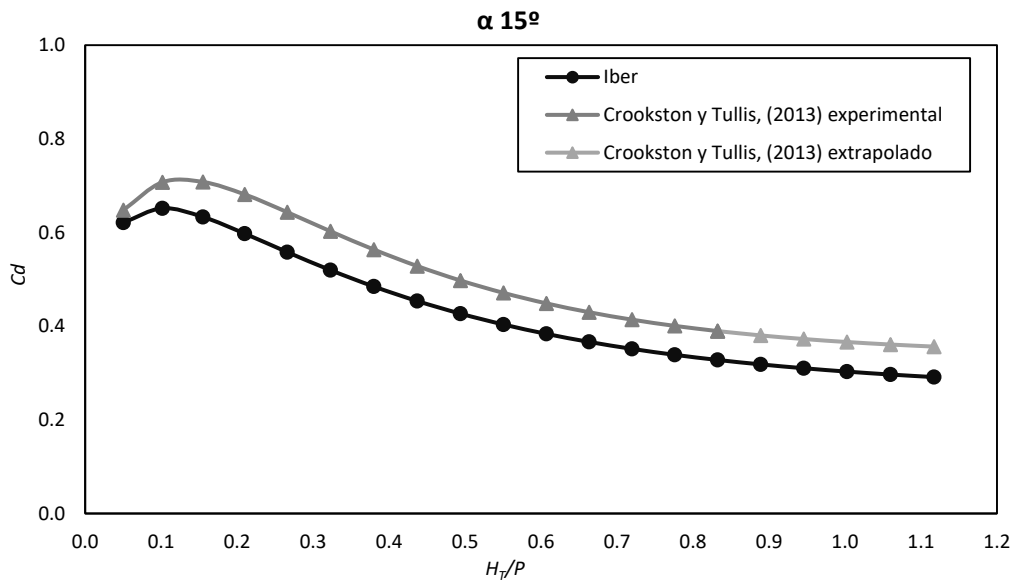


Figura 76. Comparación del coeficiente de descarga obtenido de las simulaciones en Iber con el calculado por Crookston y Tullis (2013) para aliviaderos en laberinto de 15° , “Half-Round”. Hipótesis 2 descarga libre.

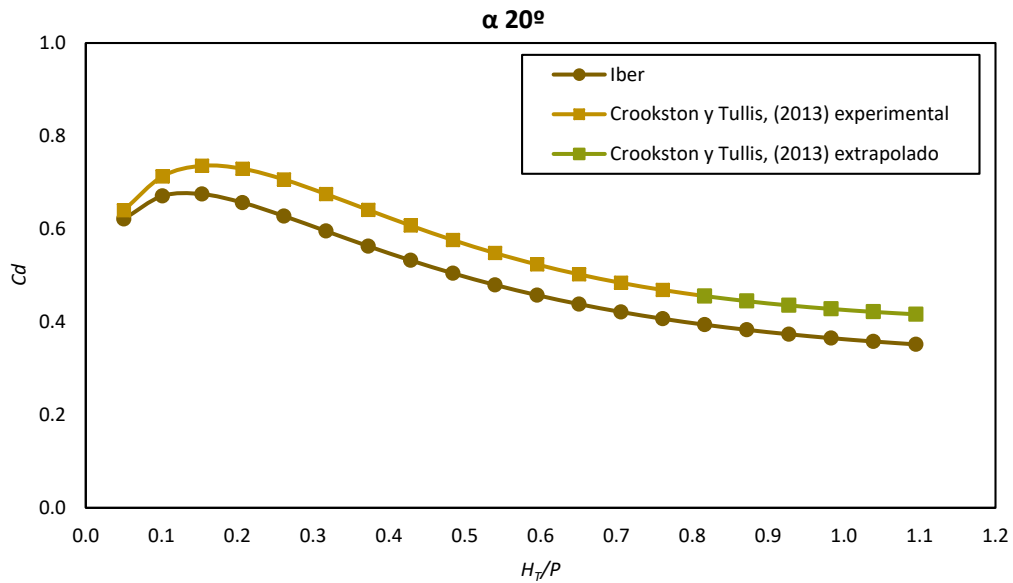


Figura 77. Comparación del coeficiente de descarga obtenido de las simulaciones en Iber con el calculado por Crookston y Tullis (2013) para aliviaderos en laberinto de 20° , “Half-Round”. Hipótesis 2 descarga libre.

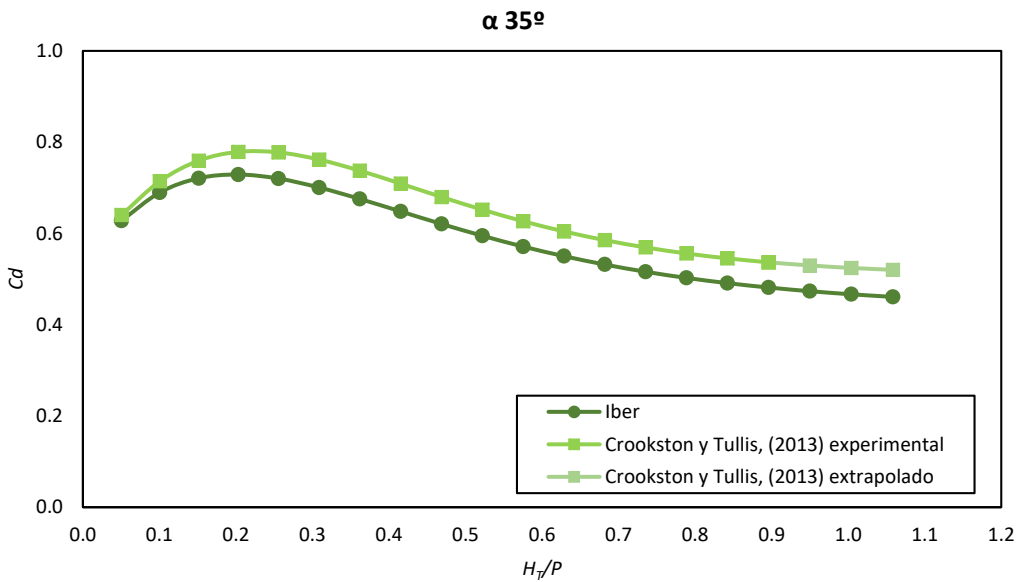


Figura 78. Comparación del coeficiente de descarga obtenido de las simulaciones en Iber con el calculado por Crookston y Tullis (2013) para aliviaderos en laberinto de 35° , “Half-Round”. Hipótesis 2 descarga libre.

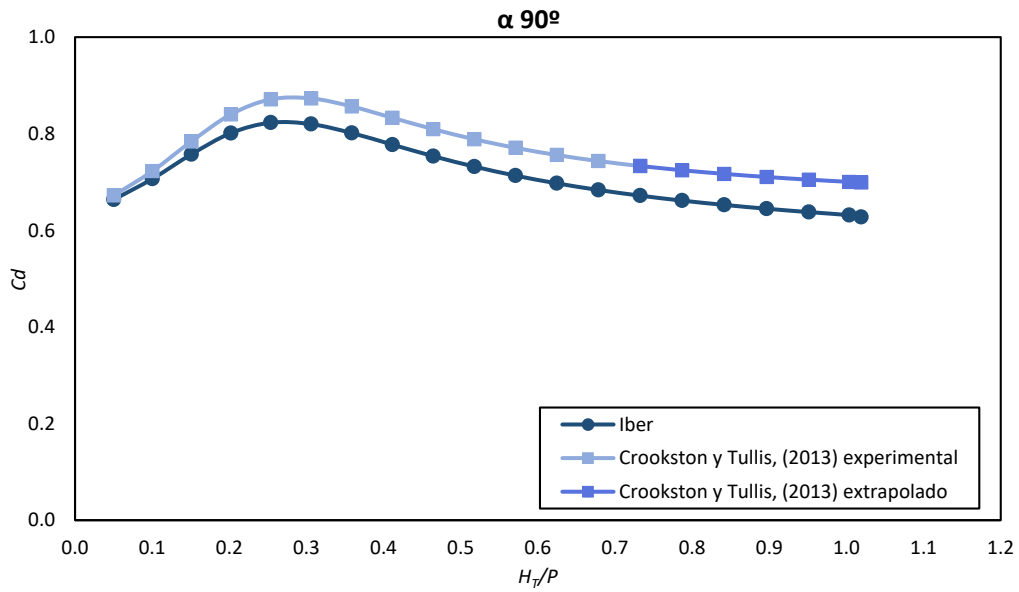


Figura 79. Comparación del coeficiente de descarga obtenido de las simulaciones en Iber con el calculado por Crookston y Tullis (2013) para aliviaderos en laberinto de 90° , “Half-Round”. Hipótesis 2 descarga libre.

- Aliviadero en laberinto, perfil “Quarter-Round”:

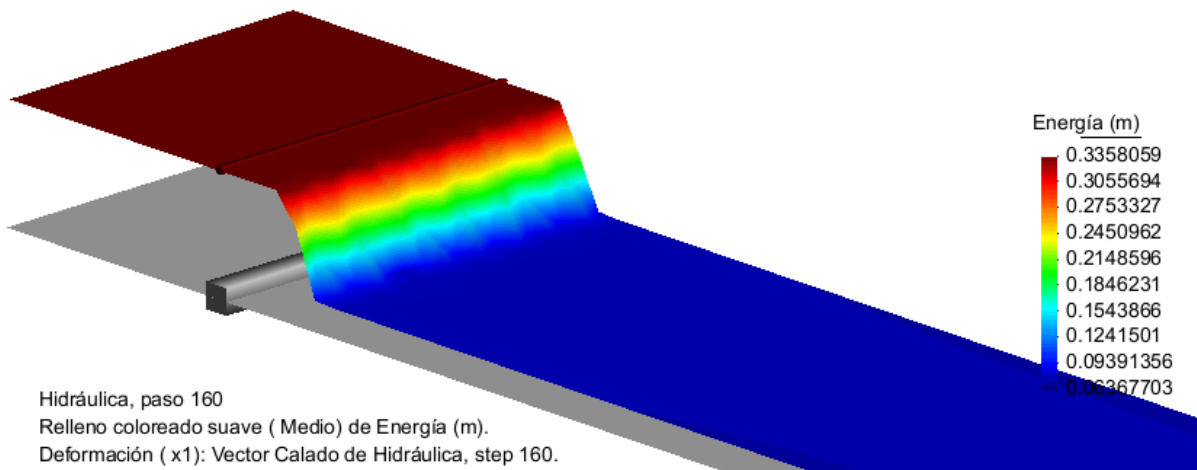


Figura 80. Energía obtenida en Iber tras la simulación para un aliviadero de 12° y perfil “Quarter-Round” para $H_T/P = 0.1$.

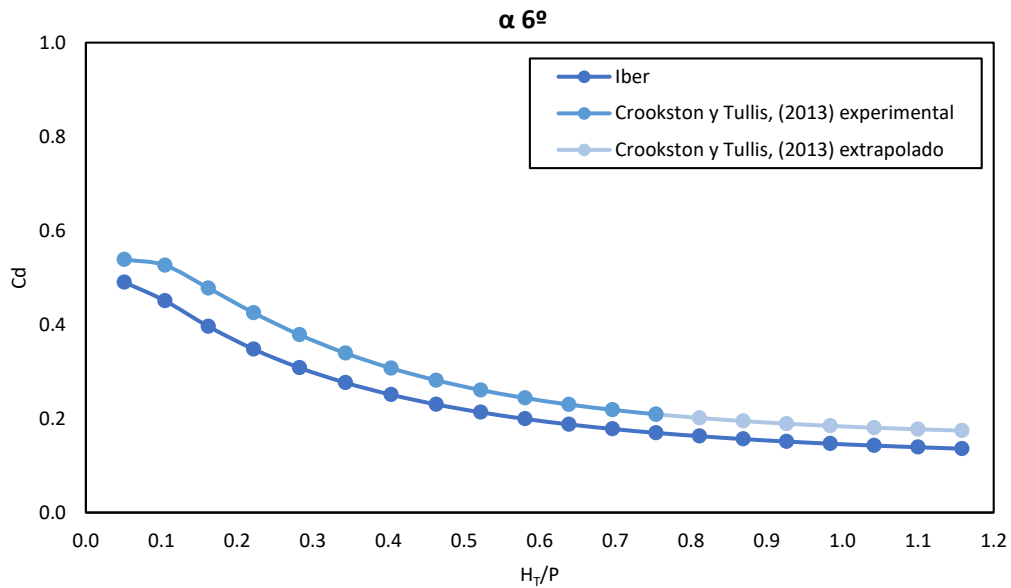


Figura 81. Comparación del coeficiente de descarga obtenido de las simulaciones en Iber con el calculado por Crookston y Tullis (2013) para aliviaderos en laberinto de 6° , “Quarter-Round”. Hipótesis 2 descarga libre.

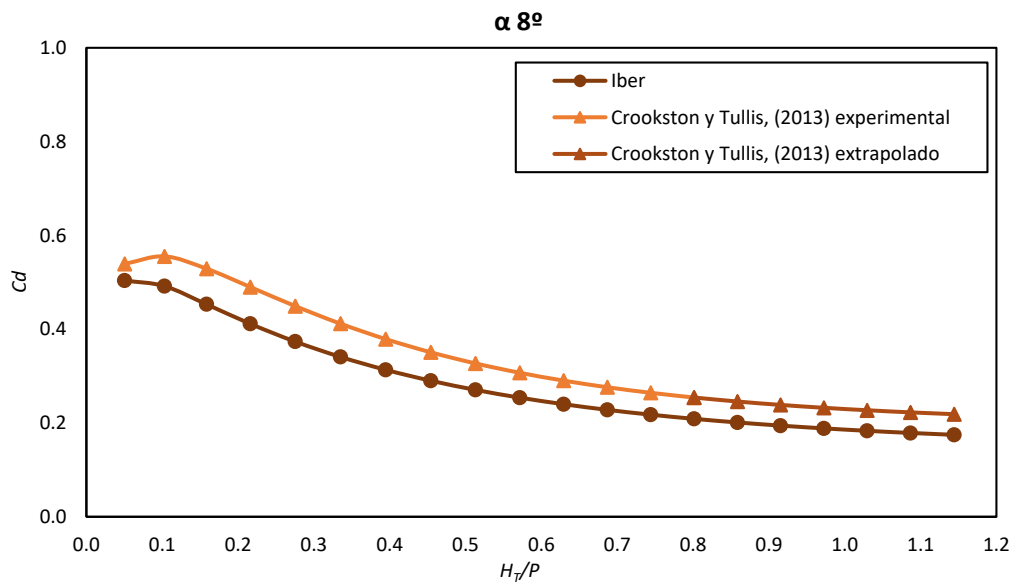


Figura 82. Comparación del coeficiente de descarga obtenido de las simulaciones en Iber con el calculado por Crookston y Tullis (2013) para aliviaderos en laberinto de 8° , “Quarter-Round”. Hipótesis 2 descarga libre.

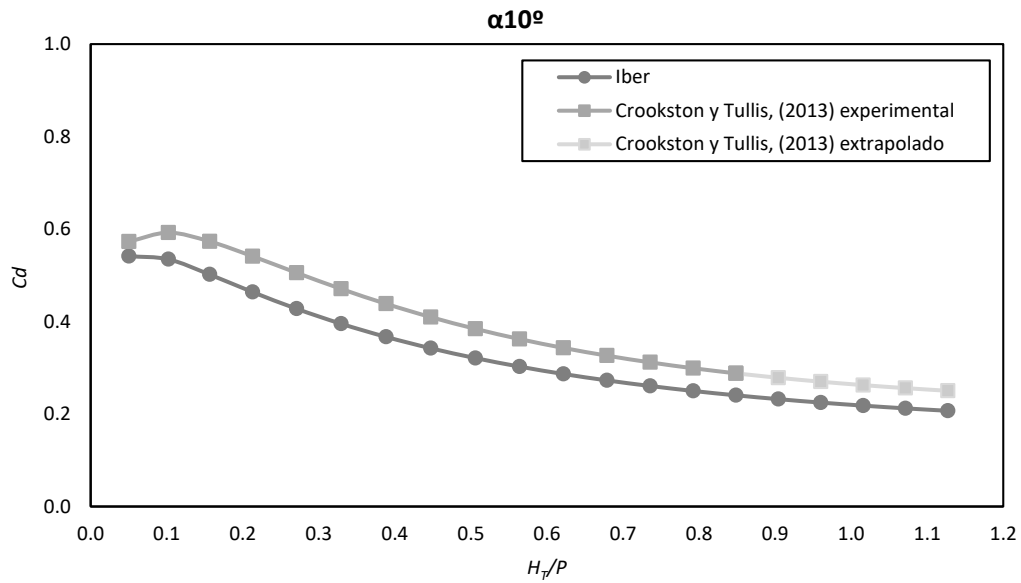


Figura 83. Comparación del coeficiente de descarga obtenido de las simulaciones en Iber con el calculado por Crookston y Tullis (2013) para aliviaderos en laberinto de 10° , “Quarter-Round”. Hipótesis 2 descarga libre.

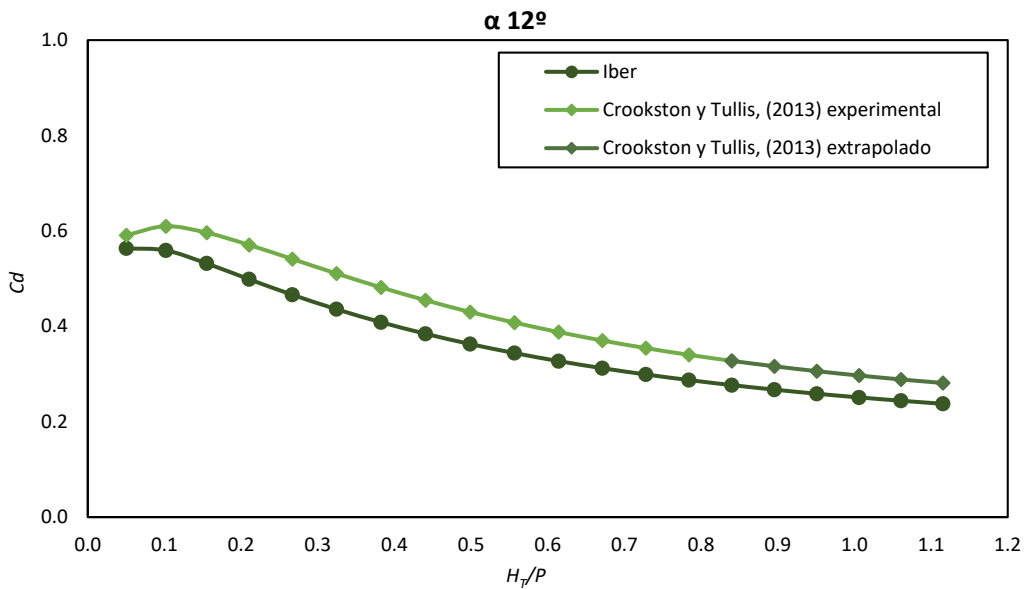


Figura 84. Comparación del coeficiente de descarga obtenido de las simulaciones en Iber con el calculado por Crookston y Tullis (2013) para aliviaderos en laberinto de 12° , “Quarter-Round”. Hipótesis 2 descarga libre.

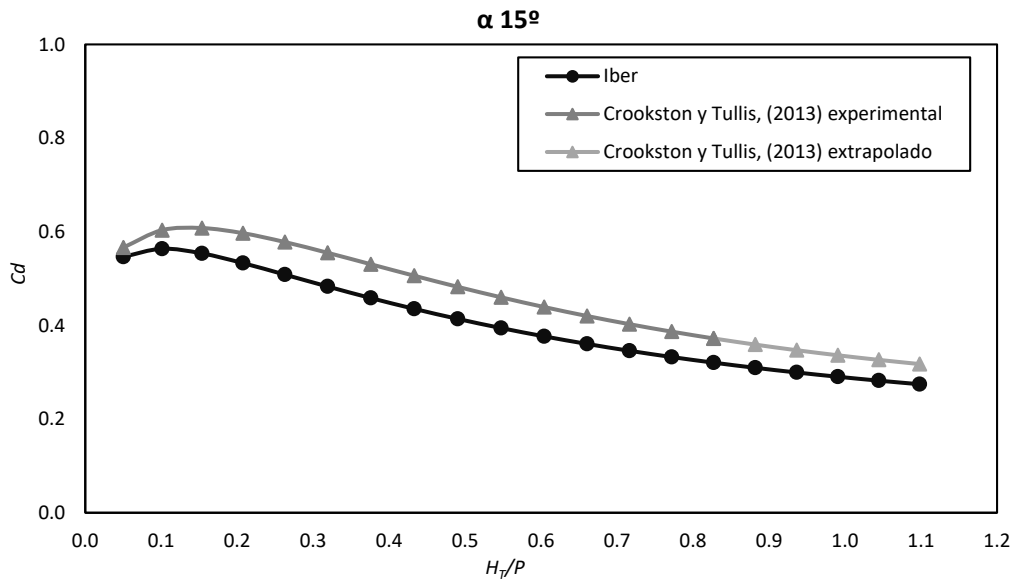


Figura 85. Comparación del coeficiente de descarga obtenido de las simulaciones en Iber con el calculado por Crookston y Tullis (2013) para aliviaderos en laberinto de 15° , “Quarter-Round”. Hipótesis 2 descarga libre.

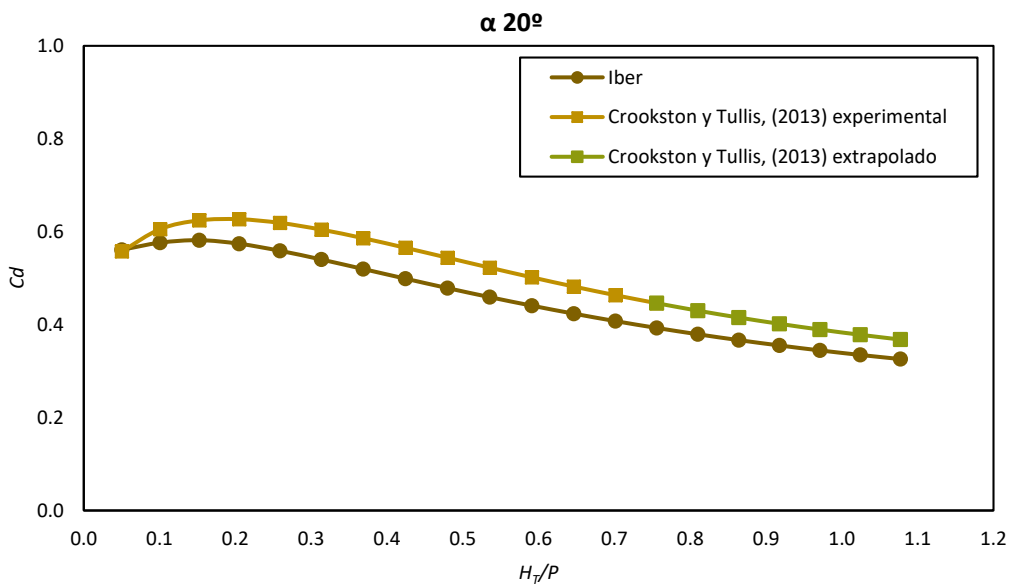


Figura 86. Comparación del coeficiente de descarga obtenido de las simulaciones en Iber con el calculado por Crookston y Tullis (2013) para aliviaderos en laberinto de 20° , “Quarter-Round”. Hipótesis 2 descarga libre.

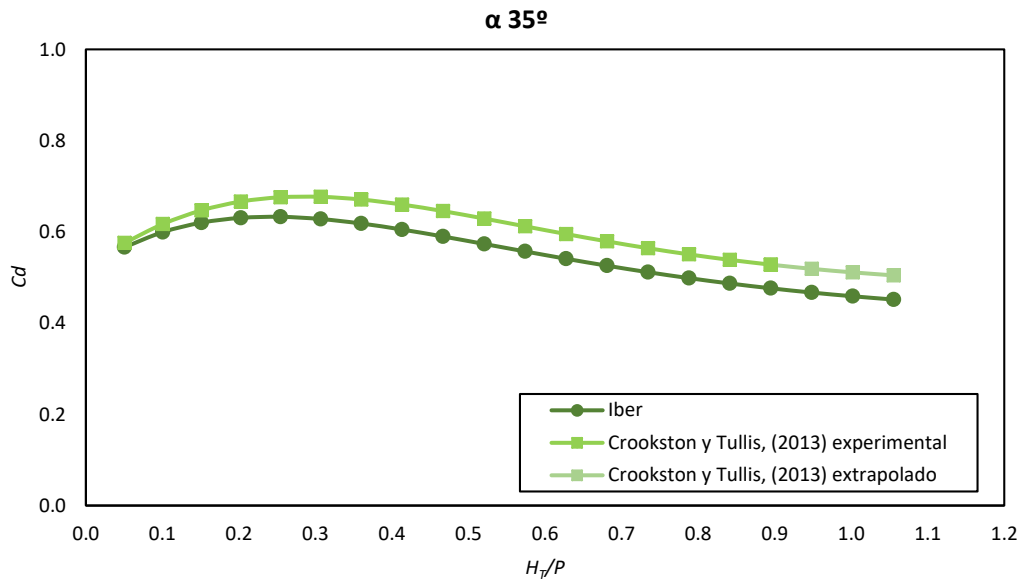


Figura 87. Comparación del coeficiente de descarga obtenido de las simulaciones en Iber con el calculado por Crookston y Tullis (2013) para aliviaderos en laberinto de 35° , “Quarter-Round”. Hipótesis 2 descarga libre.

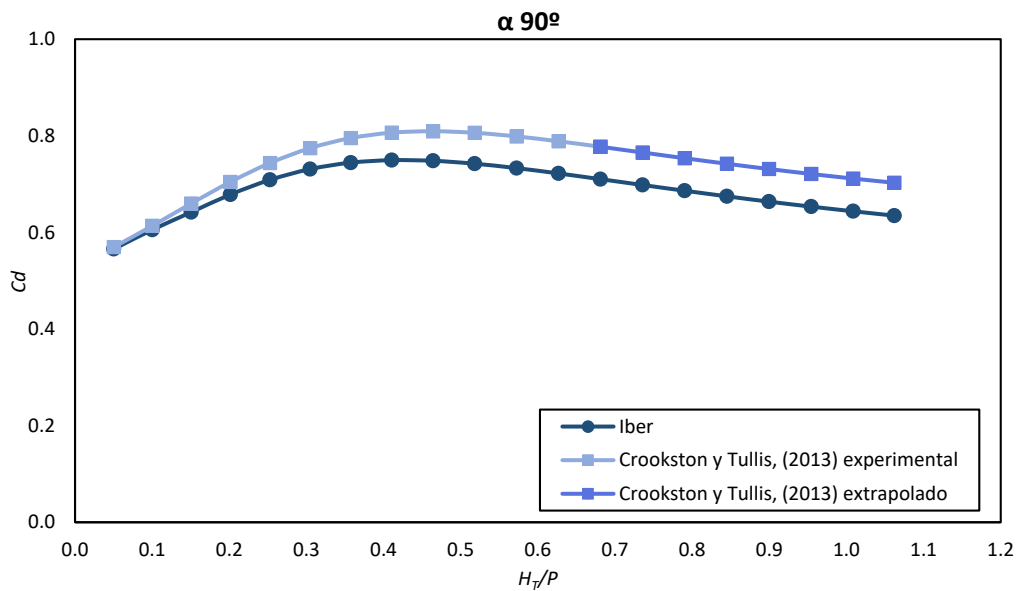


Figura 88. Comparación del coeficiente de descarga obtenido de las simulaciones en Iber con el calculado por Crookston y Tullis (2013) para aliviaderos en laberinto de 90° , “Quarter-Round”. Hipótesis 2 descarga libre.

Hipótesis 3.

- Aliviadero en laberinto, perfil “Half-Round”:

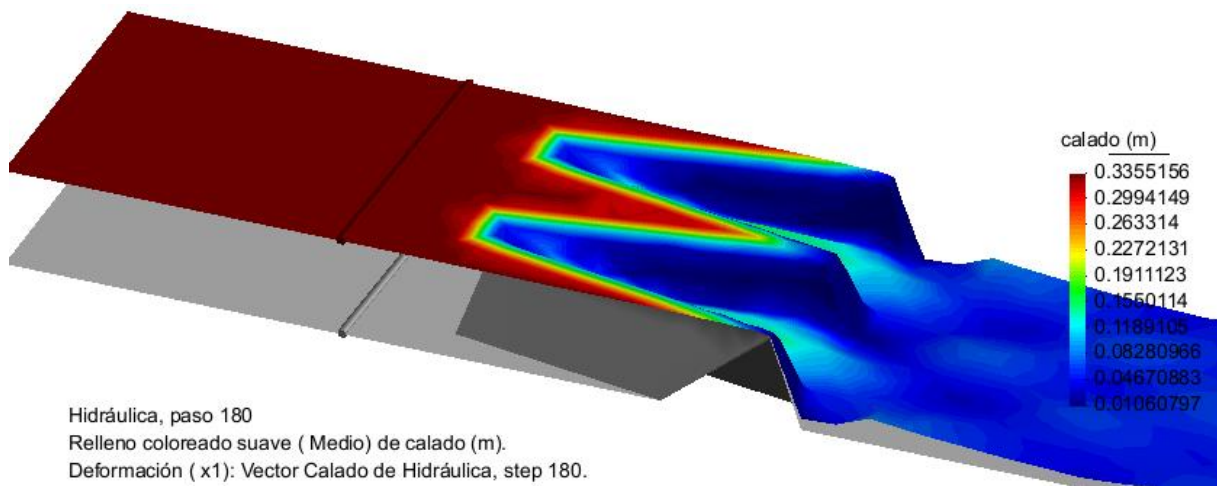


Figura 89. Calado obtenido en Iber tras la simulación para un aliviadero de 10° y perfil “Half-Round” para $H_T/P=0.1$.

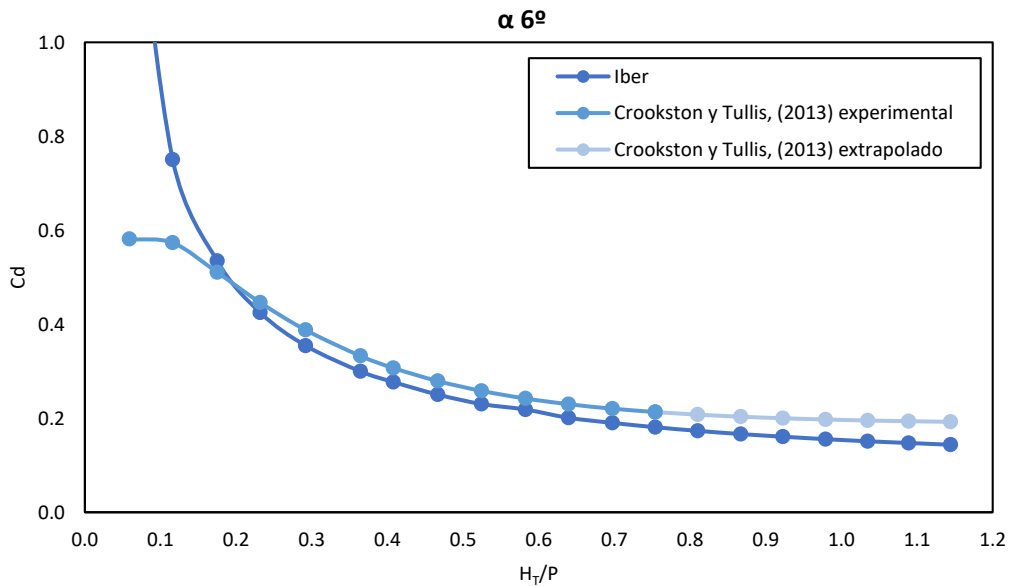


Figura 90. Comparación del coeficiente de descarga obtenido de las simulaciones en Iber con el calculado por Crookston y Tullis (2013) para aliviaderos en laberinto de 6°, “Half-Round”. Hipótesis 3 descarga libre.

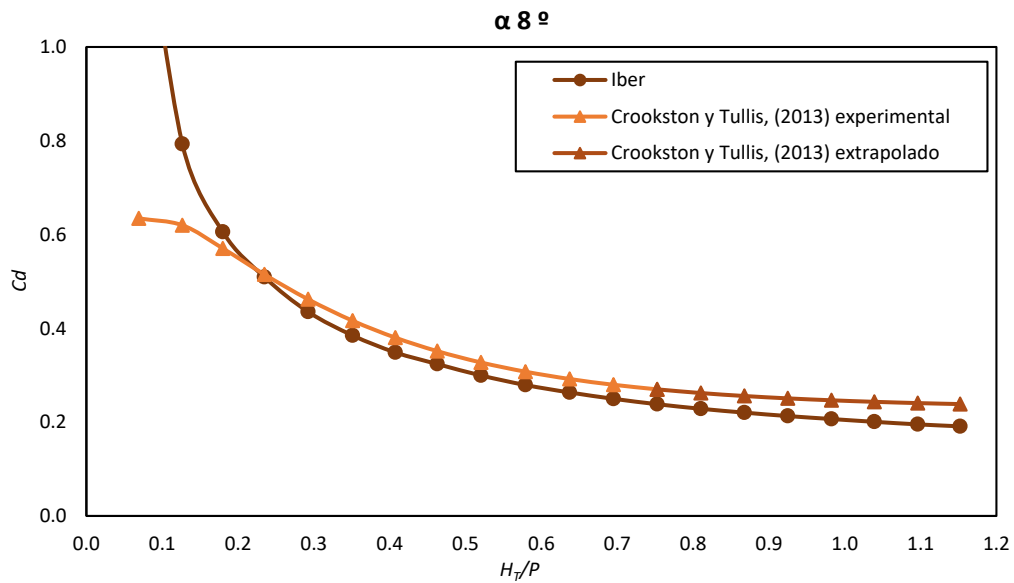


Figura 91. Comparación del coeficiente de descarga obtenido de las simulaciones en Iber con el calculado por Crookston y Tullis (2013) para aliviaderos en laberinto con paredes de 8° , “Half-Round”. Hipótesis 3 descarga libre.

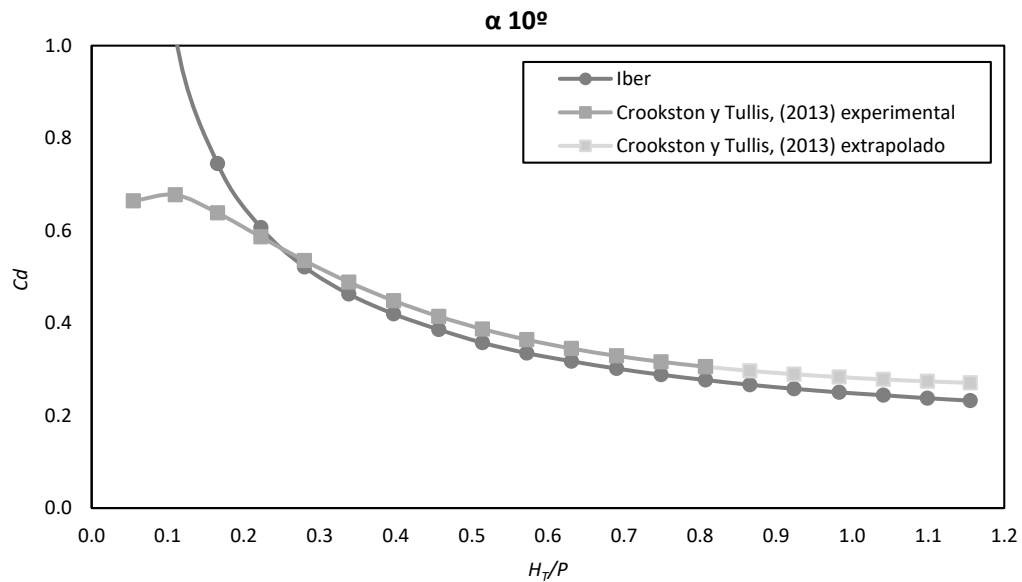


Figura 92. Comparación del coeficiente de descarga obtenido de las simulaciones en Iber con el calculado por Crookston y Tullis (2013) para aliviaderos en laberinto de 10° , “Half-Round”. Hipótesis 3 descarga libre.

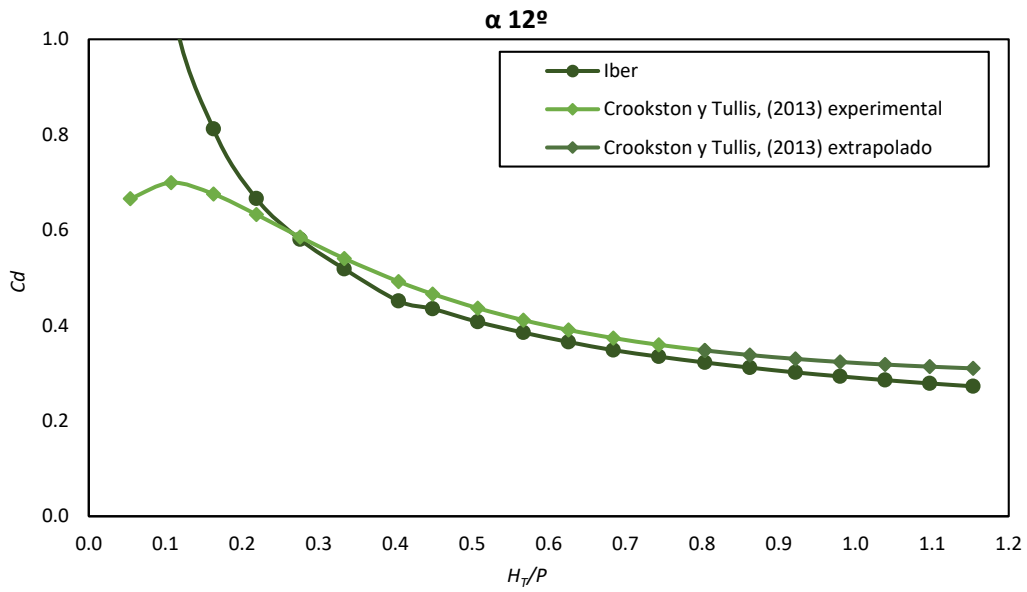


Figura 93. Comparación del coeficiente de descarga obtenido de las simulaciones en Iber con el calculado por Crookston y Tullis (2013) para aliviaderos en laberinto de 12° , “Half-Round”. Hipótesis 3 descarga libre.

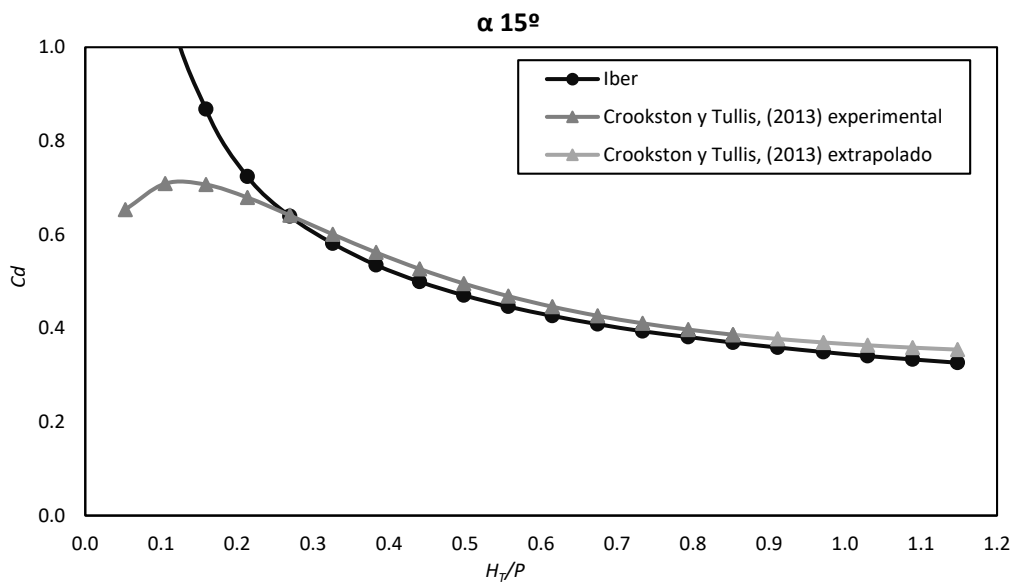


Figura 94. Comparación del coeficiente de descarga obtenido de las simulaciones en Iber con el calculado por Crookston y Tullis (2013) para aliviaderos en laberinto de 15° , “Half-Round”. Hipótesis 3 descarga libre.

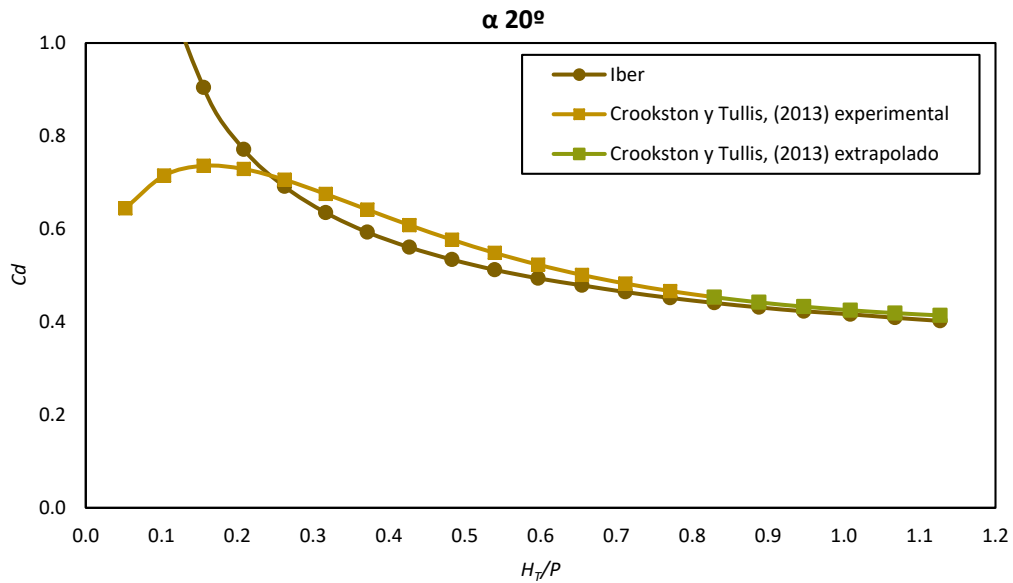


Figura 95. Comparación del coeficiente de descarga obtenido de las simulaciones en Iber con el calculado por Crookston y Tullis (2013) para aliviaderos en laberinto de 20° , “Half-Round”. Hipótesis 3 descarga libre.

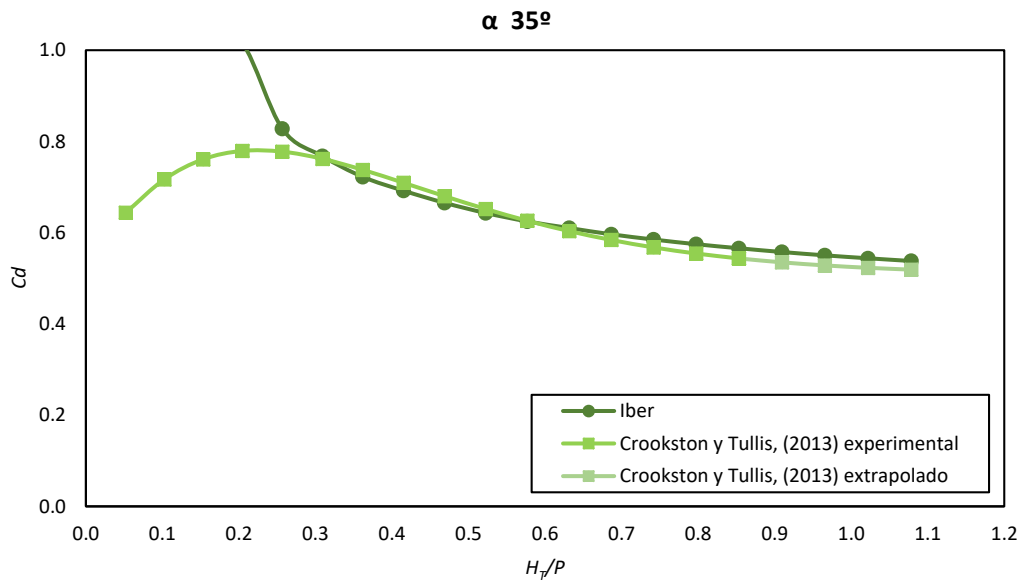


Figura 96. Comparación del coeficiente de descarga obtenido de las simulaciones en Iber con el calculado por Crookston y Tullis (2013) para aliviaderos en laberinto de 35° , “Half-Round”. Hipótesis 3 descarga libre.

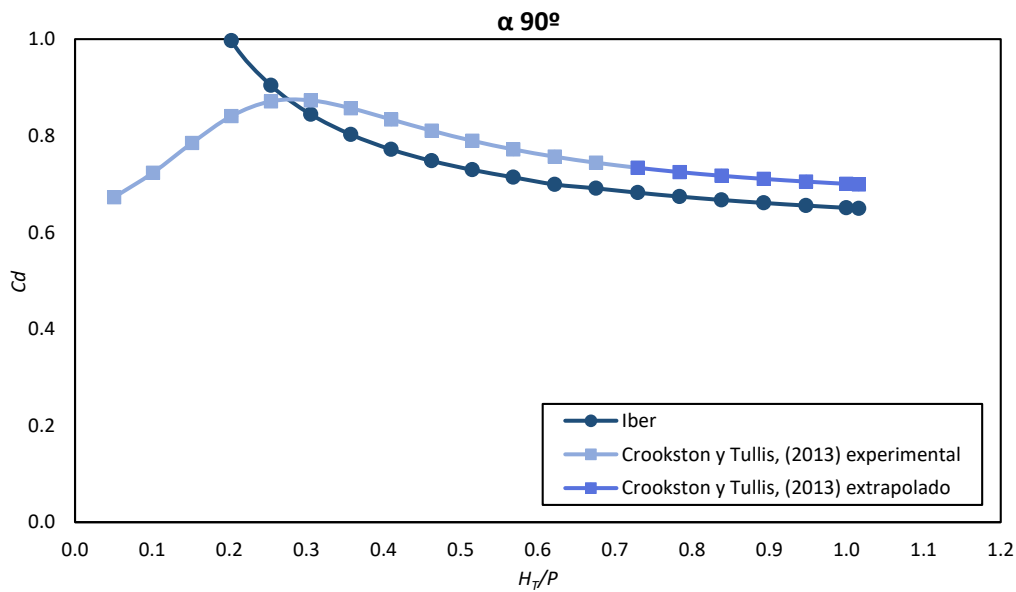


Figura 97. Comparación del coeficiente de descarga obtenido de las simulaciones en Iber con el calculado por Crookston y Tullis (2013) para aliviaderos en laberinto de 90° , “Half-Round”. Hipótesis 3 descarga libre.

En esta hipótesis con perfiles “Half-Round” para una baja relación H_T/P no se recomienda el uso del programa. En general para $H_T/P > 0.2-0.3$ los coeficientes de descarga obtenidos en Iber siguen una tendencia similar a los de Crookston y Tullis, (2013) y mantienen una misma secuencia conforme aumenta la relación H_T/P .

Para $\alpha = 6^\circ, 8^\circ, 10^\circ, 12^\circ$ y 15° (Gráficas 90, 91, 92, 93 y 94) y valores $0.3 < H_T/P < 0.9$ se obtiene el mejor ajuste del coeficiente de descarga respecto al de Crookston y Tullis, (2013). A partir de $H_T/P \approx 0.9$ el error aumenta progresivamente.

Para $\alpha = 20^\circ$ y 90° (Gráfica 95 y 97) el coeficiente de descarga se aproxima más al de los otros autores cuando $H_T/P \geq 0.7$, aunque los resultados para $\alpha = 20^\circ$ son más precisos que los de $\alpha = 90^\circ$.

Para $\alpha = 35^\circ$ (Gráfica 96) el coeficiente de descarga obtenido en Iber es menor al Crookston y Tullis, (2013) cuando $0.3 < H_T/P < 0.6$. Para $H_T/P > 0.6$, C_d es mayor que Crookston y Tullis (2013) y con tendencia a aumentar el error respecto a los valores de referencia.

- Aliviadero en laberinto, perfil “Quarter-Round”:

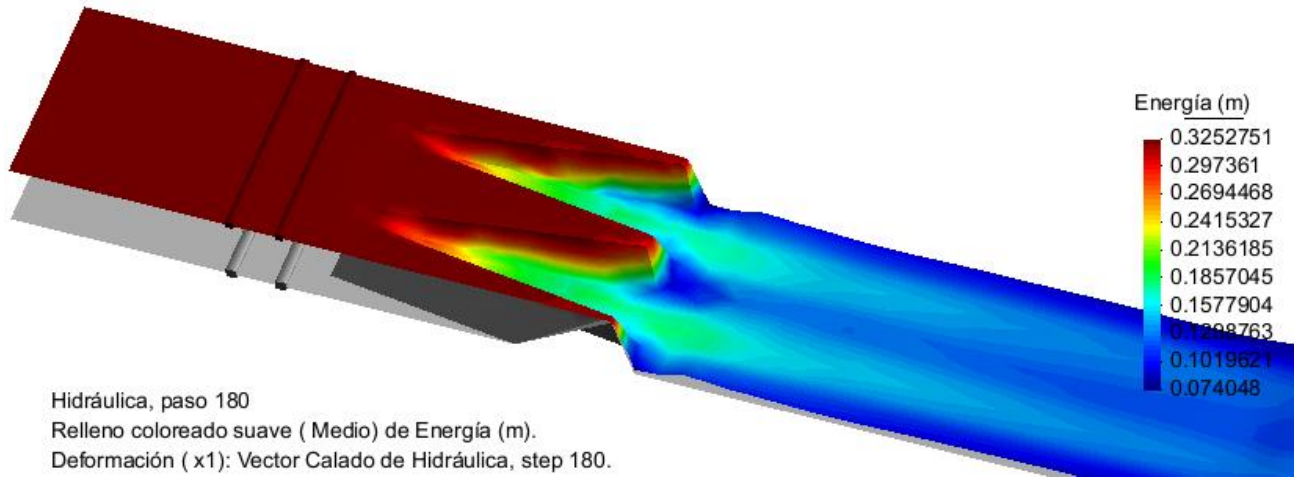


Figura 98. Energía obtenida en Iber tras la simulación para un aliviadero de 8° y perfil “Quarter-Round” para $H_T/P=0.05$.

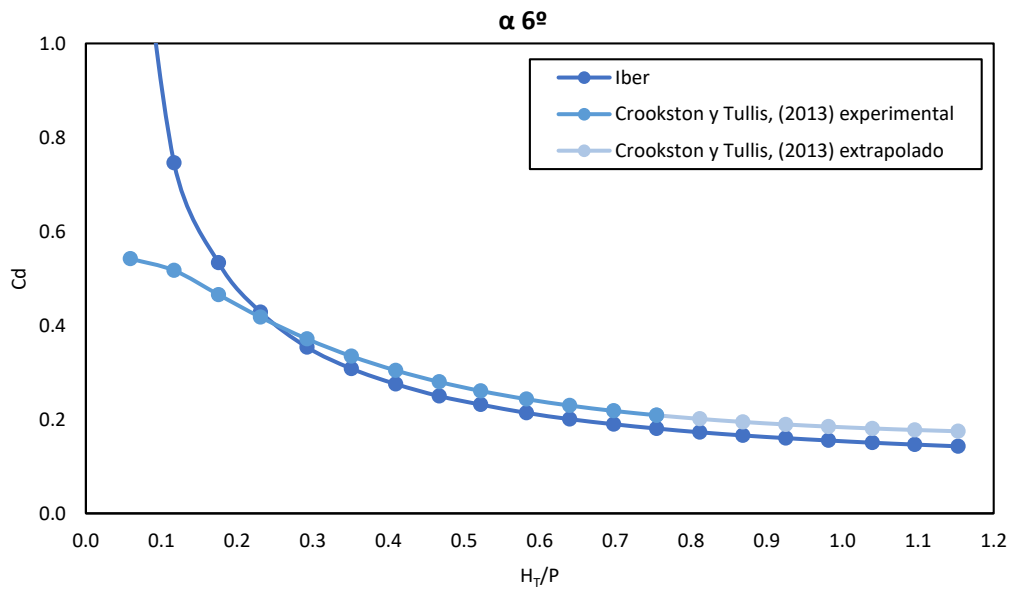


Figura 99. Comparación del coeficiente de descarga obtenido de las simulaciones en Iber con el calculado por Crookston y Tullis (2013) para aliviaderos en laberinto de 6°, “Quarter-Round”. Hipótesis 3 descarga libre.

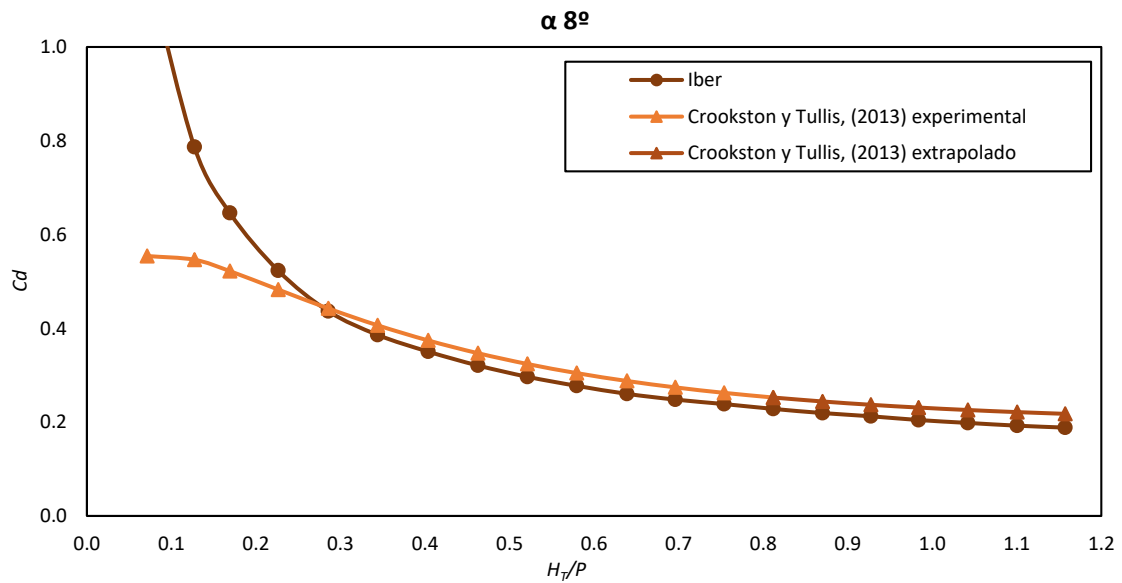


Figura 100. Comparación del coeficiente de descarga obtenido de las simulaciones en Iber con el calculado por Crookston y Tullis (2013) para aliviaderos en laberinto de 8° , “Quarter-Round”. Hipótesis 3 descarga libre.

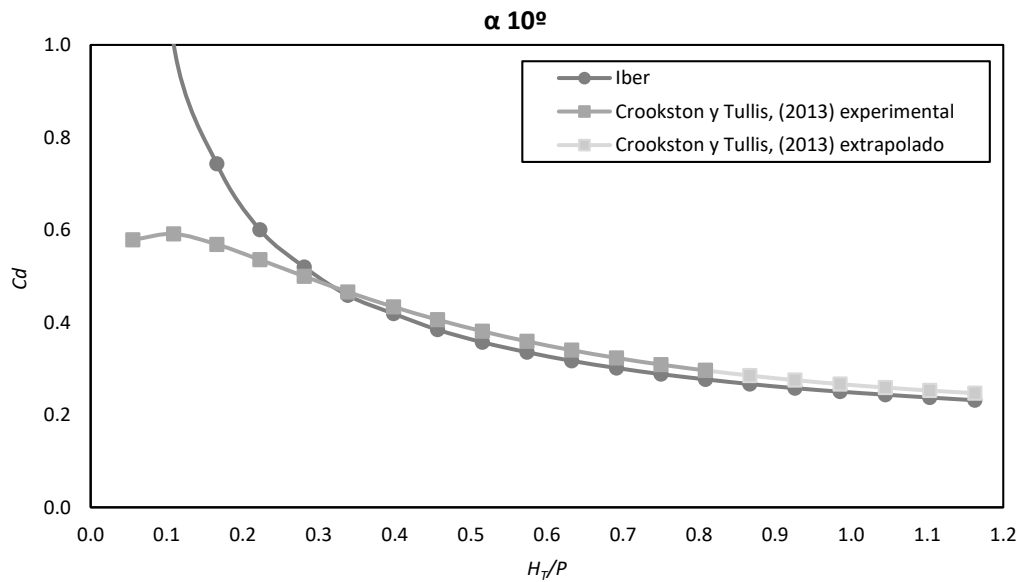


Figura 101. Comparación del coeficiente de descarga obtenido de las simulaciones en Iber con el calculado por Crookston y Tullis (2013) para aliviaderos en laberinto de 10° , “Quarter-Round”. Hipótesis 3 descarga libre.

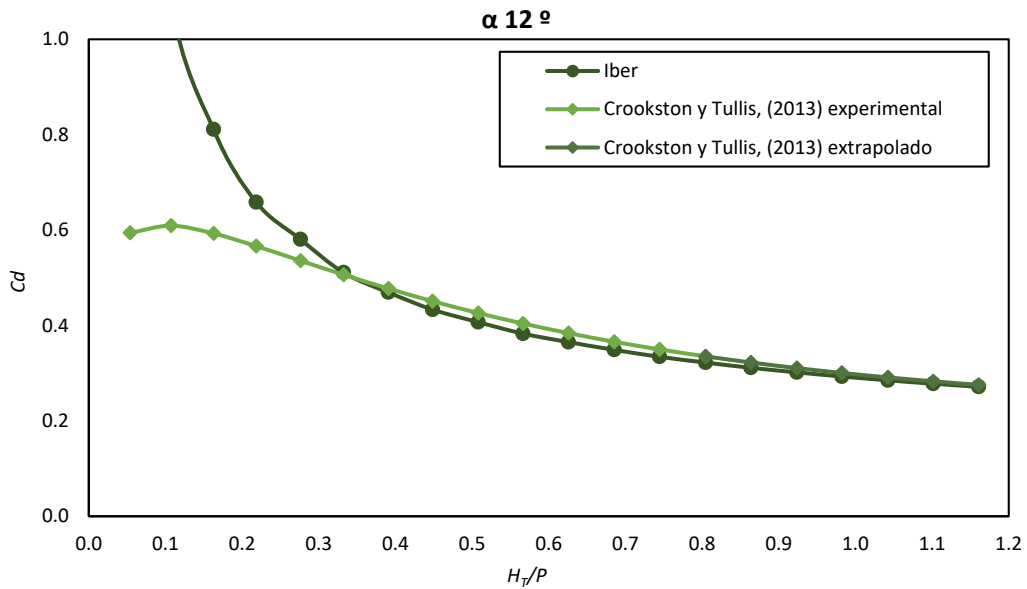


Figura 102. Comparación del coeficiente de descarga obtenido de las simulaciones en Iber con el calculado por Crookston y Tullis (2013) para aliviaderos en laberinto de 12° , “Quarter-Round”. Hipótesis 3 descarga libre.

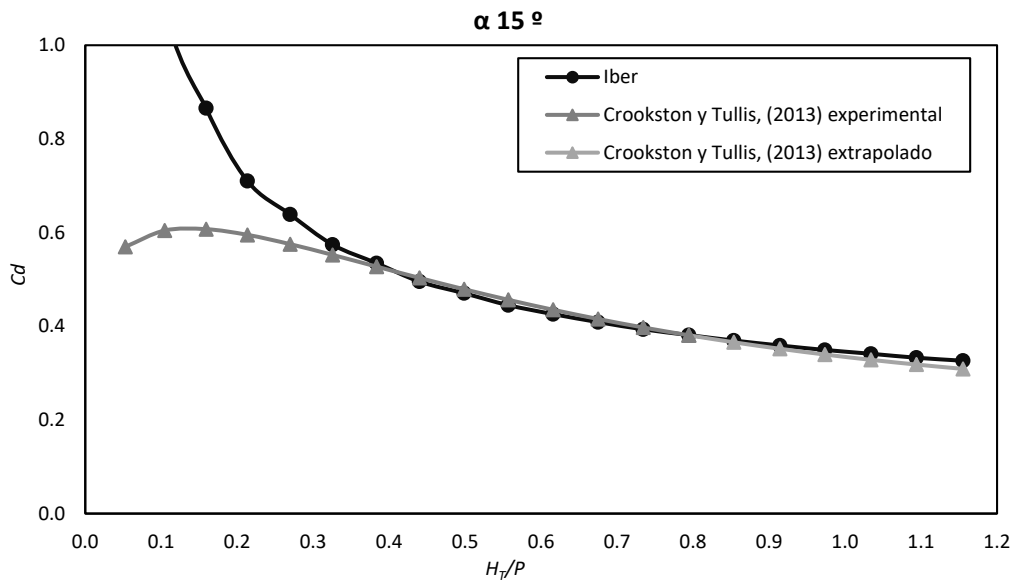


Figura 103. Comparación del coeficiente de descarga obtenido de las simulaciones en Iber con el calculado por Crookston y Tullis (2013) para aliviaderos en laberinto de 15° , “Quarter-Round”. Hipótesis 3 descarga libre.

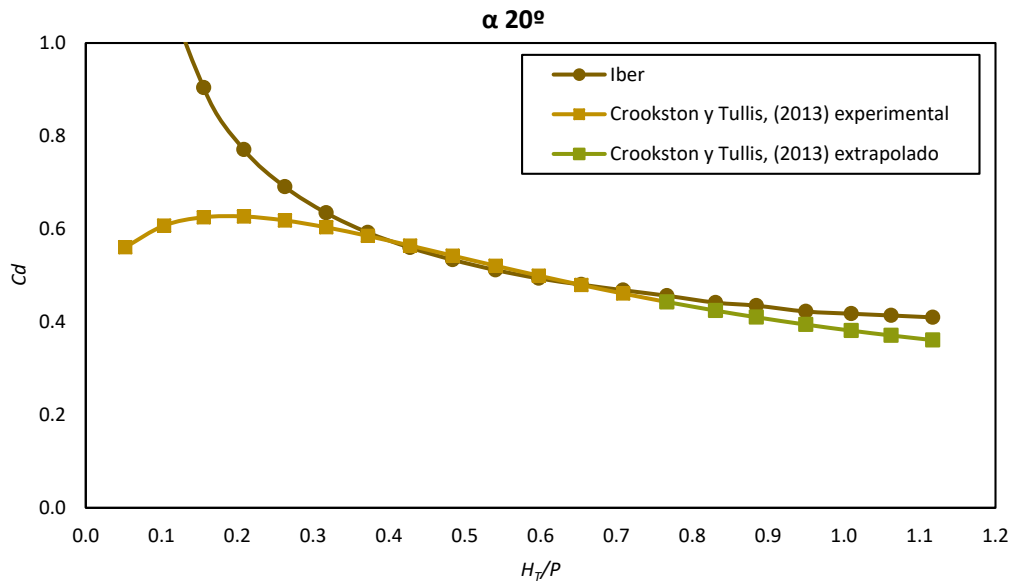


Figura 104. Comparación del coeficiente de descarga obtenido de las simulaciones en Iber con el calculado por Crookston y Tullis (2013) para aliviaderos en laberinto de 20° , “Quarter-Round”. Hipótesis 3 descarga libre.

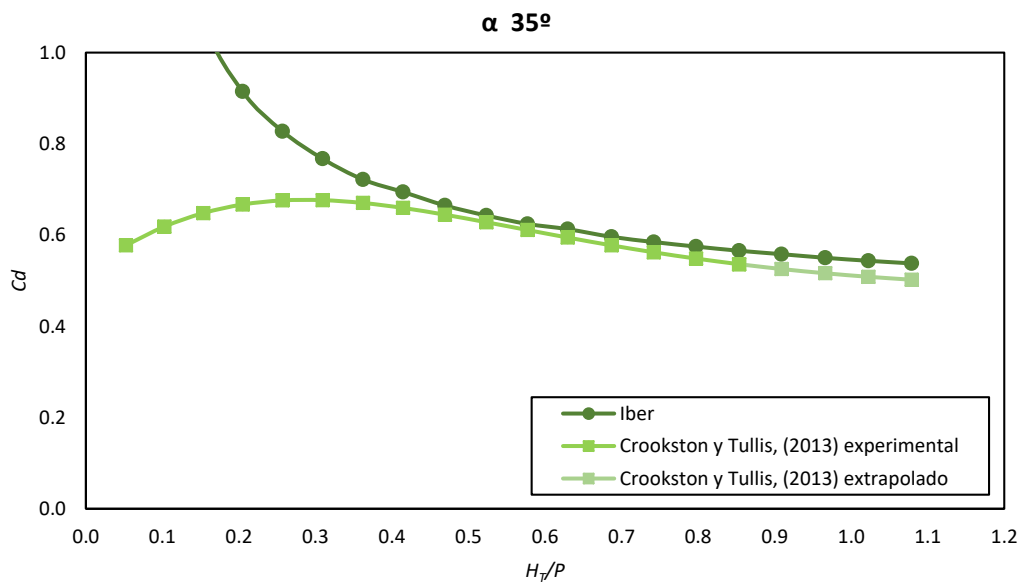


Figura 105. Comparación del coeficiente de descarga obtenido de las simulaciones en Iber con el calculado por Crookston y Tullis (2013) para aliviaderos en laberinto de 35° , “Quarter-Round”. Hipótesis 3 descarga libre.

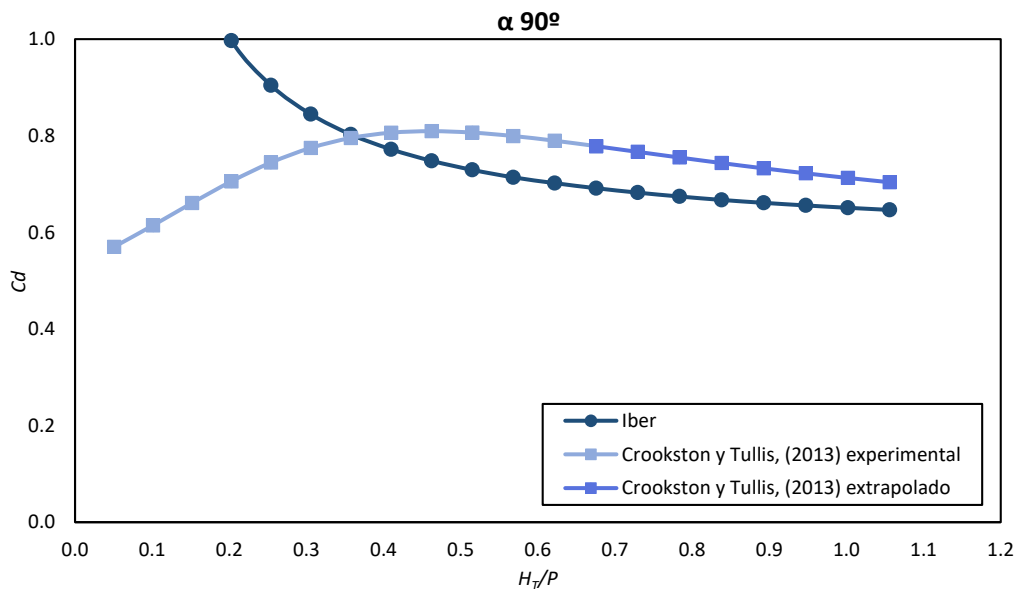


Figura 106. Comparación del coeficiente de descarga obtenido de las simulaciones en Iber con el calculado por Crookston y Tullis (2013) para aliviaderos en laberinto de 90°, “Quarter-Round”. Hipótesis 3 descarga libre.

Para perfiles “Quarter-Round”, al igual que en los perfiles “Half-Round” los resultados no son representativos para una baja relación H_T/P .

En aliviaderos con ángulos de 6° y 8° los resultados obtenidos son menores que los de Crookston y Tullis, (2013), con un error pequeño respecto a estos.

Para $\alpha = 10^\circ$ y 12° (Gráfica 101 y 102) el coeficiente de descarga se aproxima más al de referencia para valores de $H_T/P \geq 0.7$.

Para $\alpha = 15^\circ$ y 20° (Gráfica 103 y 104) los resultados son prácticamente iguales a los de Crookston y Tullis (2013) para valores de $0.4 < H_T/P < 0.8$. Sin embargo a mayor relación H_T/P mayor es el error cometido en el coeficiente de descarga.

Para $\alpha = 35^\circ$ (Gráfica 105) los resultados son mayores que los de Crookston y Tullis (2013), siendo más exactos para $0.5 < H_T/P < 0.75$.

En el aliviadero lineal, los resultados vuelven a ser menores que los de Crookston y Tullis (2013), y la diferencia entre ambos coeficientes de descarga es mayor.

4.1.1. Comparación de hipótesis para vertederos en descarga libre.

En las siguientes gráficas se representan los resultados de las tres hipótesis de cálculo para cada uno de los ángulos de inclinación de las paredes laterales del vertedero junto a los resultados de Crookston y Tullis (2013).

Al tener los tres casos sobre el mismo gráfico se observa como los resultados de la hipótesis 3 son los que más se aproximan a Crookston y Tullis (2013). Como ya se ha comentado en el apartado anterior, para valores de H_T/P pequeños no es posible el uso de la hipótesis 3, pero sí que se pueden obtener con cualquiera de las dos hipótesis restantes. Los resultados de los casos 1 y 2 son muy parecidos entre sí.

- Aliviadero en laberinto, perfil “Half-Round”:

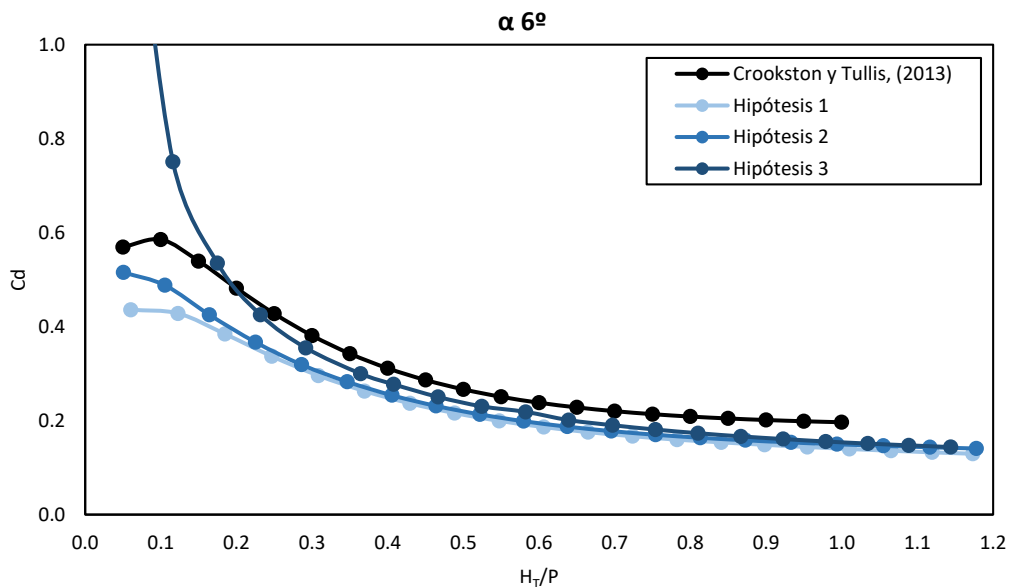


Figura 107. Comparación de los resultados obtenidos en las tres hipótesis de descarga libre para un aliviadero de 6° con perfil “Half-Round”.

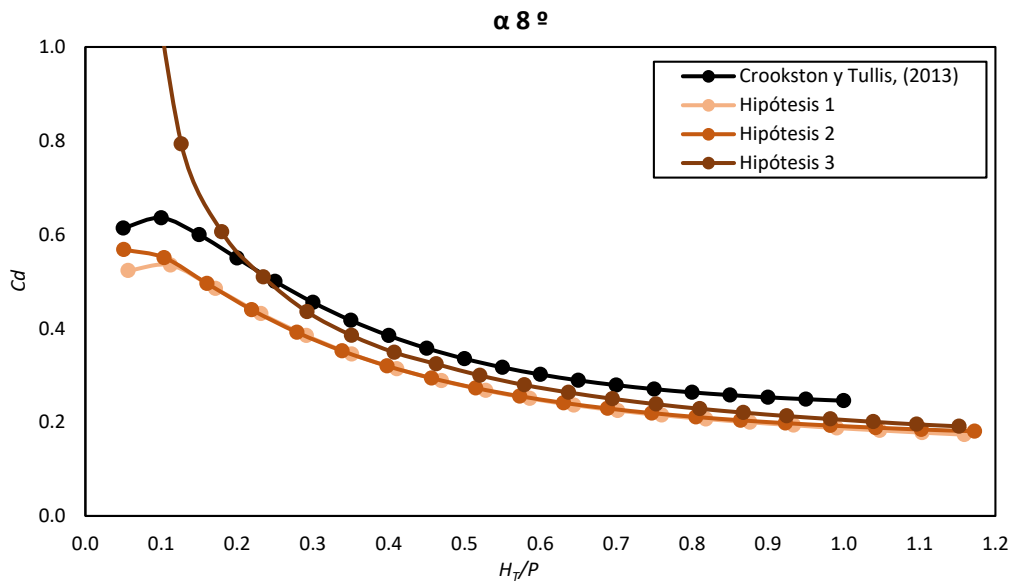


Figura 108. Comparación de los resultados obtenidos en las tres hipótesis de descarga libre para un aliviadero de 8° con perfil “Half-Round”.

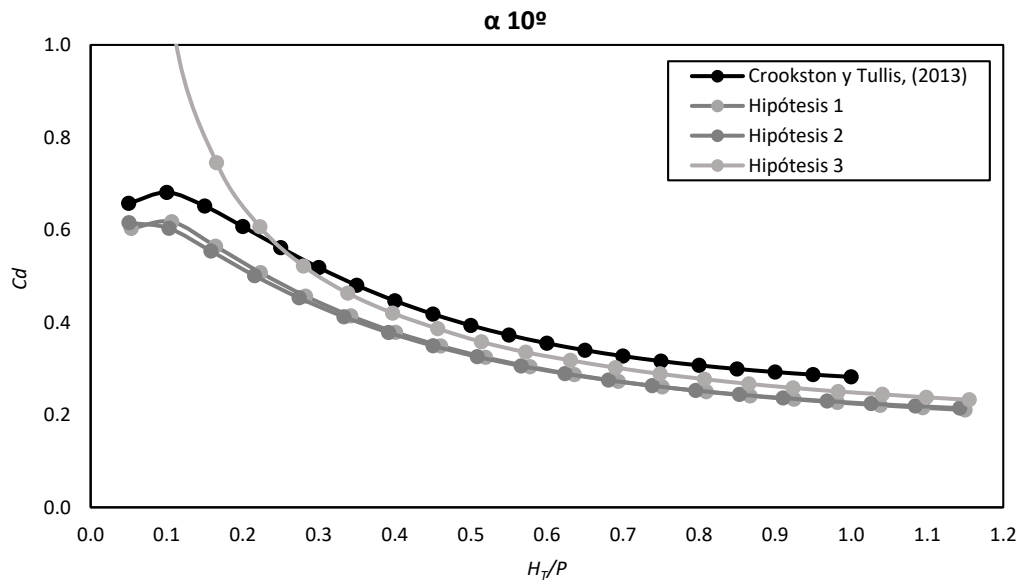


Figura 109. Comparación de los resultados obtenidos en las tres hipótesis de descarga libre para un aliviadero de 10° con perfil “Half-Round”.

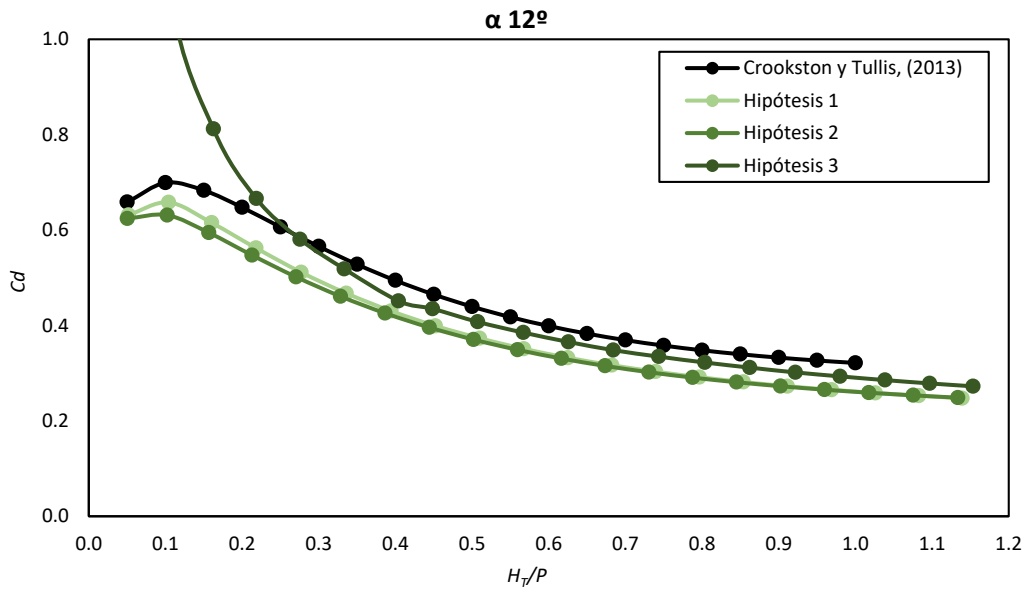


Figura 110. Comparación de los resultados obtenidos en las tres hipótesis de descarga libre para un aliviadero de 12° con perfil “Half-Round”.

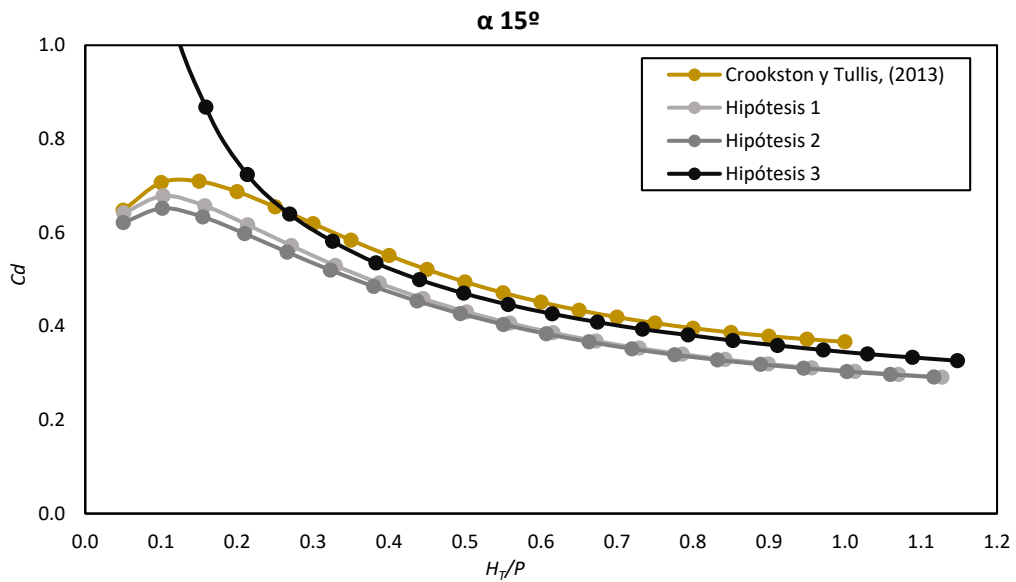


Figura 111. Comparación de los resultados obtenidos en las tres hipótesis de descarga libre para un aliviadero de 15° con perfil “Half-Round”.

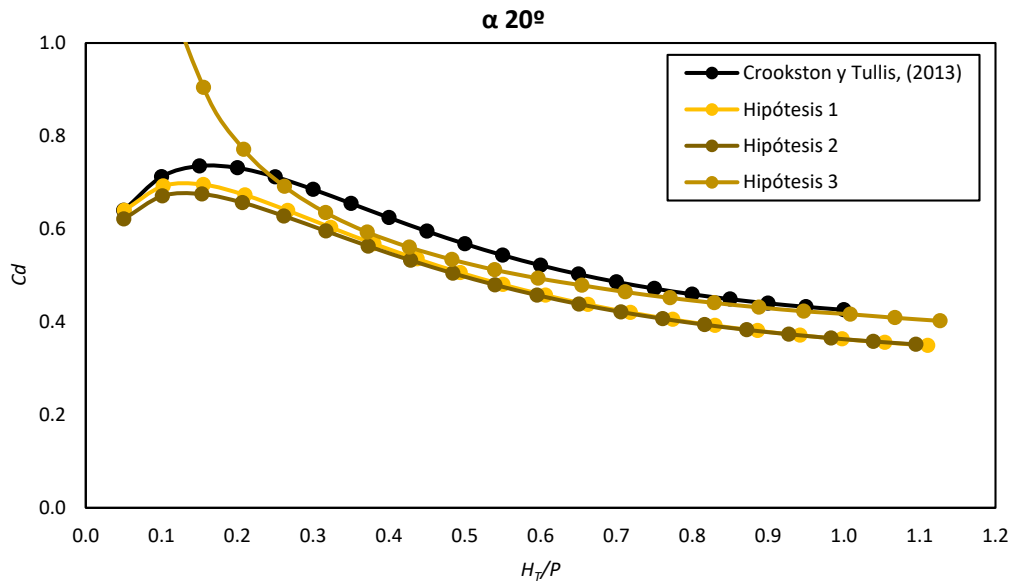


Figura 112. Comparación de los resultados obtenidos en las tres hipótesis de descarga libre para un aliviadero de 20° con perfil “Half-Round”.

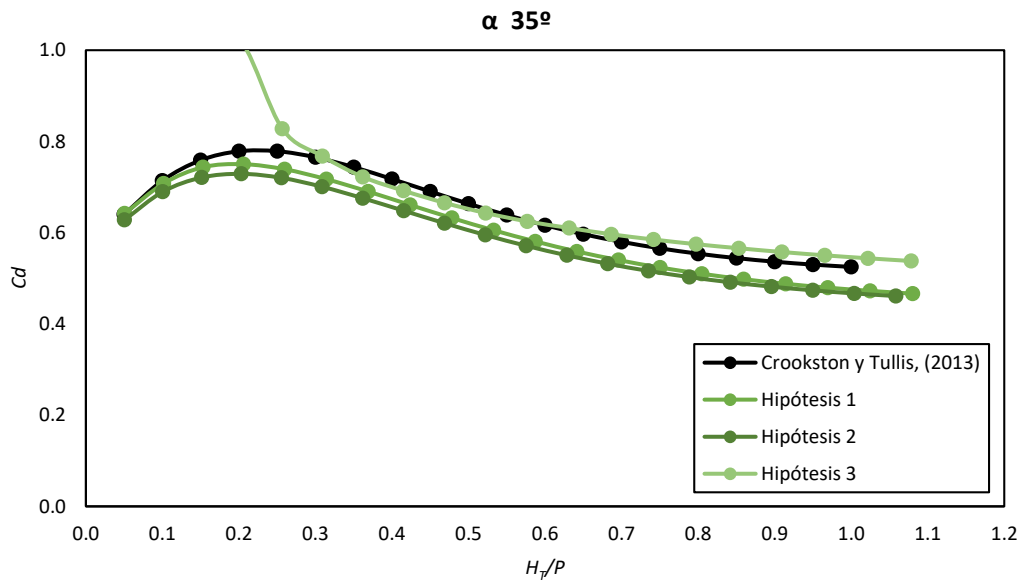


Figura 113. Comparación de los resultados obtenidos en las tres hipótesis de descarga libre para un aliviadero de 35° con perfil “Half-Round”.

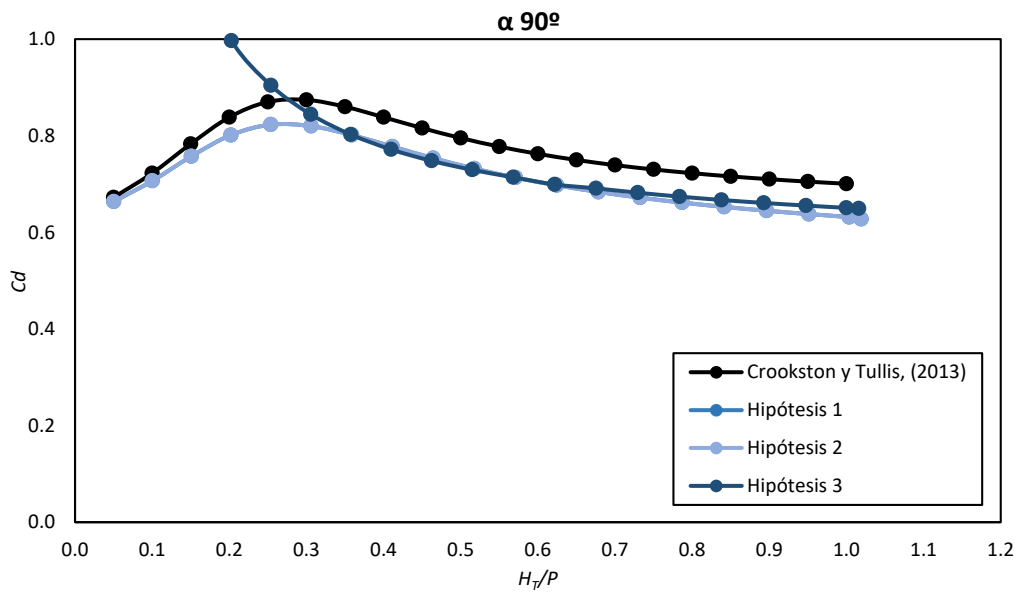


Figura 114. Comparación de los resultados obtenidos en las tres hipótesis de descarga libre para un aliviadero de 90° con perfil “Half-Round”.

- Aliviadero en laberinto, perfil “Quarter-Round”:

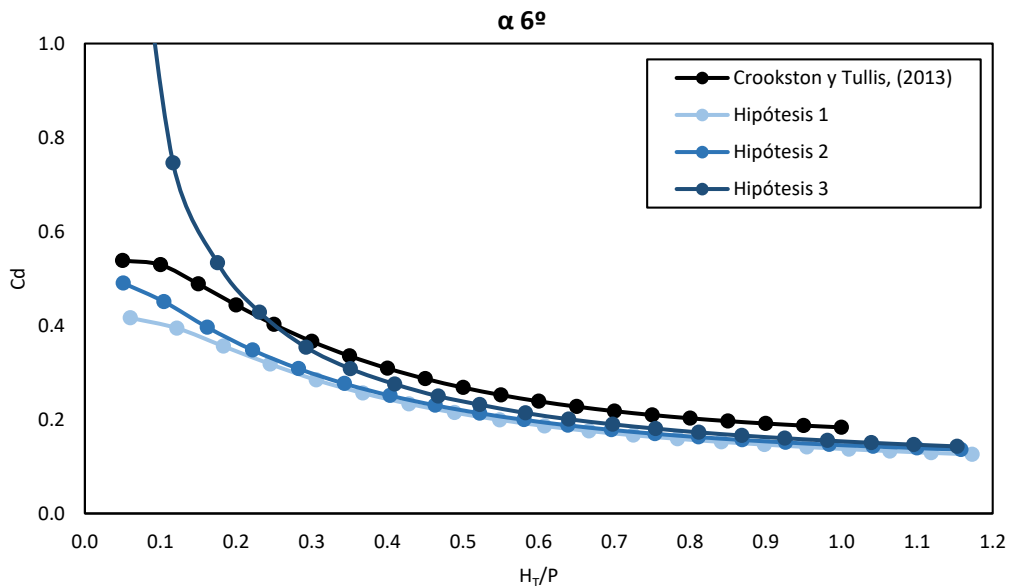


Figura 115. Comparación de los resultados obtenidos en las tres hipótesis de descarga libre para un aliviadero de 6° con perfil “Quarter-Round”.

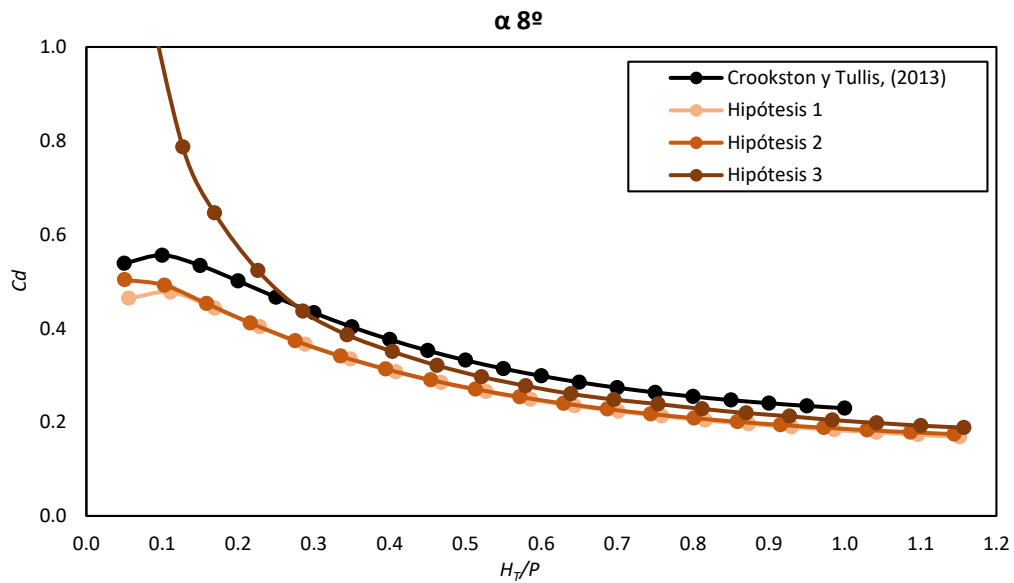


Figura 116. Comparación de los resultados obtenidos en las tres hipótesis de descarga libre para un aliviadero de 8° con perfil “Quarter-Round”.

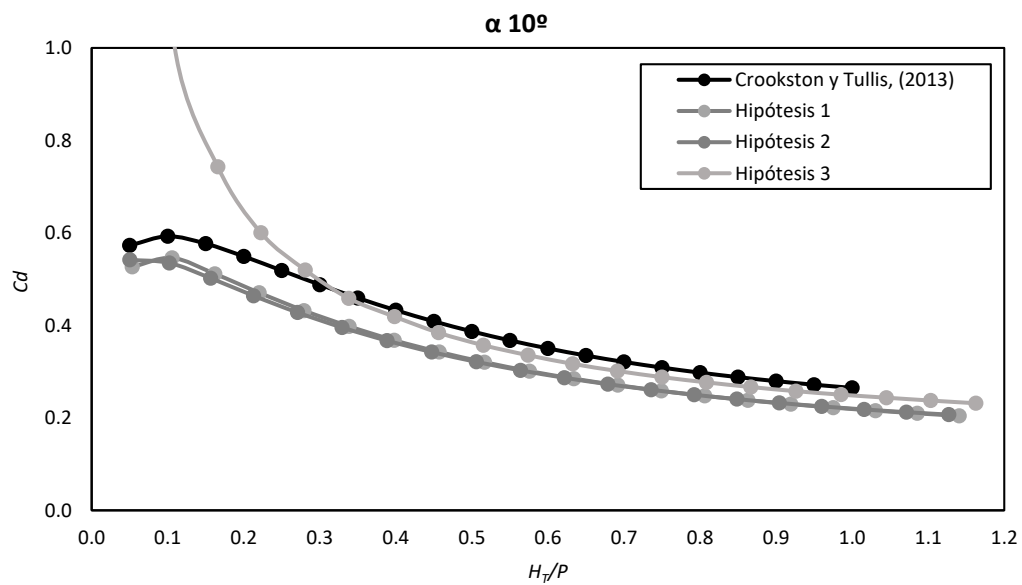


Figura 117. Comparación de los resultados obtenidos en las tres hipótesis de descarga libre para un aliviadero de 10° con perfil “Quarter-Round”.

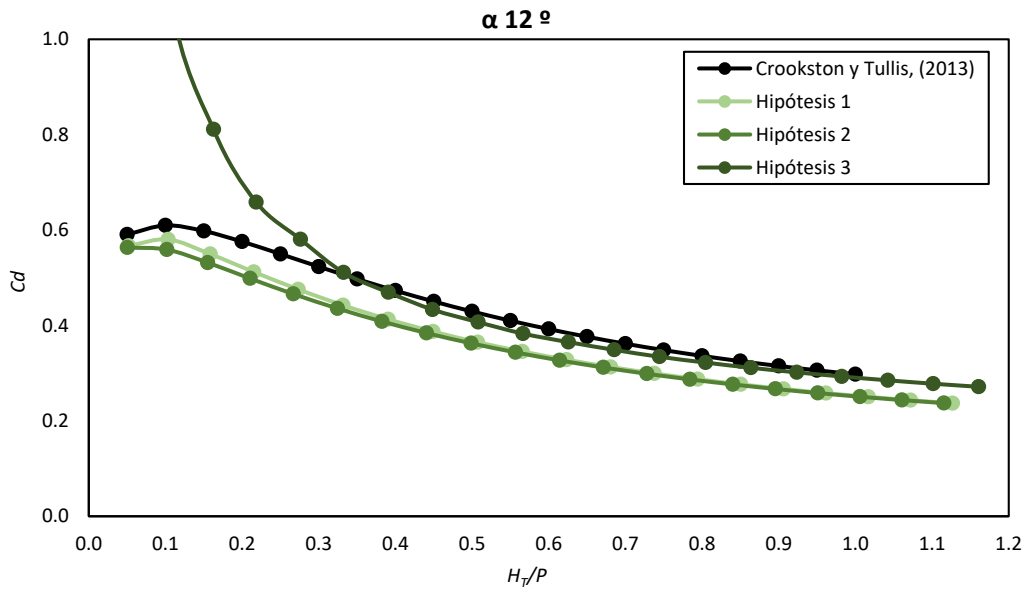


Figura 118. Comparación de los resultados obtenidos en las tres hipótesis de descarga libre para un aliviadero de 12° con perfil “Quarter-Round”.

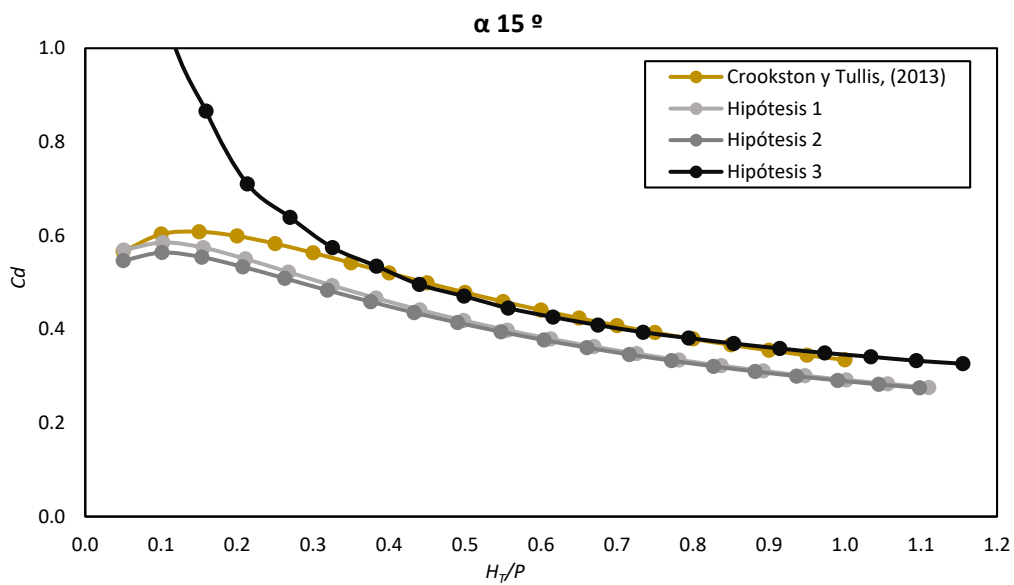


Figura 119. Comparación de los resultados obtenidos en las tres hipótesis de descarga libre para un aliviadero de 15° con perfil “Quarter-Round”.

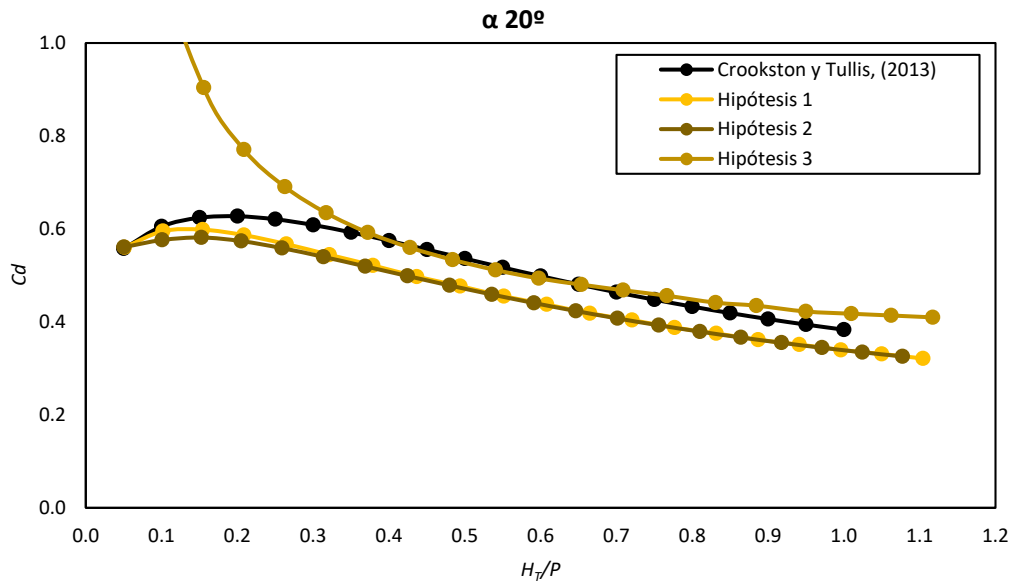


Figura 120. Comparación de los resultados obtenidos en las tres hipótesis de descarga libre para un aliviadero de 20° con perfil “Quarter-Round”.

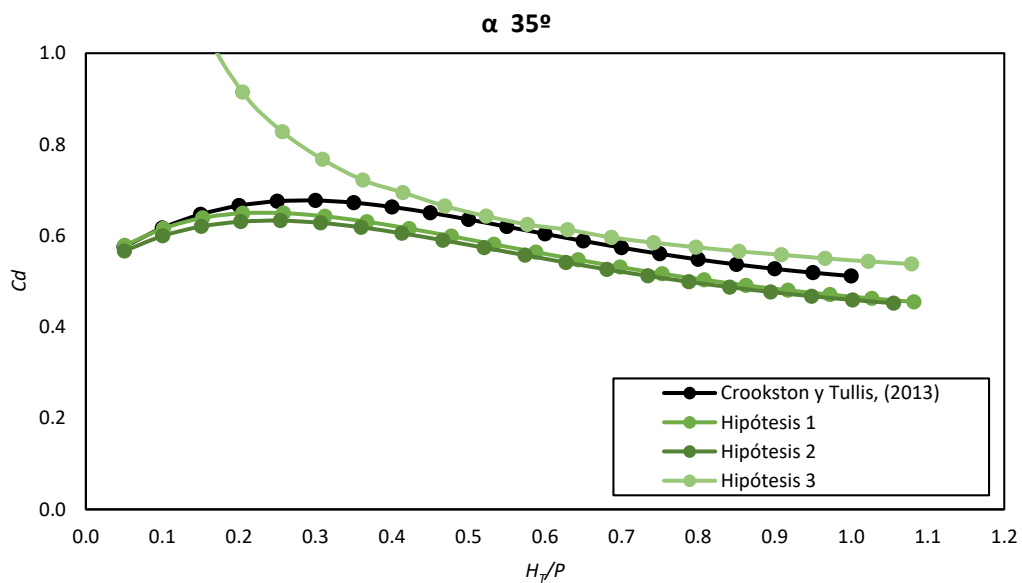


Figura 121. Comparación de los resultados obtenidos en las tres hipótesis de descarga libre para un aliviadero de 35° con perfil “Quarter-Round”.

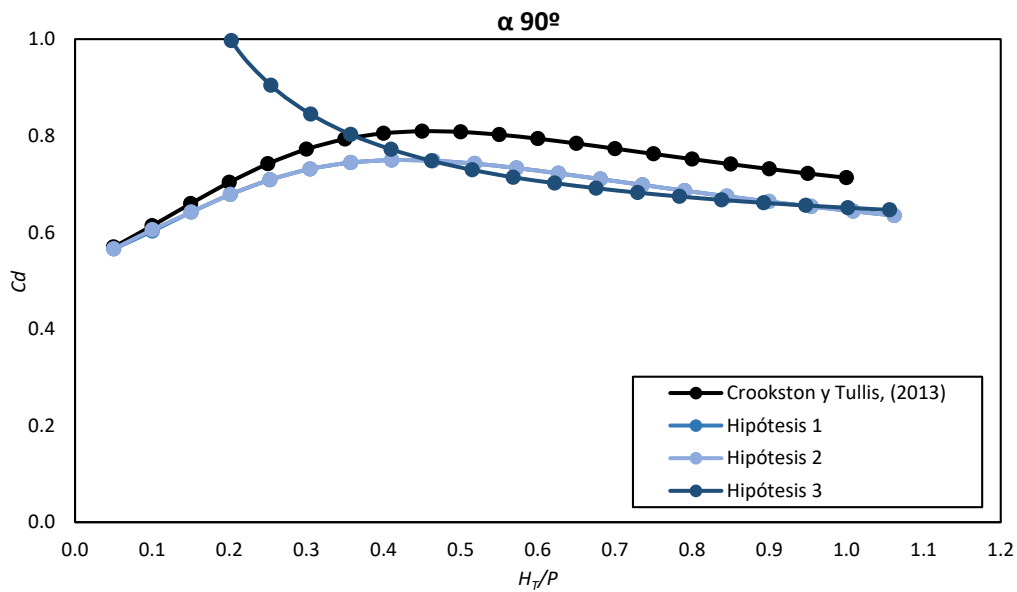


Figura 122. Comparación de los resultados obtenidos en las tres hipótesis de descarga libre para un aliviadero de 90° con perfil "Quarter-Round".

4.1.2. Errores relativos y absolutos en descarga libre.

Para poder conocer y comparar con facilidad el error cometido en cada hipótesis respecto a los resultados de Crookston y Tullis (2013) se representa gráficamente el error relativo y absoluto de los coeficientes de descarga. Las gráficas se agrupan por ángulo de inclinación de las paredes del vertedero y tipo de perfil.

Nuevamente se observa que en la hipótesis 3 se obtienen resultados más próximos a Crookston y Tullis (2013), para $H_T/P > 0.2-0.3$. Las otras dos hipótesis tienen resultados muy parecidos entre sí. El error relativo está en torno al 10-20% en todos los ángulos medidos para una relación H_T/P con valores intermedios (0.3-1.0). Cuanto mayor es el ángulo, menor es el error cometido.

- Aliviadero en laberinto, perfil “Half-Round”:

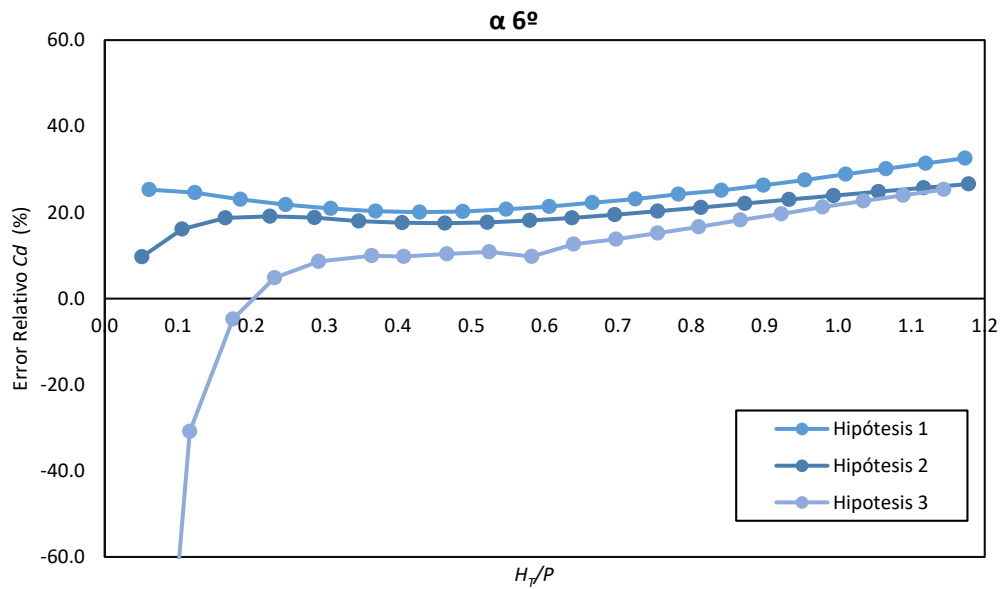


Figura 123. Errores relativos para las 3 hipótesis propuestas en descarga libre y $\alpha = 6^\circ$.

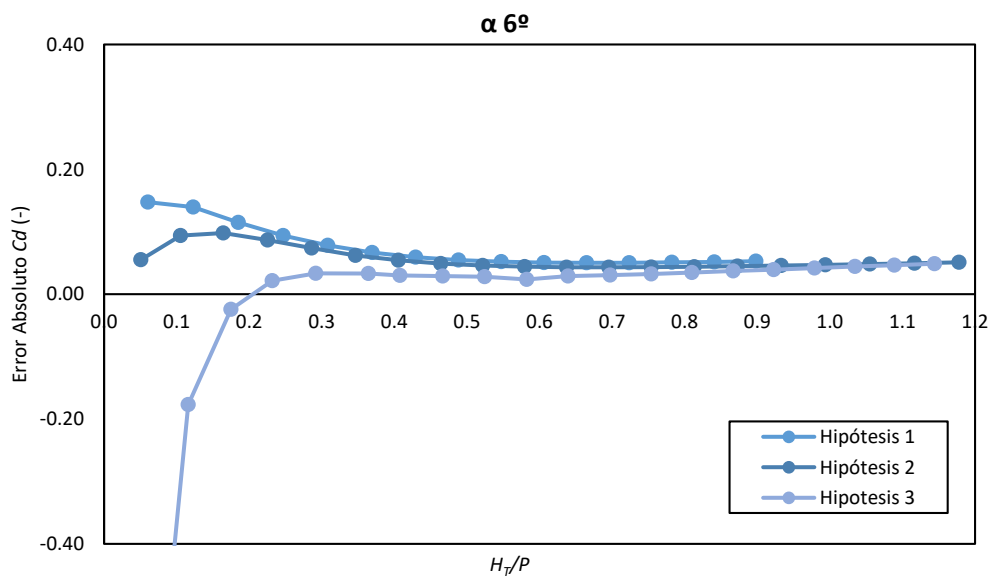


Figura 124. Errores absolutos para las 3 hipótesis propuestas en descarga libre y $\alpha = 6^\circ$.

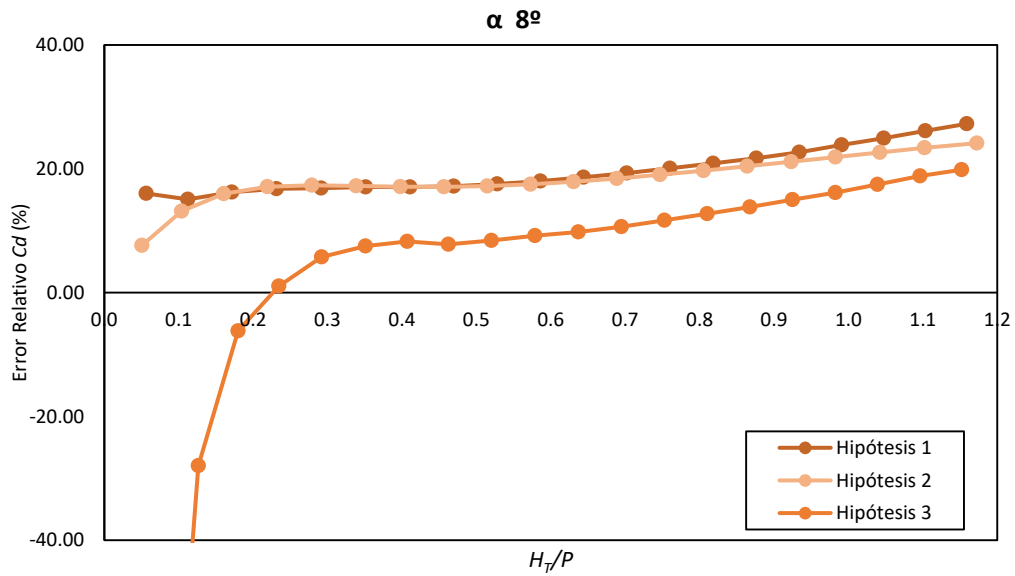


Figura 125. Errores relativos para las 3 hipótesis propuestas en descarga libre y $\alpha = 8^\circ$.

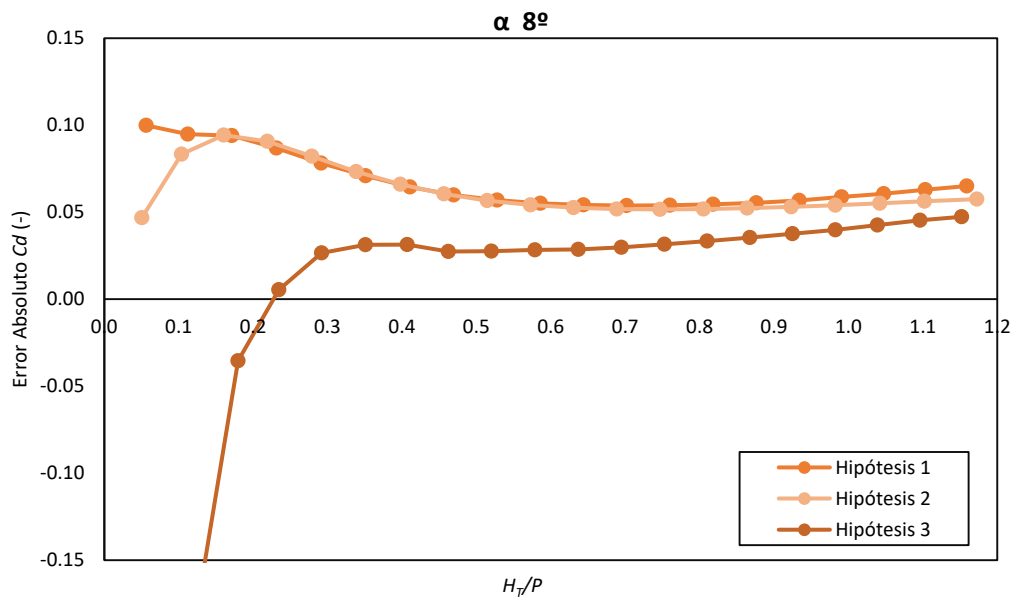


Figura 126. Errores absolutos para las 3 hipótesis propuestas en descarga libre y $\alpha = 8^\circ$.

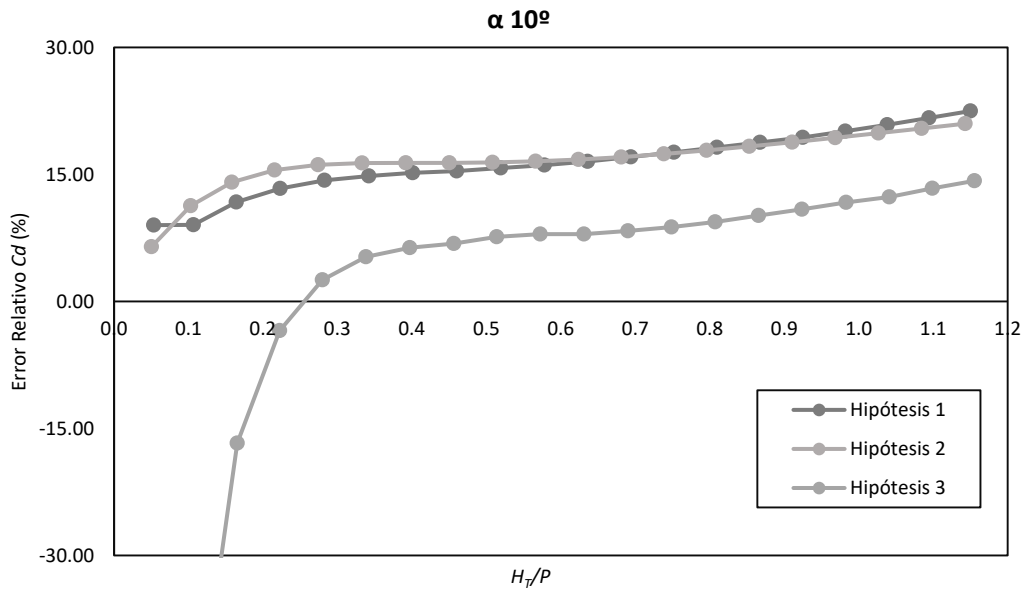


Figura 127. Errores relativos para las 3 hipótesis propuestas en descarga libre y $\alpha=10^\circ$.

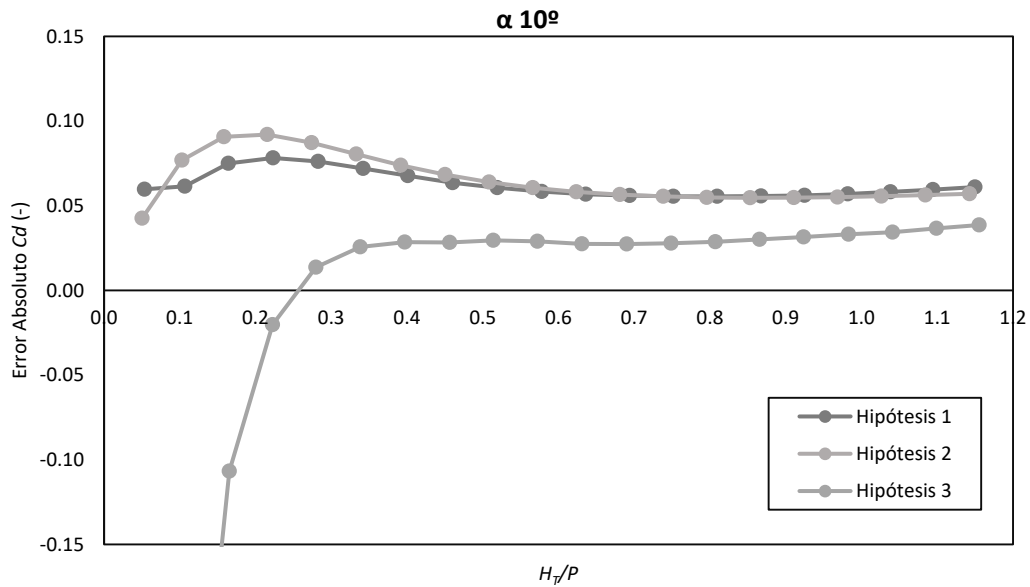


Figura 128. Errores absolutos para las 3 hipótesis propuestas en descarga libre y $\alpha=10^\circ$.

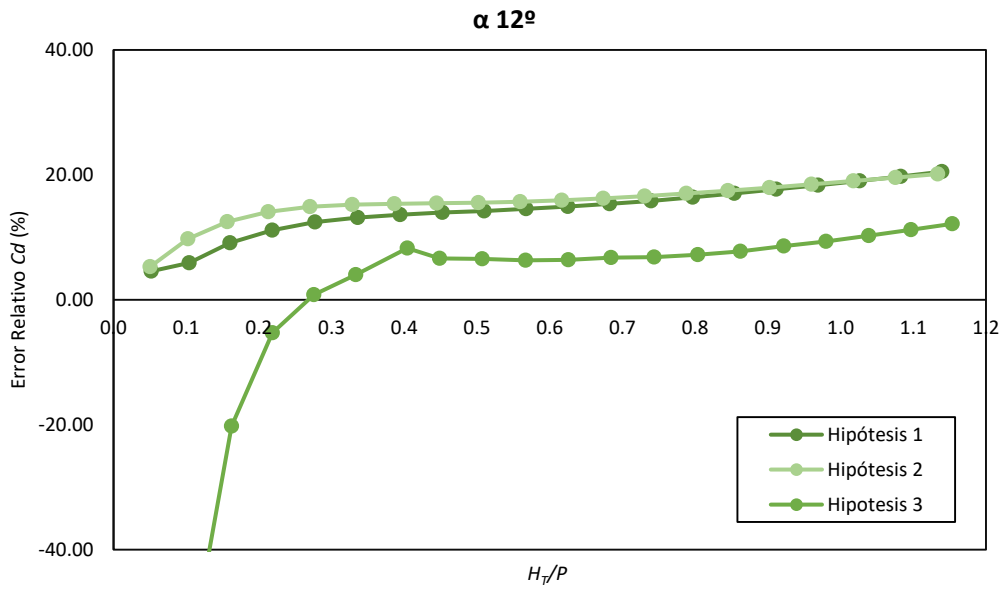


Figura 129. Errores relativos para las 3 hipótesis propuestas en descarga libre y $\alpha=12^\circ$.

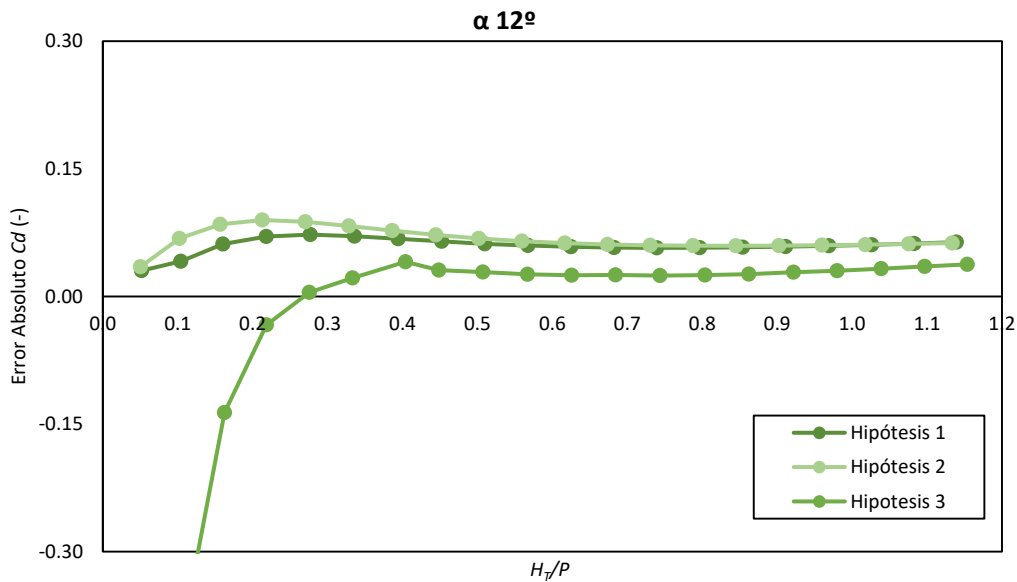


Figura 130. Errores absolutos para las 3 hipótesis propuestas en descarga libre y $\alpha=12^\circ$.

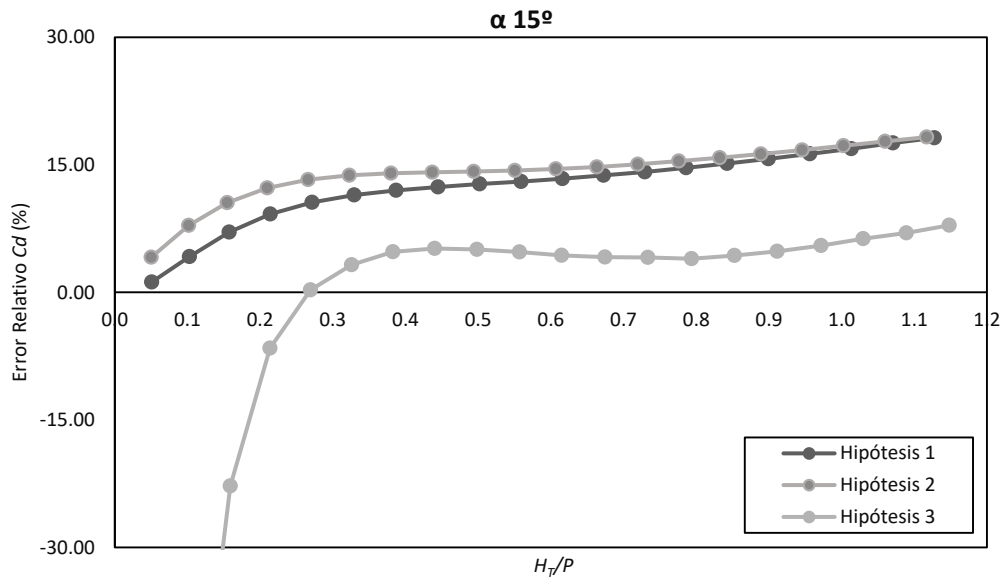


Figura 131. Errores relativos para las 3 hipótesis propuestas en descarga libre y $\alpha=15^\circ$.

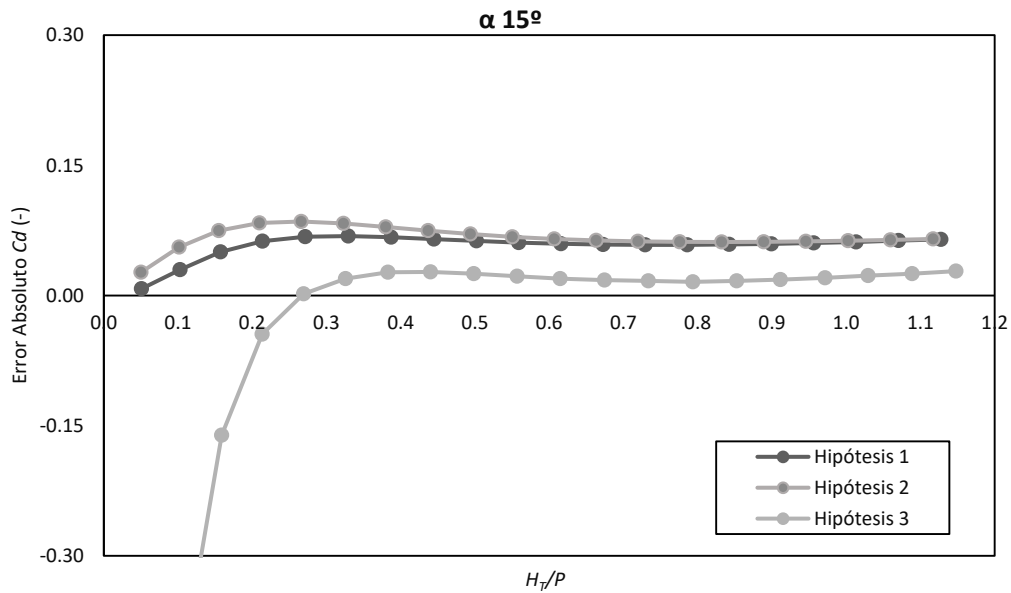


Figura 132. Errores absolutos para las 3 hipótesis propuestas en descarga libre y $\alpha=15^\circ$.

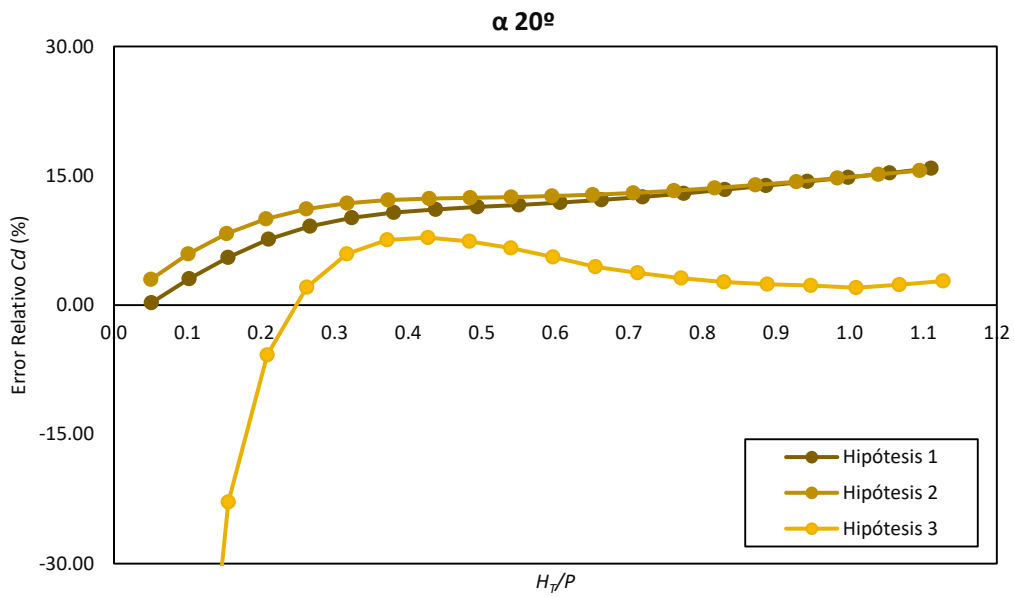


Figura 133. Errores relativos para las 3 hipótesis propuestas en descarga libre y $\alpha = 20^\circ$.

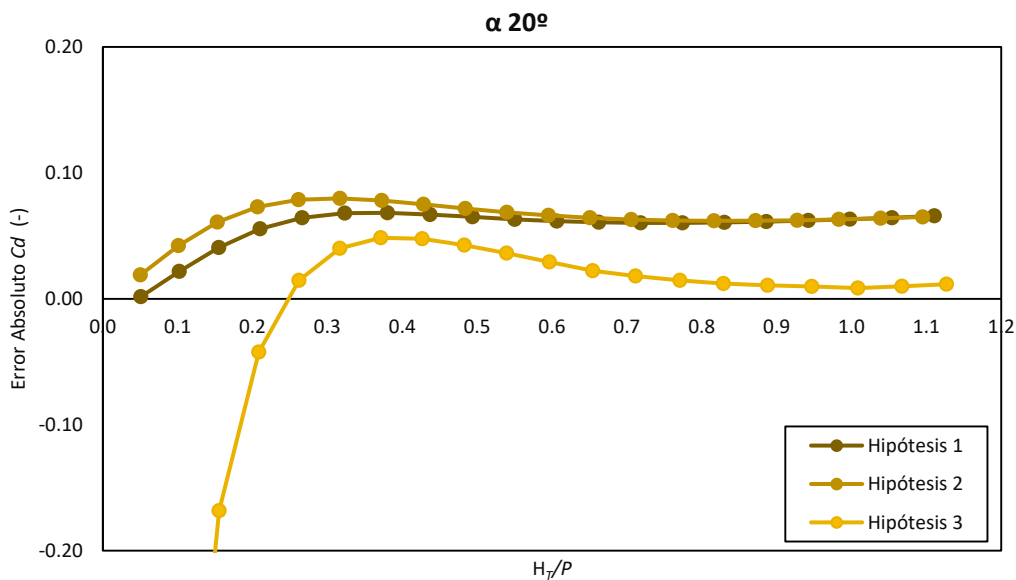


Figura 134. Errores absolutos para las 3 hipótesis propuestas en descarga libre y $\alpha = 20^\circ$.

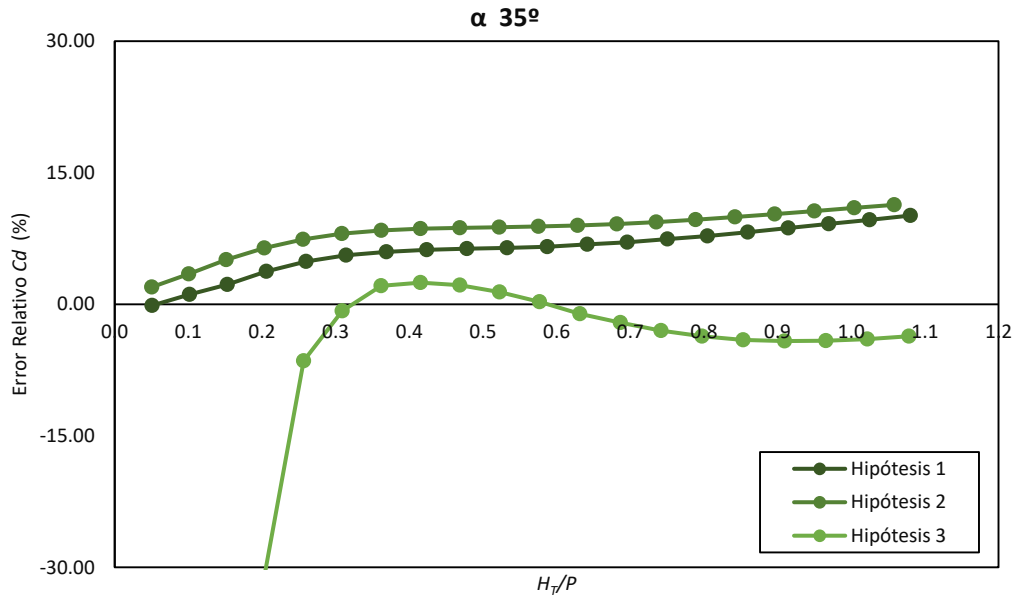


Figura 135. Errores relativos para las 3 hipótesis propuestas en descarga libre y $\alpha=35^\circ$.

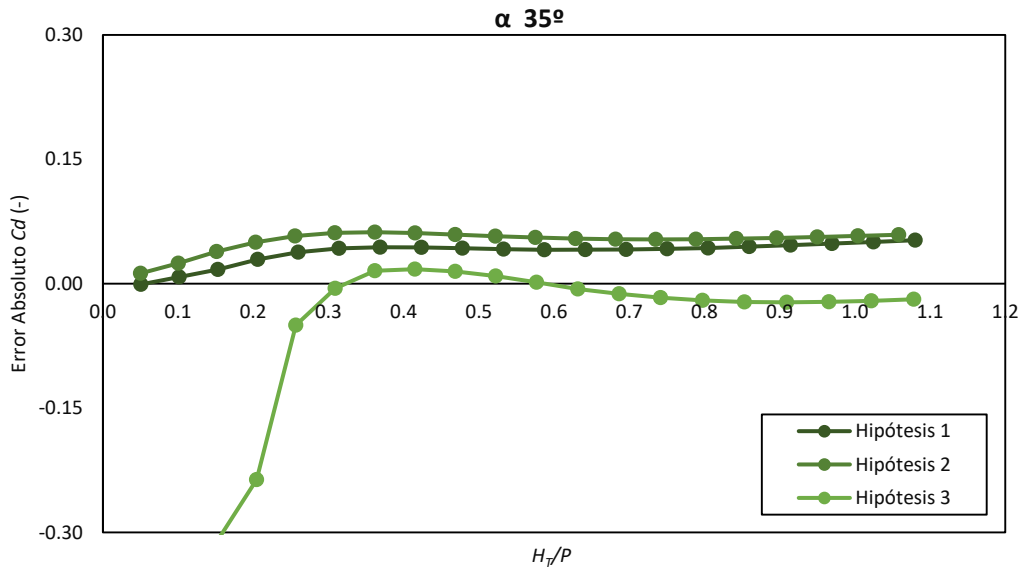


Figura 136. Errores absolutos para las 3 hipótesis propuestas en descarga libre y $\alpha=35^\circ$.

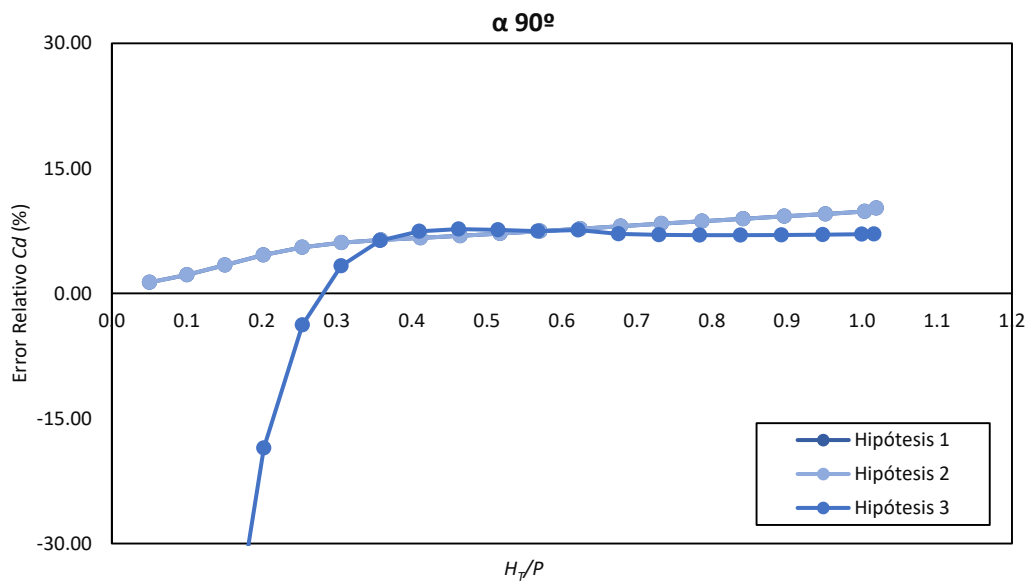


Figura 137. Errores relativos para las 3 hipótesis propuestas en descarga libre y $\alpha=90^\circ$.

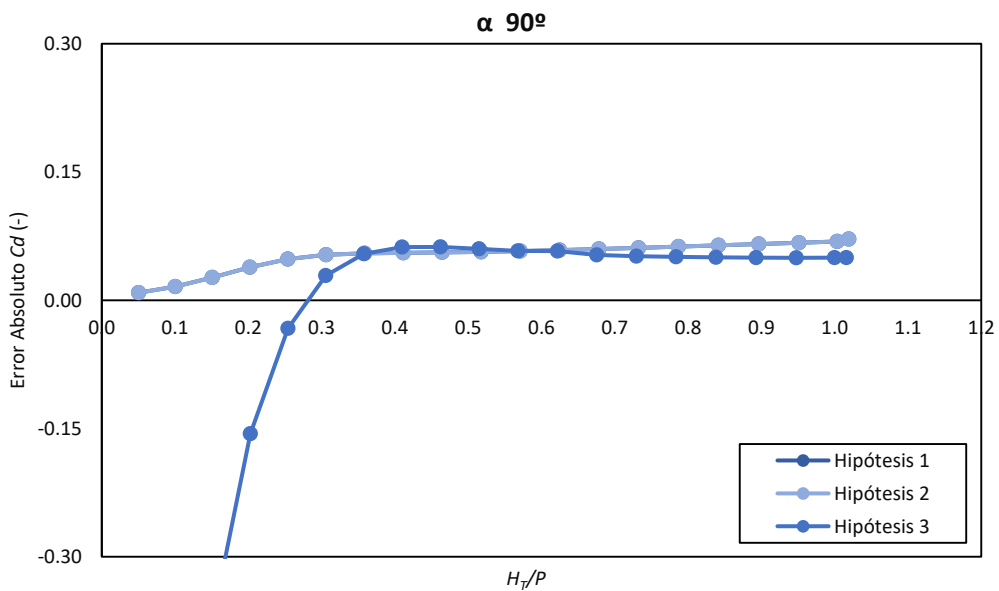


Figura 138. Errores absolutos para las 3 hipótesis propuestas en descarga libre y $\alpha=90^\circ$.

- Aliviadero en laberinto, perfil “Quarter-Round”:

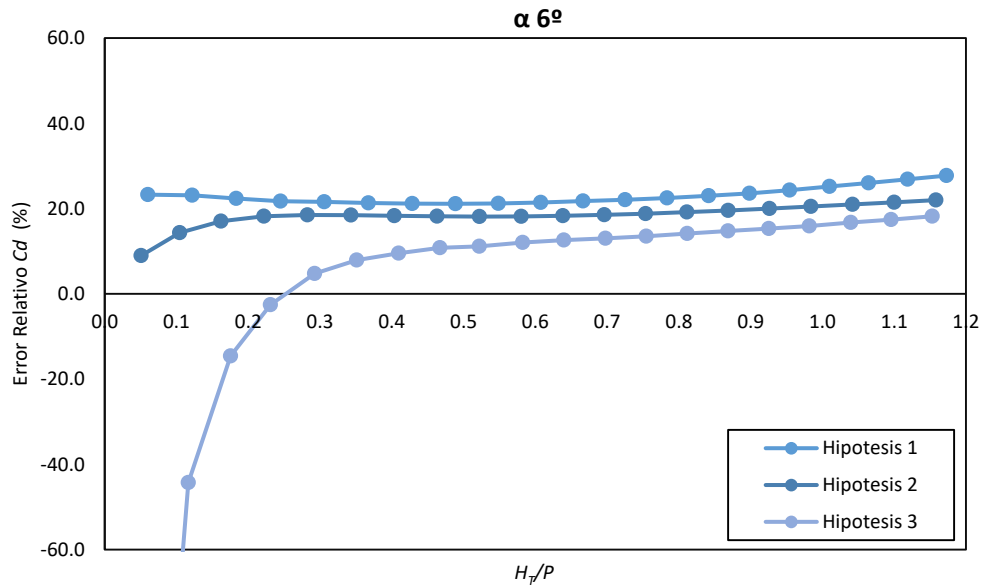


Figura 139. Errores relativos para las 3 hipótesis propuestas en descarga libre y $\alpha = 6^\circ$.

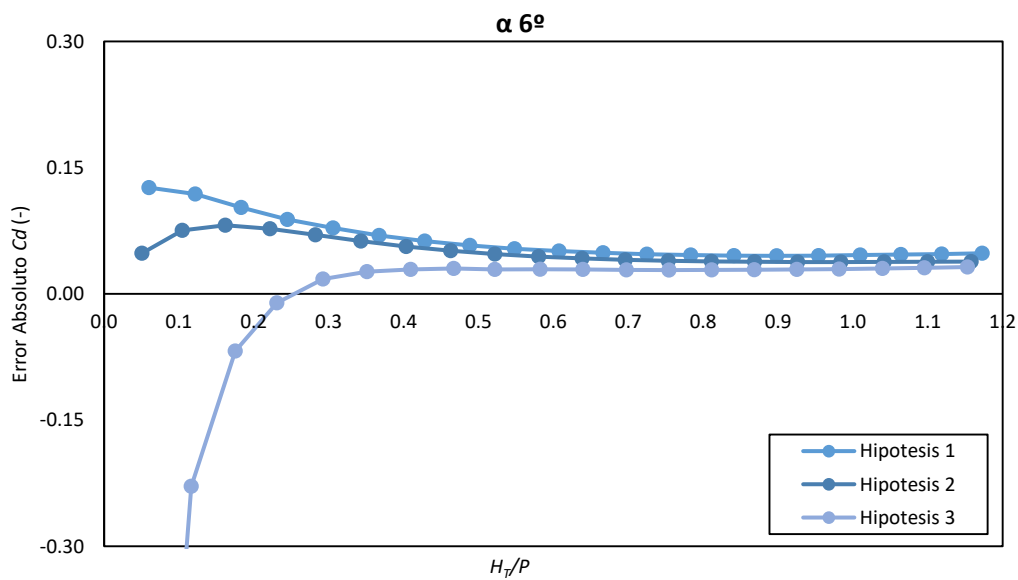


Figura 140. Errores absolutos para las 3 hipótesis propuestas en descarga libre y $\alpha = 6^\circ$.

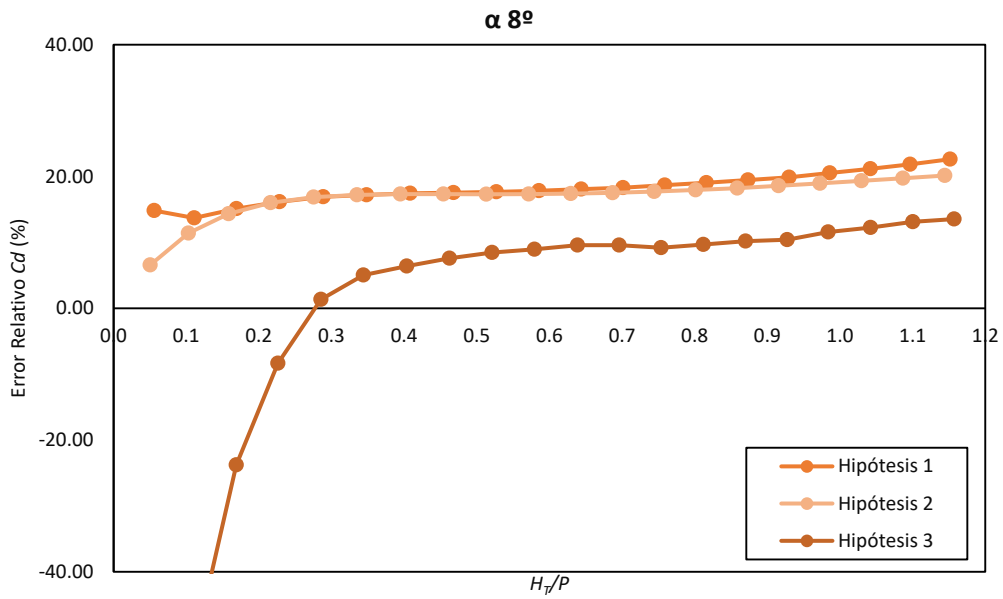


Figura 141. Errores relativos para las 3 hipótesis propuestas en descarga libre y $\alpha=8^\circ$.

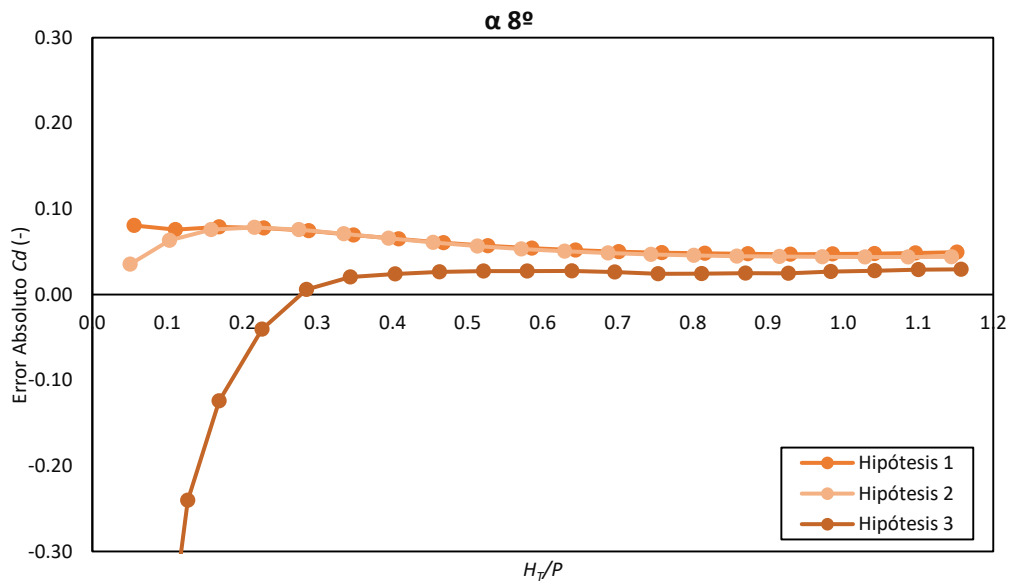


Figura 142. Errores absolutos para las 3 hipótesis propuestas en descarga libre y $\alpha=8^\circ$.

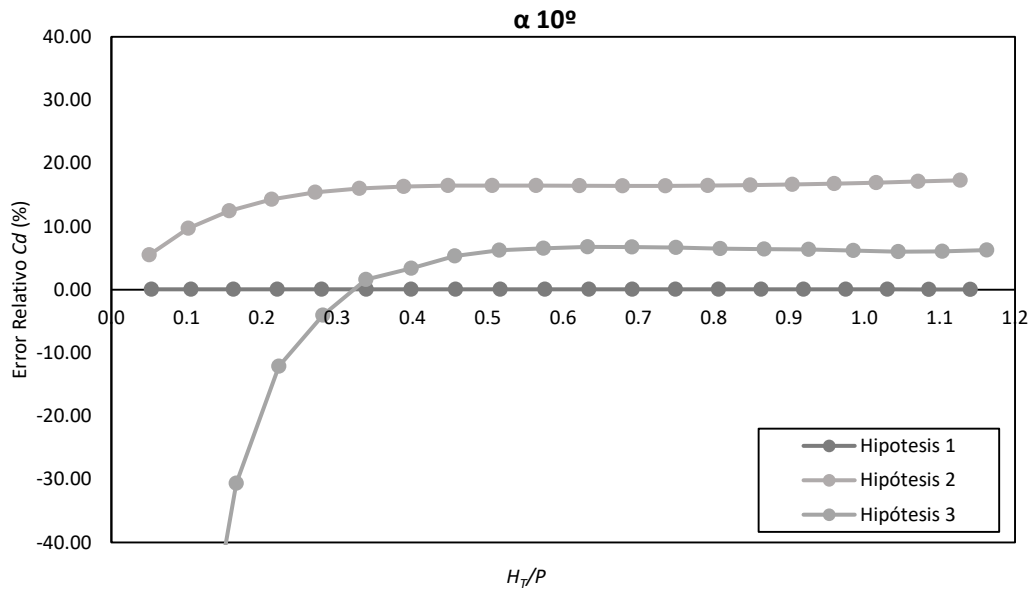


Figura 143. Errores relativos para las 3 hipótesis propuestas en descarga libre y $\alpha=10^\circ$.

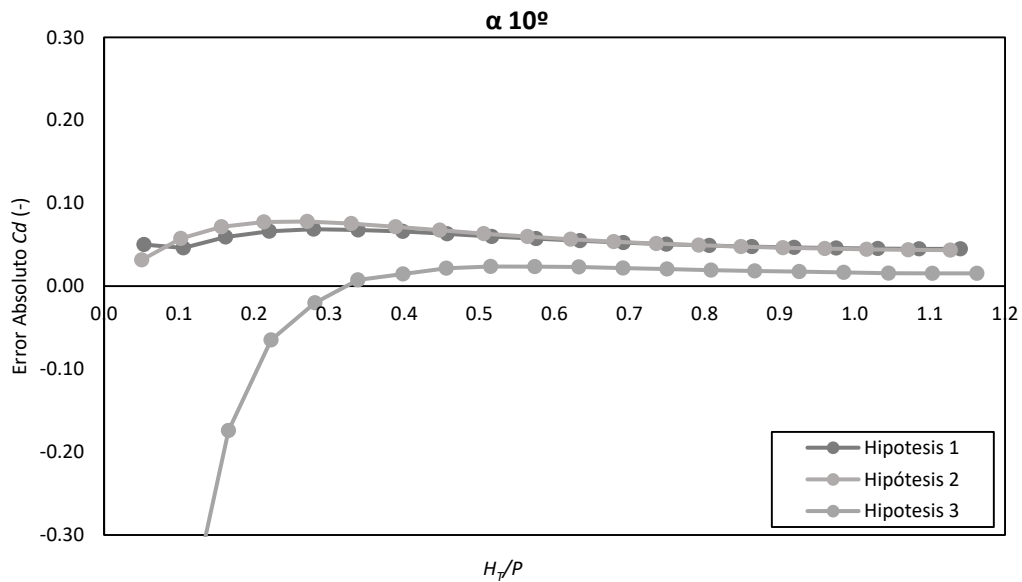


Figura 144. Errores absolutos para las 3 hipótesis propuestas en descarga libre y $\alpha=10^\circ$.

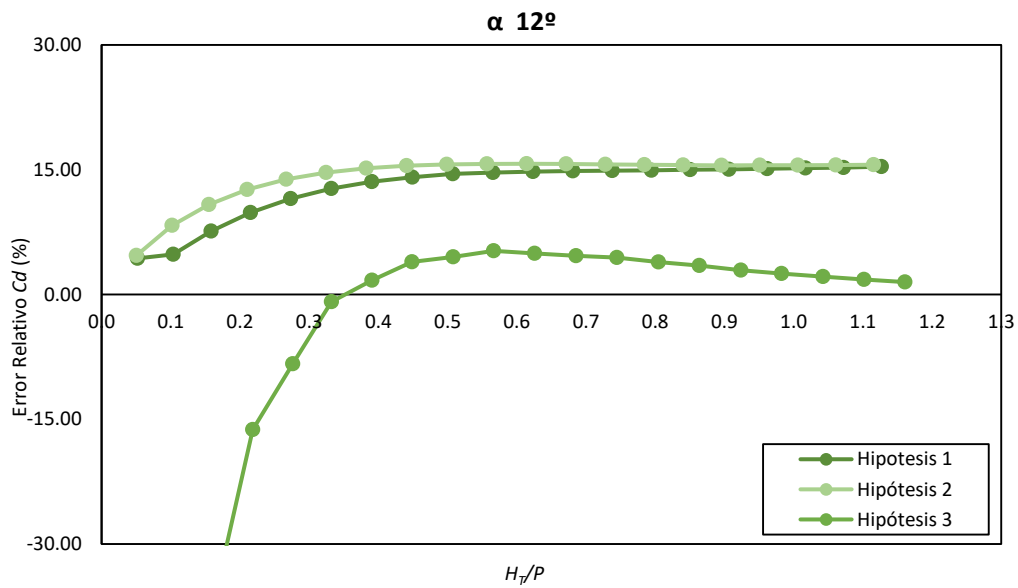


Figura 145. Errores Relativos para las 3 hipótesis propuestas en descarga libre y $\alpha=12^\circ$.

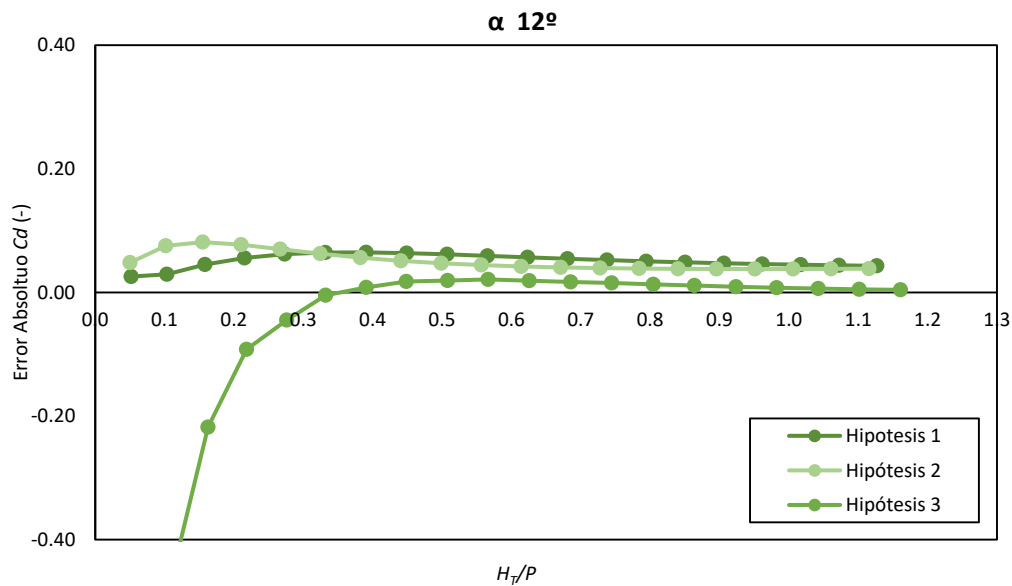


Figura 146. Errores absolutos para las 3 hipótesis propuestas en descarga libre y $\alpha=12^\circ$.

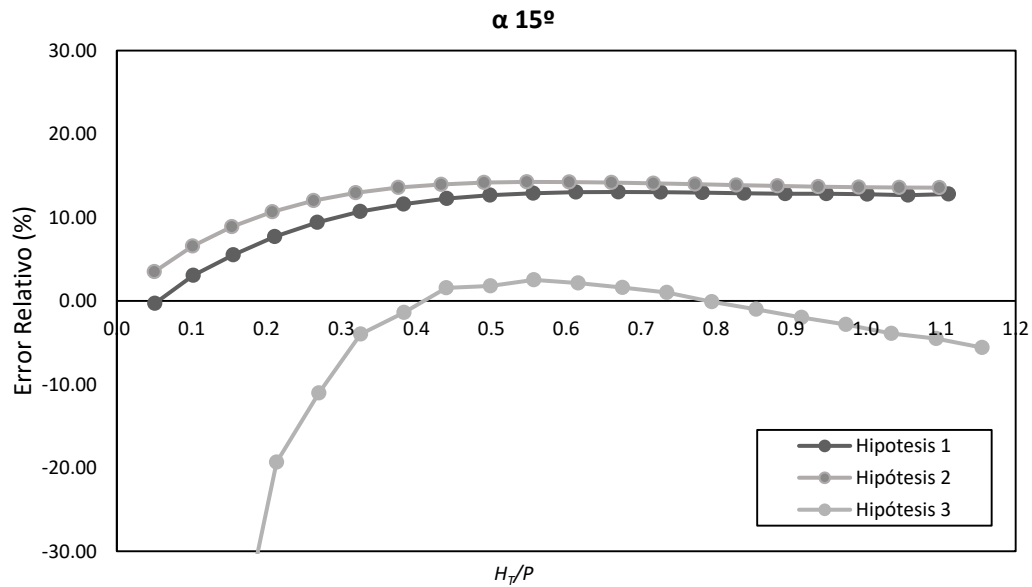


Figura 147. Errores relativos para las 3 hipótesis propuestas en descarga libre y $\alpha=15^\circ$.

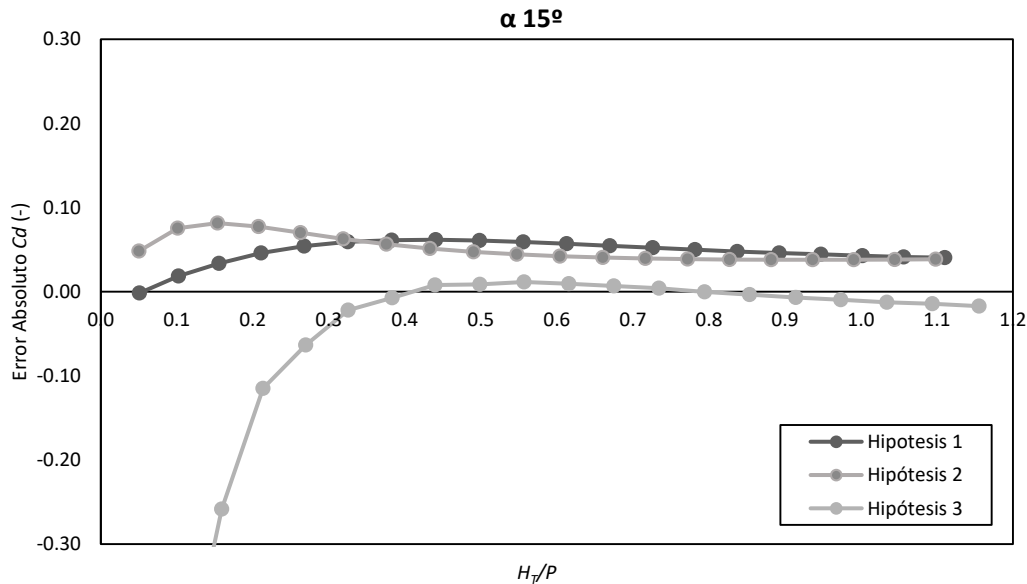


Figura 148. Error absoluto para las 3 hipótesis propuestas en descarga libre y $\alpha=15^\circ$.

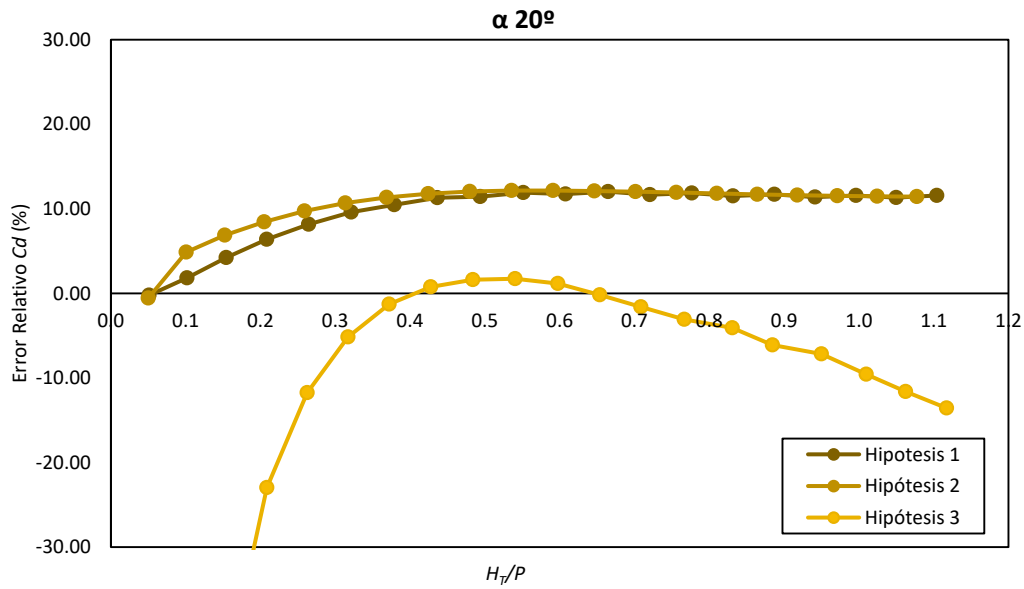


Figura 149. Errores relativos para las 3 hipótesis propuestas en descarga libre y $\alpha=20^\circ$.

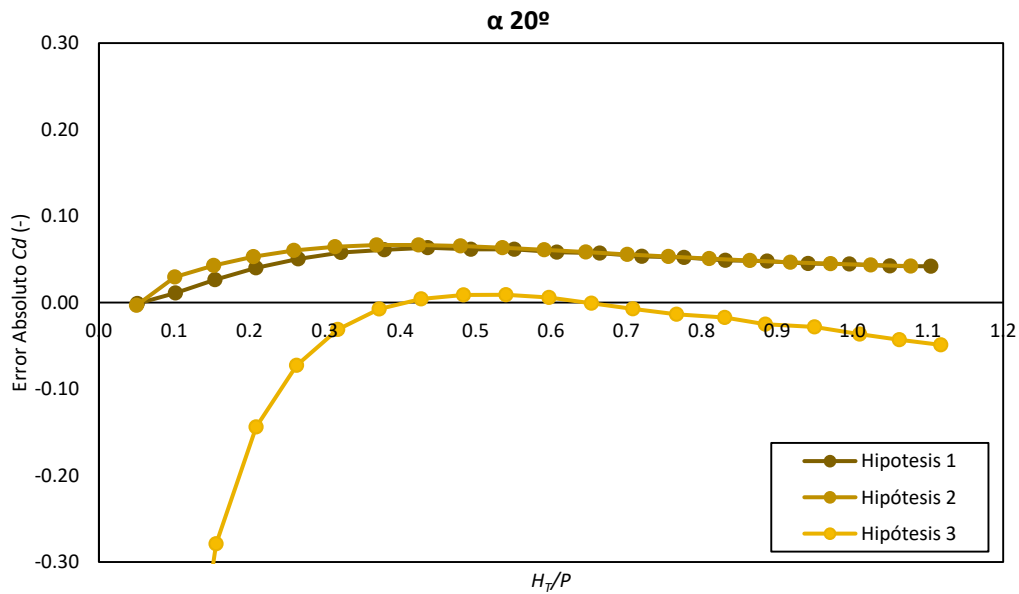


Figura 150. Errores absolutos para las 3 hipótesis propuestas en descarga libre y $\alpha=20^\circ$.

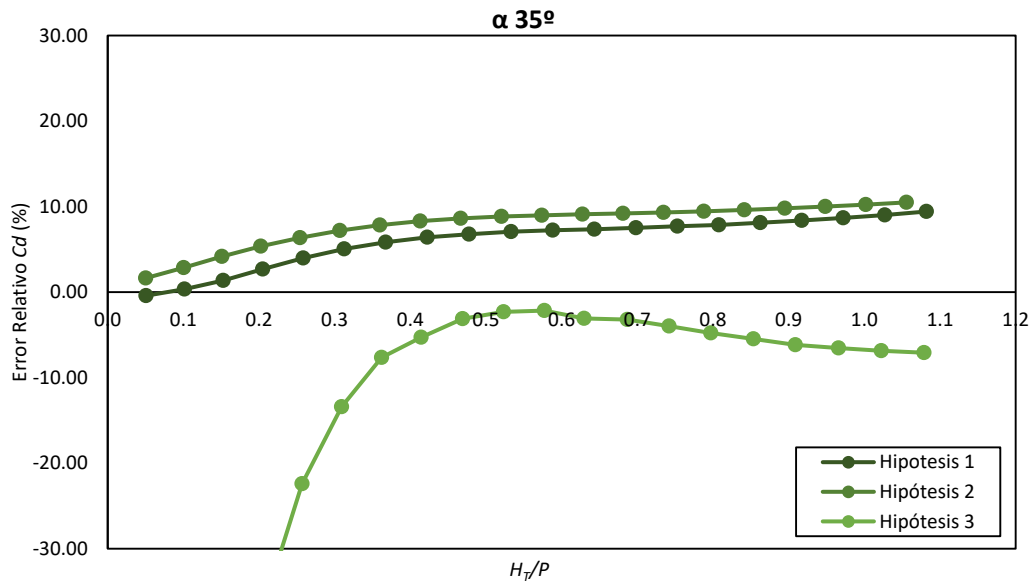


Figura 151. Errores relativos para las 3 hipótesis propuestas en descarga libre y $\alpha= 35^\circ$.

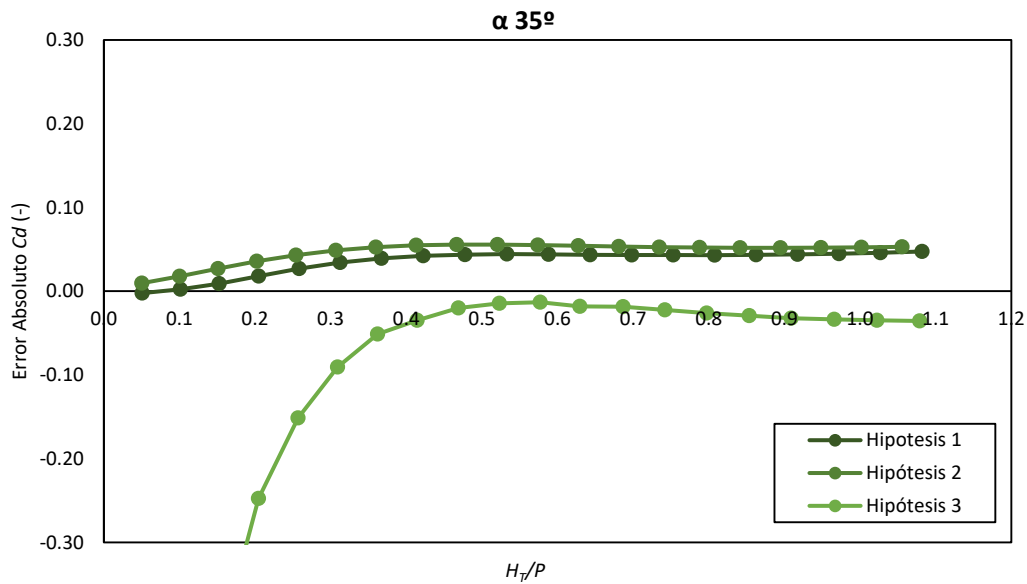


Figura 152. Errores absolutos para las 3 hipótesis propuestas en descarga libre y $\alpha=35^\circ$.

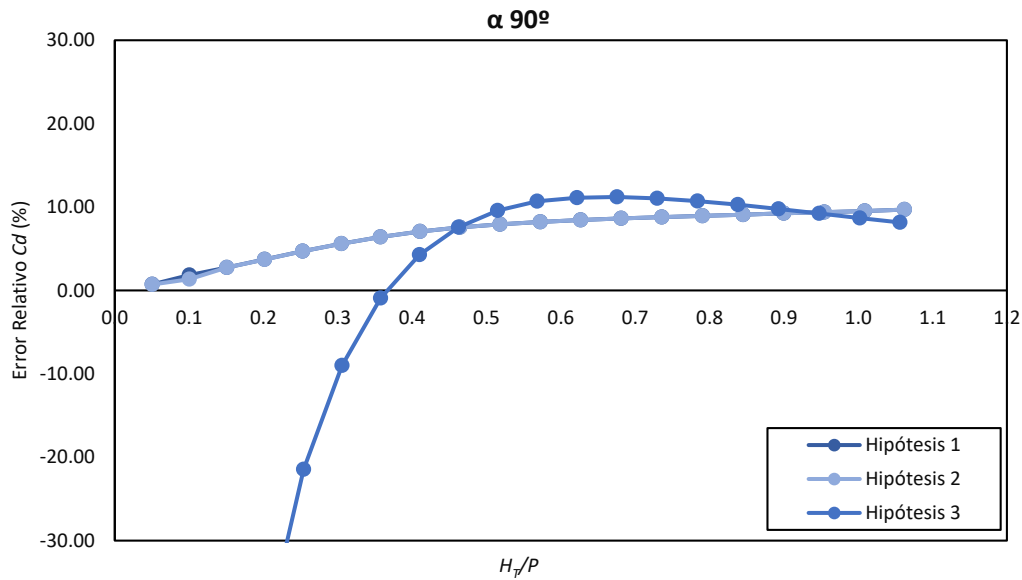


Figura 153. Errores relativos para las 3 hipótesis propuestas en descarga libre y $\alpha=90^\circ$.

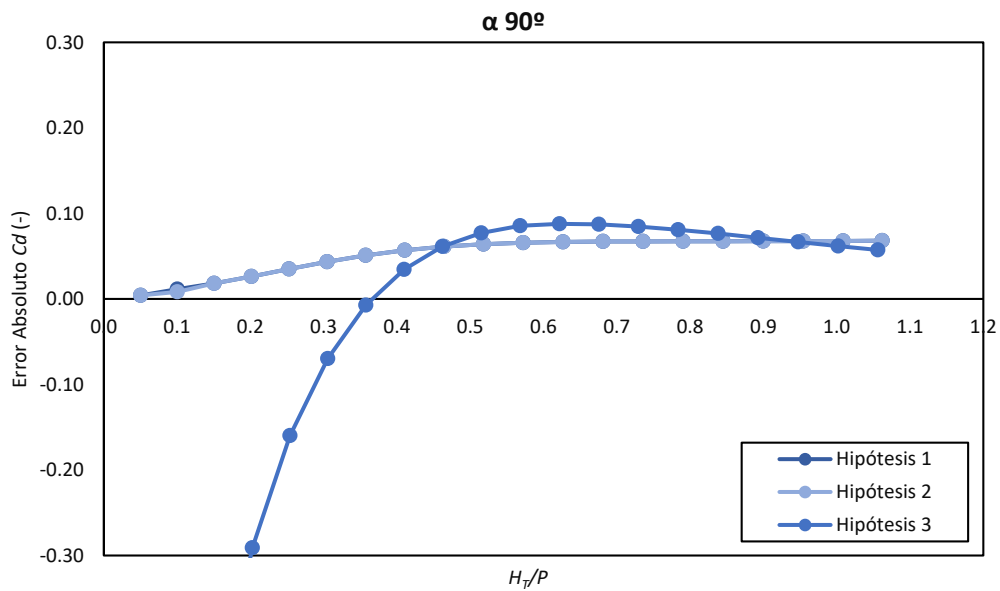


Figura 154. Errores absolutos para las 3 hipótesis propuestas en descarga libre y $\alpha=90^\circ$.



4.2 Aliviaderos con descarga sumergida.

De las simulaciones de Iber, en la ventana de postproceso obtenemos la carga total aguas arriba, H^* , y aguas abajo del vertedero, H_d , para descarga sumergida medida desde el fondo del canal. Con estos datos calculamos las cargas totales sobre el vertedero, restando a los valores obtenidos de Iber la altura de vertedero, P . Como conocemos la carga total aguas arriba del vertedero en descarga libre (H_o) obtenemos las relaciones H^*/H_o y H_d/H_o con las que representamos las siguientes gráficas.

En la primera comprobación para descarga sumergida se introduce la geometría del aliviadero en laberinto como condición interna- vertedero, y en la segunda, la geometría del aliviadero forma parte de la geometría del canal.

Simulados todos los casos pasamos al análisis de resultados. Los resultados obtenidos se comparan con los resultados de Tullis (2007).

Hipótesis 1.

La hipótesis 1 para descarga sumergida considera el vertedero en laberinto como una condición interna.

Los resultados obtenidos para los distintos caudales simulados se superponen sobre la línea de resultados de Tullis (2007). Esto quiere decir que los resultados son correctos y la hipótesis buena.

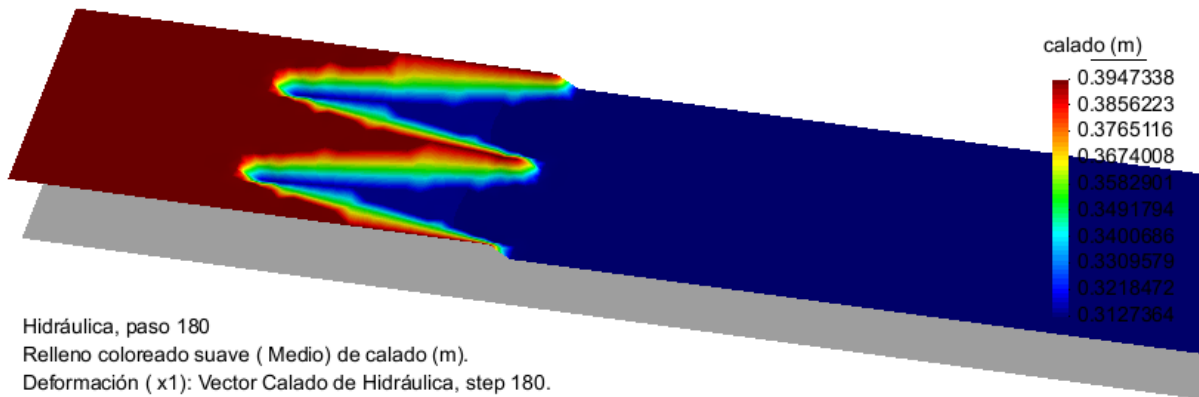


Figura 155. Calado obtenido en Iber tras la simulación para un aliviadero con descarga sumergida de 8° y perfil “Half-Round” para $H^*/H_o=1.0133$ y $H_d/H_o=0.1205$ para un caudal de $0.16038 \text{ m}^3/\text{s}$.

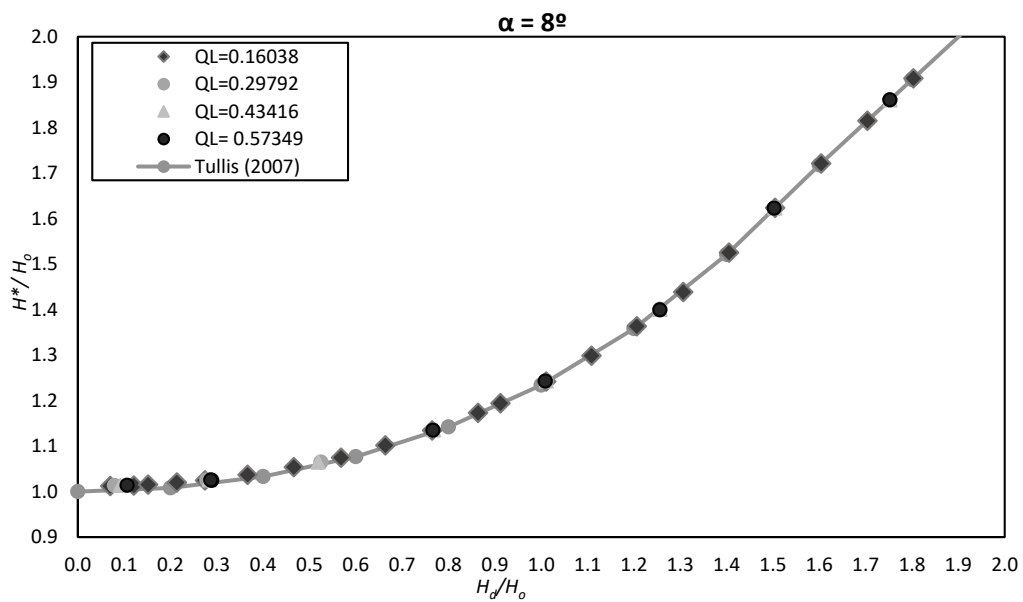


Figura 156. Comparación de la relación H^*/H_o vs H_d/H_o obtenido de las simulaciones en Iber con el calculado por Tullis (2007) para aliviaderos en laberinto de 8° , “Half-Round”. Hipótesis 1 descarga sumergida.

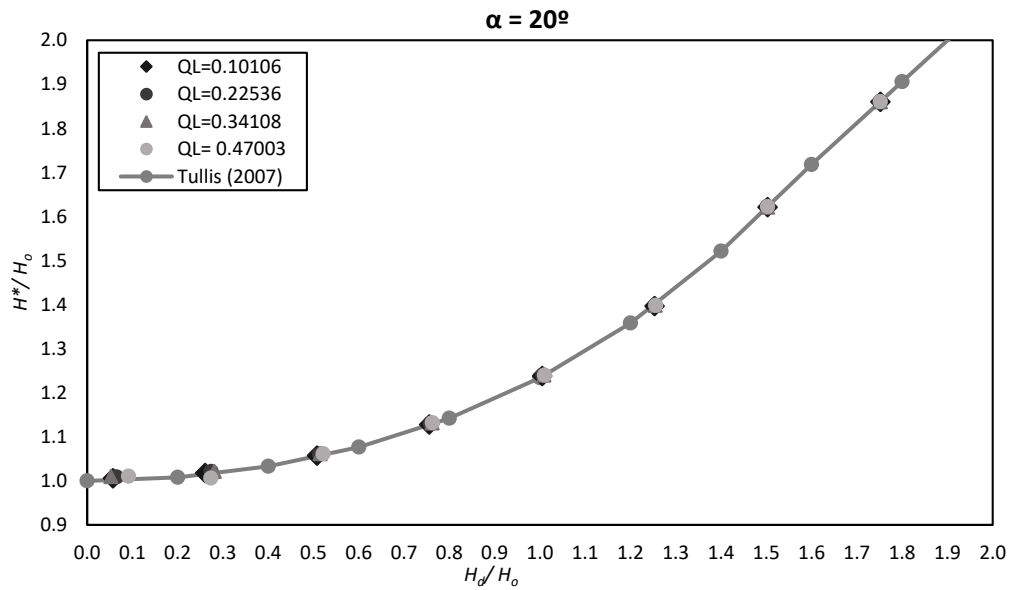


Figura 157. Comparación de la relación H^*/H_o vs H_d/H_o obtenido de las simulaciones en Iber con el calculado por Tullis (2007) para aliviaderos en laberinto de 20° , “Half-Round”. Hipótesis 1 descarga sumergida.

Hipótesis 2.

En esta hipótesis se introduce el aliviadero en laberinto como parte de la geometría del canal.

Los resultados para cada uno de los caudales siguen la misma tendencia que los obtenidos por Tullis (2007), pero los valores son menores quedando la nube de puntos por debajo de la línea de resultados de Tullis (2007).

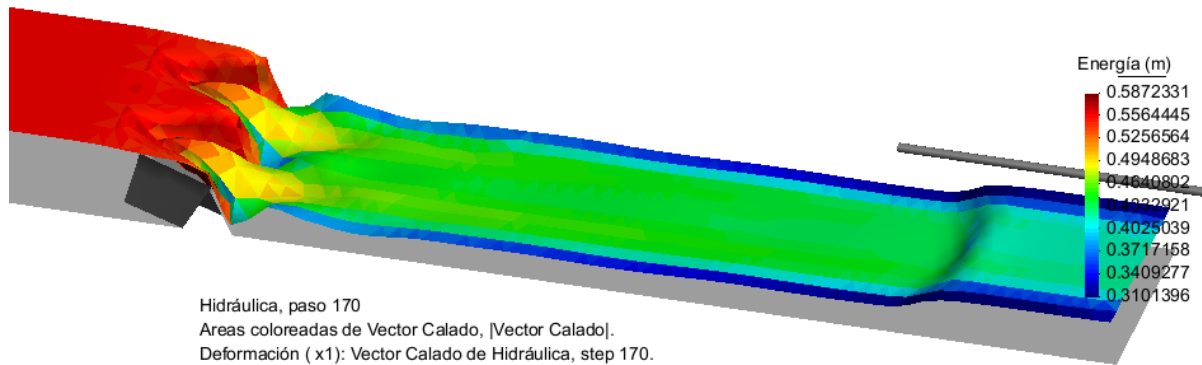


Figura 158. Energía obtenida en Iber tras la simulación para un aliviadero con descarga sumergida de 20° y perfil “Half-Round” para $H^*/H_o=1.0456$ y $H_d/H_o=1.0192$ con un caudal de $0.38269 \text{ m}^3/\text{s}$.

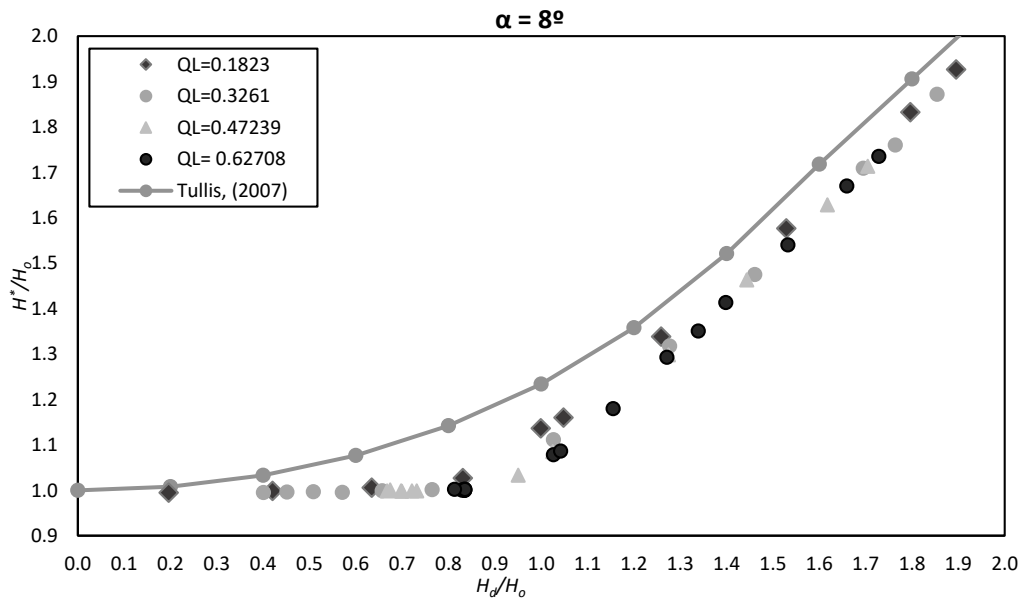


Figura 159. Comparación de la relación H^*/H_o vs H_d/H_o obtenido de las simulaciones en Iber con el calculado por Tullis (2007) para aliviaderos en laberinto de 8°, “Half-Round”. Hipótesis 3 descarga sumergida.

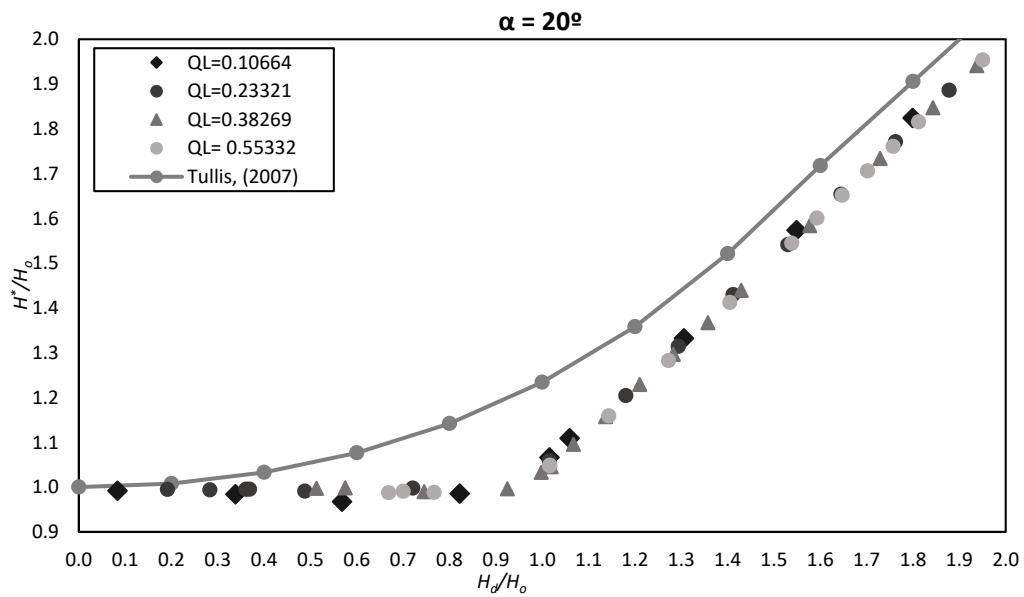


Figura 160. Comparación de la relación H^*/H_0 vs H_d/H_0 obtenido de las simulaciones en Iber con el calculado por Tullis (2007) para aliviaderos en laberinto de 20° , “Half-Round”. Hipótesis 3 descarga sumergida.



5. Conclusiones.

El objetivo del presente trabajo es comprobar la capacidad de Iber para analizar el funcionamiento de vertederos no lineales, concretamente vertederos tipo laberinto. Para ello se utiliza como estudios de partida las investigaciones de Crookston y Tullis (2013) para vertederos con flujo en descarga libre y, Tullis (2007) para vertederos con descarga sumergida.

Iber es un programa bidimensional para la simulación hidráulica que permite modelar diferentes tipos de estructuras. Entre ellas se encuentran los vertederos tipo lineal. Ante la imposibilidad de introducir los aliviaderos no lineales en el programa como tal, se proponen tres alternativas para descarga libre, y dos para descarga sumergida.

Estas hipótesis son:

- Aliviaderos con descarga libre:

Hipótesis 1- Se introduce la geometría del aliviadero en laberinto como condición interna tipo vertedero.

Hipótesis 2- Se considera la geometría del aliviadero lineal y se le asigna la condición interna tipo vertedero.

Hipótesis 3- El aliviadero en laberinto forma parte de la geometría del canal.

- Aliviaderos con descarga sumergida:

Hipótesis 1- Al igual que la hipótesis 1 de descarga libre, se introduce la geometría del aliviadero en laberinto como condición interna tipo vertedero.

Hipótesis 2- Coincidiendo con la hipótesis 3 de descarga libre, se introduce el vertedero como parte de la geometría.

Tras la simulación y muestra de resultados para cada una de estas hipótesis de cálculo se llega a las siguientes conclusiones:



- Para aliviaderos con descarga libre:

Siempre que la relación H_T/P no esté por debajo de 0.2-0.3, la hipótesis 3 obtiene coeficientes de descarga más próximos a los de Crookston y Tullis (2013).

Con las hipótesis 1 y 2, aunque tengan un error mayor que la hipótesis 3, se obtienen resultados válidos. Además, estos dos métodos permiten obtener el coeficiente de descarga para valores pequeños de H_T/P .

En cuanto a la agilidad a la hora de introducir la geometría y los parámetros necesarios en el programa, la opción 2 es la más sencilla y por consiguiente rápida. Para los casos 1 y 3 es necesario conocer las coordenadas o vértices del aliviadero tipo laberinto para situarlo en Iber. Desde este punto de vista, la hipótesis 3 es la más compleja puesto que se introduce tridimensionalmente y exige conocer con mayor detalle la geometría.

- Para aliviaderos con flujo en descarga sumergida:

En este caso, la hipótesis 1 es la mejor opción para simular un aliviadero tipo laberinto en Iber. Los resultados obtenidos coinciden con los de Tullis (2007) con gran precisión. La forma de introducir la geometría en Iber implica conocer los vértices del aliviadero en función del ángulo de las paredes laterales.

La hipótesis 2, además de ser más compleja al introducir la geometría, los resultados obtenidos mantienen la tendencia de los de Tullis (2007) con peores resultados, por lo que no se recomienda su uso para vertederos en laberintos cuando la descarga sea sumergida.



6. Bibliografía.

Anderson, R.M. (2013). “Piano Key Hydraulics and labyrinth weir Comparisons.” *Thesis*, Utah State University, Logan, UT, USA.

Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, M.E., Dolz, J., Coll, A. (2014). Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 30(1), 1-10.

Cordero Page, D., Elviro García, V. y Granell Ninot, C. (2007). Aliviaderos en laberinto. Presa de María Cristina. *Ingeniería Civil*, N°146, 5-20.

Crookston, B.M. (2010). “Labyrinth weirs.” *Ph.D. Thesis*, Utah State University, Logan, UT, USA.

Crookston, B.M. y Tullis, B.P. (2013). “Hydraulic design and analysis of labyrinth weirs I: Discharge Relationships.” *J.Irrig.Drain.Eng.*, 139(5):363-370.

Darvas, L. (1971). “Discussion of ‘Performance and design of labyrinth weirs’ by Hay and Taylor.” *J.Hydraul.Eng.*, 97(80), 1246-1251.

Guía Técnica de Seguridad de Presas N°5, (1997) *Aliviaderos y desagües*, Comité Nacional Español de Grandes Presas, Madrid.

Hay, N., y Taylor, G. (1970). “Performance and design of labyrinth weirs.” *J.Hydraul.Eng.*, 96(11), 2337-2357.

Henry T. Falvey. “Hydraulic Design of labyrinth weirs (2003).” ASCE Press (American Society of Civil Engineers), Reston, Virginia.

Manual básico del usuario IBER. (2012). Ministerio de Fomento. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.

Manual de referencia hidráulica de IBER, capítulo 2: Módulo Hidrodinámico. (2014). Ministerio de Fomento. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.

Modelo Iber 2.0. Manual del usuario. (2016). Centro de estudios hidrográficos. CEDEX.

Naudascher, E., Hidráulica de Canales. Diseño de estructuras. (2000). Limusa. Noriega Editores, México.



Paxson, G.S., Tullis, B.P. y Hertel, D.J. (2014). “Comparison of Piano Key Weirs with labyrinth and gated spillways: Hydraulics, cost, constructability and operations.” *Labyrinth and Piano Key Weirs II – PKW 2013*, 123-130. CRC Press: Leiden.

Vallarino Cánovas del Castillo, E. (2006): Tratado Básico de Presas. Tomo I: Generalidades-Presas de hormigón y de materiales sueltos-Aliviaderos, Colegio de Caminos, Canales y Puertos, Madrid.

Taylor, G. (1968), “The performance of labyrinth weirs.” *Ph.D. Thesis*, University of Nottingham, UK, Nottingham, U.K.

Tullis, J.P., Amanian, N. y Waldron, D. (1995). “Design of labyrinth spillways.” *J. Hydraul.Eng.*, 121(3), 247-255.

Tullis, B.P., Young, J.C. y Chandler, M.A. (2007). “Head-discharge Relationships for Submerged Labyrinth Weirs.” *J.Hydraul.Eng.*, 133(3), 248-254.

Villemonte, J.R. (1947). “Submerged-weir discharge studies.” *Eng.News.Rec.*, 139 (26), 54-56.