

Conocimientos básicos

Flujo en canales abiertos

Índice

En línea con muchos libros de texto, los canales de ensayo GUNT enseñan los fundamentos del flujo en canales abiertos mediante un canal de ensayo con sección rectangular.

Al principio de este capítulo, presentamos los fundamentos del flujo en canales abiertos. En paralelo, mostramos cómo se pueden implementar ciertos temas y fenómenos experimentalmente. Estas explicaciones sirven, en principio, para todos los canales de ensayo GUNT y sus accesorios.

Fundamentos del flujo en canales abiertos radio hidráulico perímetro mojado perfiles de canal típicos	072
Descarga uniforme en un canal rectangular ecuaciones de flujo	074
Descarga estacionaria ecuación de continuidad ecuación de Bernoulli energía específica	075
Descarga variada en un canal rectangular transición de flujo diagrama de energía específica diagrama de fuerza específica	076
Determinación de la pérdida de energía específica en el resalto hidráulico	078
Número de Froude y descarga crítica perturbación momentánea y permanente resalto hidráulico con distintos números de Froude	079 081
Subida y descenso del nivel en canales abiertos	082
Disipación de energía cuenco de disipación	084
Estructuras de control flujo a través de vertederos	086
■ condición de la caída en el vertedero	086
■ flujo a través de vertederos fijos	087
■ tipos de caída	088
■ cálculo de la descarga según Poleni	088
presa-vertedero de perfil Ogee	089
vertedero de cresta delgada	090
vertedero de cresta ancha	091
vertedero de sifón	092
compuerta	093
Obra de paso	094
Pérdidas locales en canales pilares	095
Métodos para la medición de la descarga canal para aforar vertederos de aforo	096
Flujo no estacionario: vibraciones inducidas por el flujo pilotes vibratorios	098
Transporte de sedimentos transporte de depósitos arrastrados por la corriente	099
Flujo no estacionario: olas	100



Las aguas corrientes en la naturaleza representan "flujos en canales abiertos". Desde hace siglos, el hombre ha realizado intervenciones de construcción en ellos: sistemas de regadío, protección contra las inundaciones y aprovechamiento de ríos para la navegación y la producción de energía. Algunos ejemplos

conocidos son los antiguos sistemas de conducción de agua (acueductos) o los canales de irrigación agrícolas, que se extienden a lo largo de grandes distancias: las "Levadas" en Portugal (abajo).

Símbolos de fórmulas utilizados con frecuencia

E	energía específica
ΔE	pérdida de energía específica
h	profundidad de descarga
h_c	profundidad crítica
h_d	profundidad de descarga aguas abajo ("downstream")
h_o	altura ("weir head")
h_u	profundidad de descarga aguas arriba ("upstream")
J	pendiente de línea de energía
Q	descarga
v	velocidad de flujo
W	altura del vertedero



Conocimientos básicos

Flujo en canales abiertos

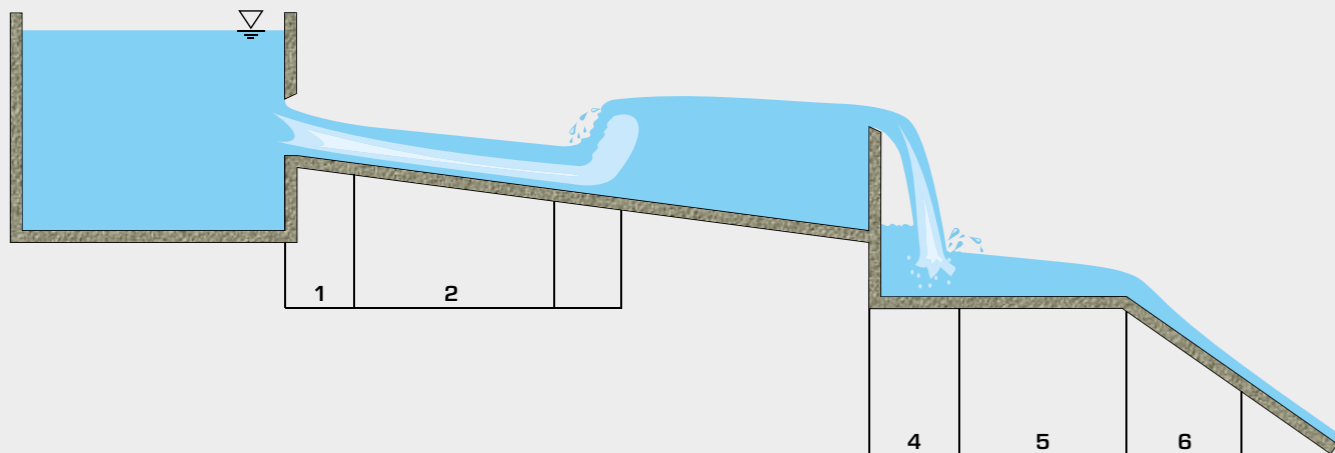
Fundamentos del flujo en canales abiertos

Los flujos en canales abiertos son muy comunes. Entre los ejemplos típicos encontramos ríos y canales, zanjas de drenaje, cunetas, atracciones acuáticas en parques de atracciones o canalización. La fuerza motriz de estos flujos normalmente turbulenta es la gravitación. Una característica de los flujos en canales abiertos es su superficie libre. En comparación con los flujos en tuberías, los flujos en canales abiertos tienen un mayor grado de libertad gracias a la superficie libre.

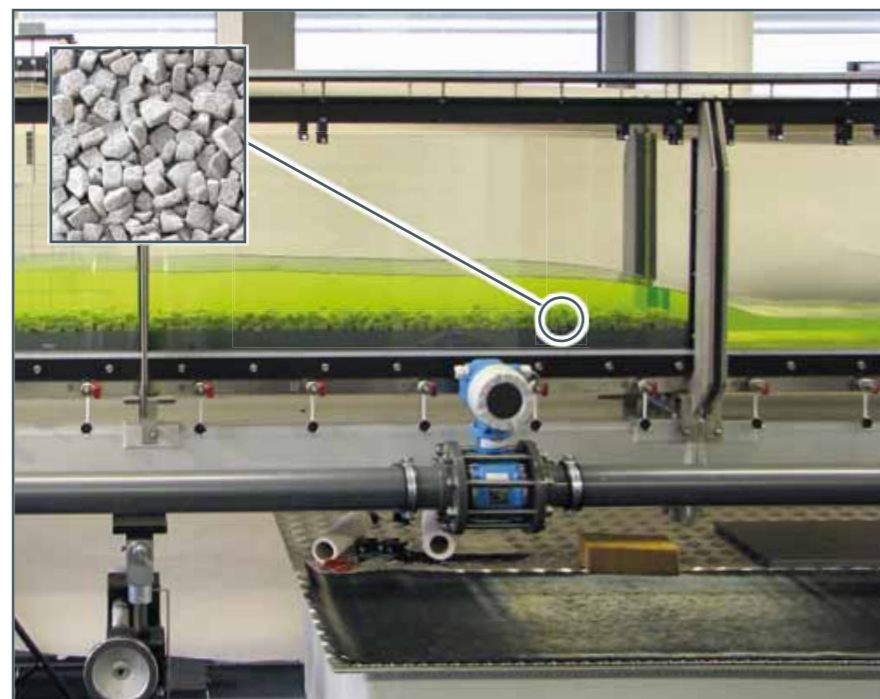
Básicamente existen dos tipos de flujo en canales abiertos:

- flujo uniforme (la profundidad de descarga (profundidad del agua) permanece igual; aceleración=deceleración)
- flujo variado (la profundidad de descarga varía debido a la aceleración o deceleración)

La descarga puede ser **subcrítica** (denominada también "lenta"), **crítica** o **supercrítica** (denominada también "torrencial").



1 descarga bruscamente variada bajo una compuerta, 2 descarga gradualmente variada, 3 resalto hidráulico (bruscamente variado), 4 desbordamiento de vertedero (flujo bruscamente variado), 5 descarga gradualmente variada, 6 descarga gradualmente variada en un cambio de pendiente



HM 162.77
Base del canal
con grava

Perfiles de canal típicos

En la mayoría de los casos se puede reproducir aproximadamente la sección transversal correspondiente de un flujo en canales abiertos con pocos perfiles geométricos. Tanto circulares como semicirculares, rectangulares, trapezoidales, como también las combinaciones de los mismos son ideales para poder modelar y calcular matemáticamente el canal. A menudo es importante determinar la descarga Q y la profundidad de descarga h en puntos definidos. Las variables típicas de los cálculos son el área de caudal A , el perímetro mojado P y el radio hidráulico R .

En el caso de una **sección rectangular**, las variables se definen del modo siguiente:

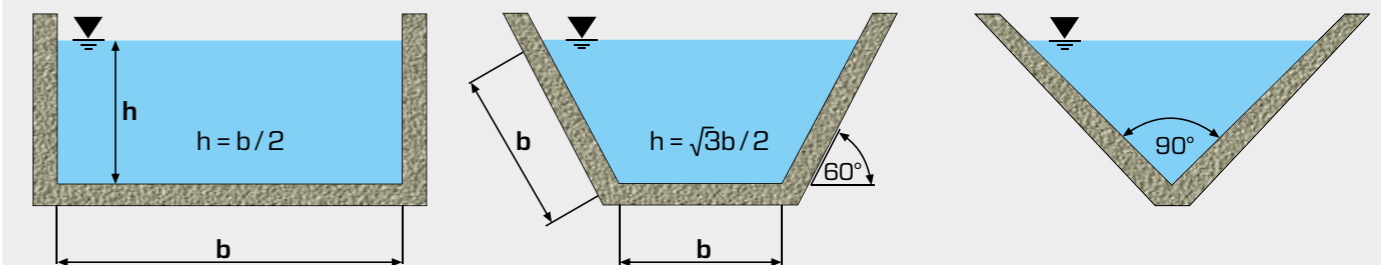
- área de caudal $A = bh$
 - perímetro mojado $P = b + 2h$
 - radio hidráulico $R = A / P = bh / (b + 2h)$
- En canales anchos y poco profundos, el radio hidráulico R corresponde a la profundidad de descarga h .

En el caso de canales artificiales, el llamado perfil hidráulico óptimo es una variable importante – un diseño óptimo del perfil ahorra material y costes:

- descarga Q + pendiente de línea de energía J dadas: determinación del área de caudal A mínima
- descarga Q + área de caudal A dadas: determinación de la pendiente de línea de energía J mínima.

Secciones transversales hidráulicas óptimas de canal

En el caso del perímetro mojado más pequeño, basado en el área dada, se habla de sección transversal hidráulica óptima.



Rectángulo, trapecio con ángulos de 60°, triángulo; h profundidad de descarga, b anchura del canal

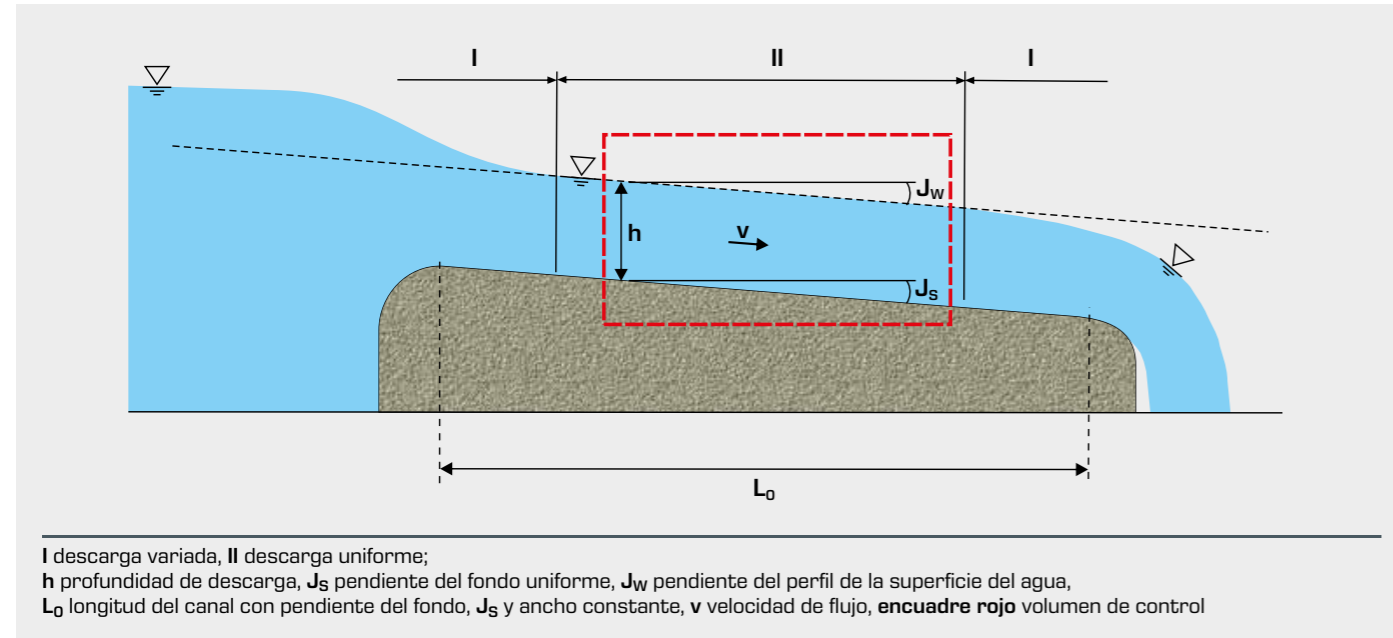
Los canales de ensayo GUNT tienen una sección rectangular. Estos ofrecen – además de la instalación de distintos modelos – la posibilidad de modificar la pendiente y la base del canal para influir en la superficie y la rugosidad. Es posible realizar múltiples

ensayos del flujo en canales abiertos uniforme y variado, incluyendo los instrumentos para medir la velocidad de flujo v y la profundidad de descarga h .

Conocimientos básicos

Flujo en canales abiertos

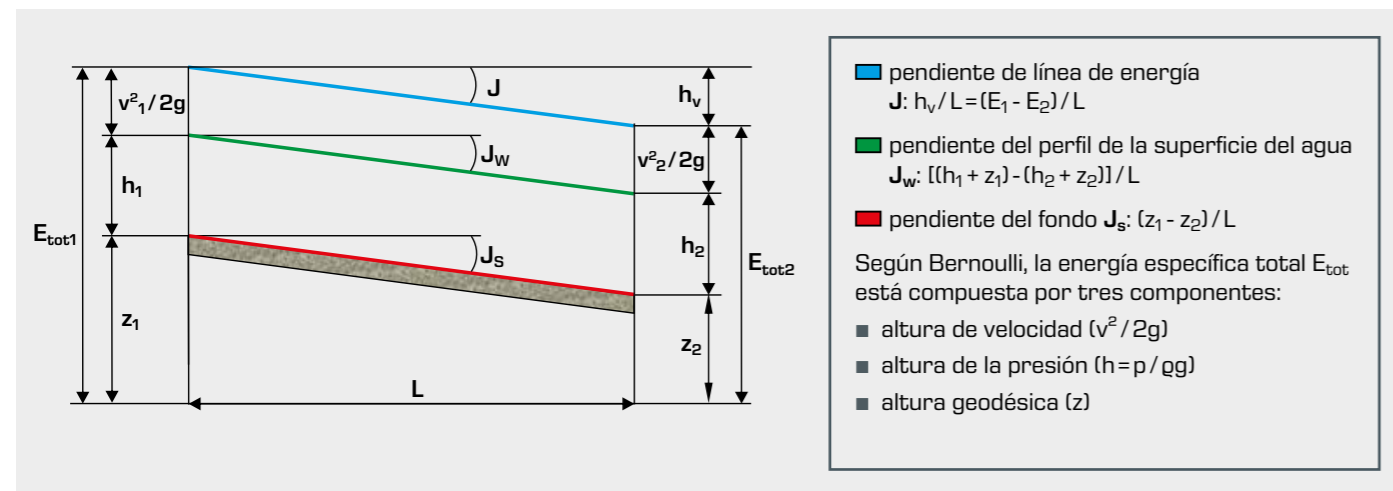
Descarga uniforme en un canal rectangular



Con un flujo en canales abiertos uniforme, la profundidad de descarga h permanece igual, es decir, paralela al fondo. Esto significa también que la velocidad de flujo v permanece constante.

La profundidad de descarga h se puede describir también como altura de la presión (un componente de la energía específica). Estas energías específicas se suelen representar en forma de pendientes de línea. En la pendiente de línea de energía J , la pro-

fundidad de descarga h suele ser el componente más significativo. En un flujo en canales abiertos uniforme, la pendiente de línea de energía J es igual a la pendiente del fondo J_s y, por tanto, a la profundidad de descarga h . La llamada **descarga normal** domina en el flujo en canales abiertos uniforme, es decir, que la pendiente del fondo J_s compensa las pérdidas por fricción en la descarga Q . La línea de energía, el perfil de la superficie del agua y la pendiente del fondo son paralelos.



Ecuaciones de flujo

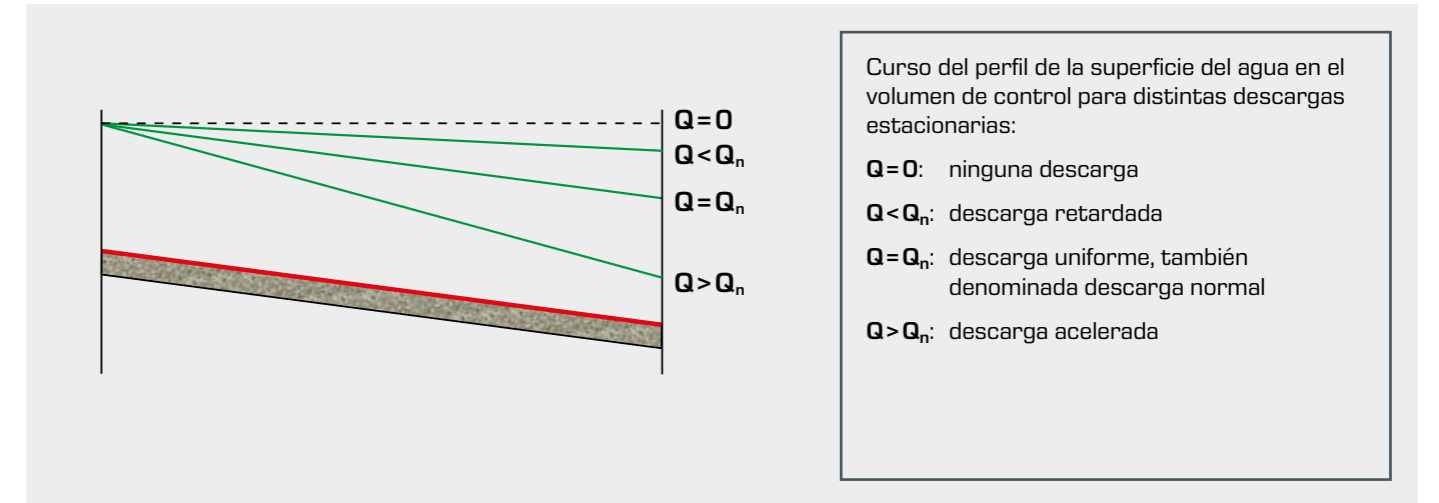
Las ecuaciones de flujo describen la relación entre la descarga Q y la profundidad de descarga h en una forma de la sección transversal y una característica de rugosidad dadas. La forma de la sección transversal se tiene en cuenta en el radio hidráulico; la profundidad de descarga h es un componente de la pendiente de línea de energía J .

Las ecuaciones de flujo utilizadas con asiduidad para canales habituales son

- Darcy-Weisbach
- Manning-Strickler (también Gauckler-Manning-Strickler).

Las ecuaciones de flujo se basan en valores empíricos.

Descarga estacionaria



Al considerar la energía específica en el volumen de control, se recurre a la **ecuación de Bernoulli** y a la **ecuación de continuidad**.

Ecuación de continuidad:

$$Q = \text{const} = AV = bhv \quad \text{o} \quad bh_1v_1 = bh_2v_2$$

Ecuación de Bernoulli (conservación de la energía general):

$$\frac{1}{2}mv^2 + mgh = \text{const}$$

Expresada con energías específicas se obtiene:

$$\frac{v_1^2}{2g} + h_1 + z_1 = \frac{v_2^2}{2g} + h_2 + z_2 + h_v \quad \text{con pérdida por fricción } h_v$$

con $v = \frac{Q}{bh}$ de la ecuación de continuidad se obtiene:

$$\frac{1}{2} \frac{Q^2}{gb^2h_1^3} + h_1 + (z_1 - z_2) = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{gb^2h_2^3} + h_2 + h_v$$

Para la **descarga normal** se aplica:

$$h_1 = h_2, \text{ esto es } h_v = z_1 - z_2$$

La **energía específica** se define como

$$E = h + \frac{v^2}{2g} = h + \frac{Q^2}{2gh^2}$$

Se compone de la altura de velocidad y la altura de la presión. Expresada de otro modo:

$$h^3 - Eh^2 + \frac{Q^2}{2g} = 0$$

Como resultado se obtiene una ecuación de tercer grado para la profundidad de descarga h . La profundidad de descarga h depende de la energía específica E y la descarga Q o de la pendiente y la rugosidad.

Conocimientos básicos

Flujo en canales abiertos

Descarga variada en un canal rectangular

En muchos casos, la descarga Q en un canal no es uniforme. Se diferencia entre descarga **gradualmente variada** y descarga **rápidamente variada**.

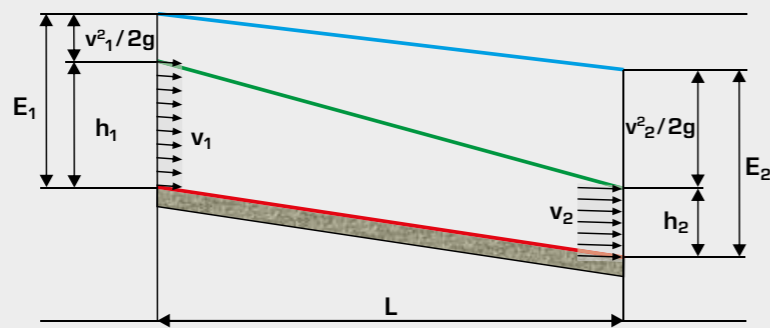
- descarga gradualmente variada: la profundidad de descarga h varía, la descarga Q o el tipo de flujo en sí mismo es **subcrítico** (al principio). La descarga gradualmente variada se produce, p.ej., en un canal con poca pendiente y gran rugosidad.
- la descarga rápidamente variada se produce, p.ej., en el desbordamiento de vertederos. En muchos casos la descarga es **supercrítica**.

La descarga subcrítica tiene una gran profundidad de descarga h con una velocidad de flujo v pequeña. En una descarga supercrítica se da lo contrario: profundidad de descarga h pequeña y gran velocidad de flujo v .

La **transición de flujo** de descarga subcrítica a supercrítica se produce con un cambio continuo de la profundidad de descarga h , la velocidad de flujo v y la energía específica E , p.ej., con un aumento de la pendiente.

Por el contrario, la transición de flujo de descarga supercrítica a subcrítica se produce siempre con un cambio repentino de la profundidad de descarga h y una pérdida de la energía específica ΔE , p.ej., en el **resalto hidráulico**.

Relación entre descarga Q , energía específica E y profundidad de descarga h



Energías específicas de un volumen de control
altura de velocidad ($v^2/2g$),
altura de la presión (h),
energía específica (E)

Las consideraciones de la energía específica en el volumen de control resultan en una ecuación de tercer grado para la profundidad de descarga h . La profundidad de descarga h depende de la energía específica E y la descarga Q . En el llamado **diagrama de energía específica** se representa la profundidad de descarga h gráficamente en función de la energía específica E con una descarga constante Q . La energía específica mínima E_{min} solo tiene una profundidad de descarga posible, la denominada profundidad

crítica h_c . En la profundidad crítica h_c domina la descarga crítica. Para el resto de las energías específicas hay dos profundidades alternas, que son relevantes desde el punto de vista físico (véase el diagrama con resalto hidráulico). Debe calcularse cuál de las dos profundidades de descarga es correcta en cada caso (¿la descarga es subcrítica o supercrítica?).

La descarga Q máxima con una energía específica E dada también puede determinarse.

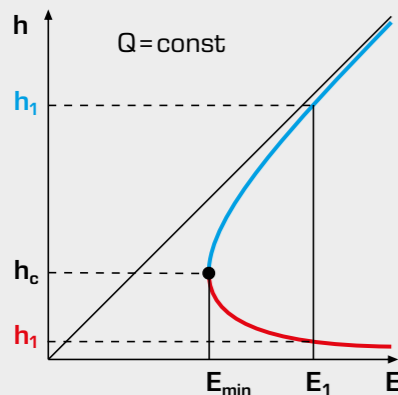
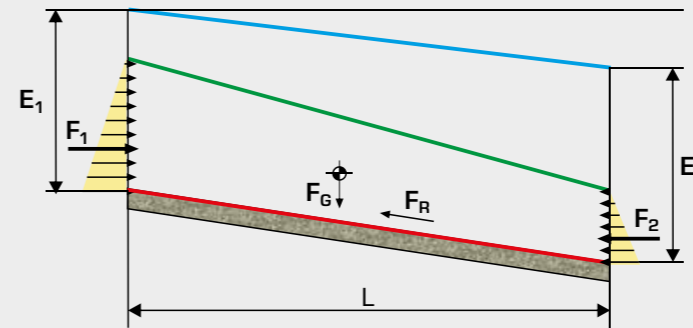


Diagrama de energía específica
 h profundidad de descarga, h_c profundidad crítica,
 h_1 profundidad alterna supercrítica para energía específica E_1 ,
 h_1 profundidad alterna subcrítica para energía específica E_1 ,
 E_{min} energía específica mínima,
 E energía específica;
■ descarga subcrítica,
■ descarga supercrítica

Relación entre principio del momento lineal, fuerza específica F y profundidad de descarga h

La tercera ecuación importante además de la de **Bernoulli** y la **conservación de la masa** es el **principio del momento lineal**. El equilibrio de fuerzas se establece en el volumen de control. En muchos casos pueden desprejarse la influencia del peso y la fuerza de fricción. Por tanto, solo son relevantes las fuerzas que

actúan en las áreas por las que pasa el flujo: la fuerza de compresión estática y la fuerza de impulso dinámica. La denominada fuerza específica F es la suma de ambas fuerzas y se determina mediante el principio del momento lineal.



Fuerzas que se producen en un volumen de control
 F_1, F_2 fuerza del agua sobre las superficies por las que pasa el flujo,
 E_1, E_2 energías específicas de un volumen de control,
 F_G peso,
 F_R fuerza de fricción

También la fuerza específica se puede representar en un diagrama. En el **diagrama de fuerza específica** se representa la profundidad de descarga h en función de la fuerza específica F con una descarga Q constante. Como en el diagrama de energía

específica, hay una fuerza específica mínima F_{min} a profundidad crítica h_c . Para el resto de las fuerzas específicas hay dos profundidades secuentes.

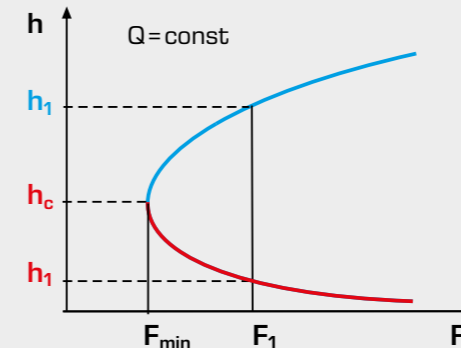
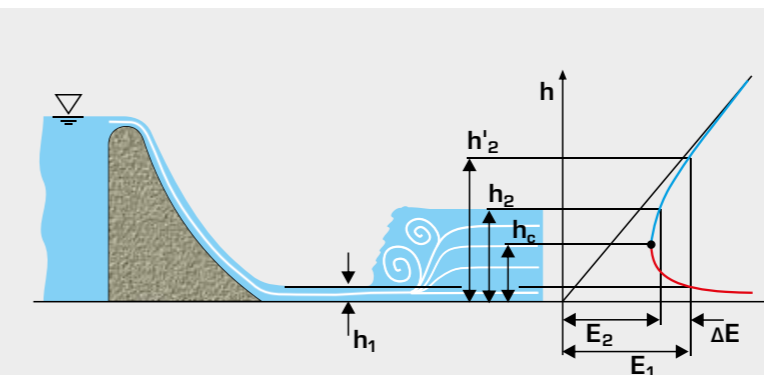


Diagrama de fuerza específica
 h profundidad de descarga, h_c profundidad crítica,
 h_1 profundidad alterna supercrítica para energía específica E_1 ,
 h_1 profundidad alterna subcrítica para energía específica E_1 ,
 F_{min} fuerza específica mínima,
 F fuerza específica;
■ descarga subcrítica,
■ descarga supercrítica



Pérdida de energía específica en el resalto hidráulico
 h_1 profundidad de descarga supercrítica,
 h'_2 profundidad alterna subcrítica respecto a h_1 sin pérdida de energía específica,
 h_2 profundidad alterna subcrítica real después del resalto hidráulico,
 ΔE pérdida de energía específica

Conocimientos básicos

Flujo en canales abiertos

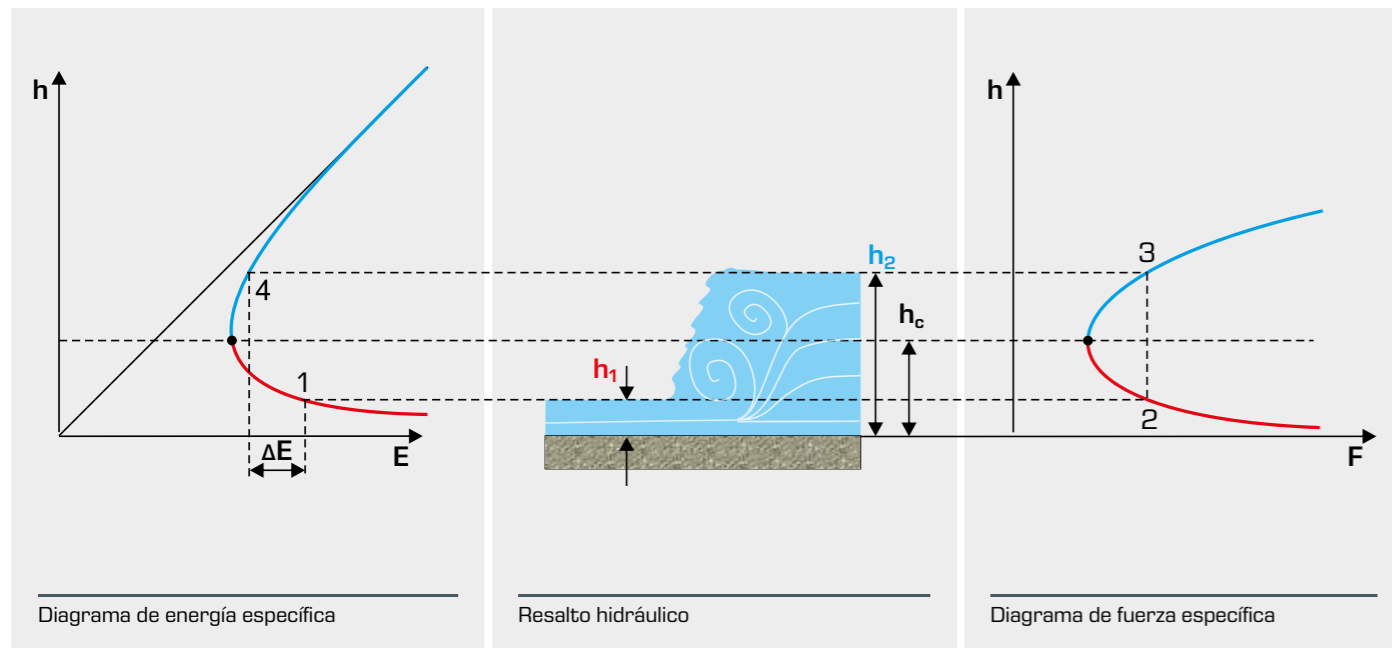
Determinación de la pérdida de energía específica en el resalto hidráulico

En el resalto hidráulico, una descarga supercrítica Q vuelve a ser subcrítica. La profundidad de descarga h varía repentinamente y es mayor después del resalto hidráulico. En el resalto hidráulico se disipa energía por las turbulencias producidas. El impulso se

mantiene, es decir, que existen dos profundidades secuentes h para la misma fuerza específica F . La relación de las profundidades secuentes h_1 y h_2 se describe mediante la fórmula siguiente:

$$\frac{h_2}{h_1} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{8Fr_1^2 + 1} + 1 \right) \quad \text{oder} \quad h_2 = \frac{-h_1}{2} + \sqrt{\frac{h_1^2}{4} + 4h_1 \frac{v_1^2}{2g}}$$

Con ayuda del diagrama de energía específica dado y un diagrama de fuerza específica análogo se puede determinar gráficamente, de forma sencilla, la pérdida de energía específica ΔE producida:



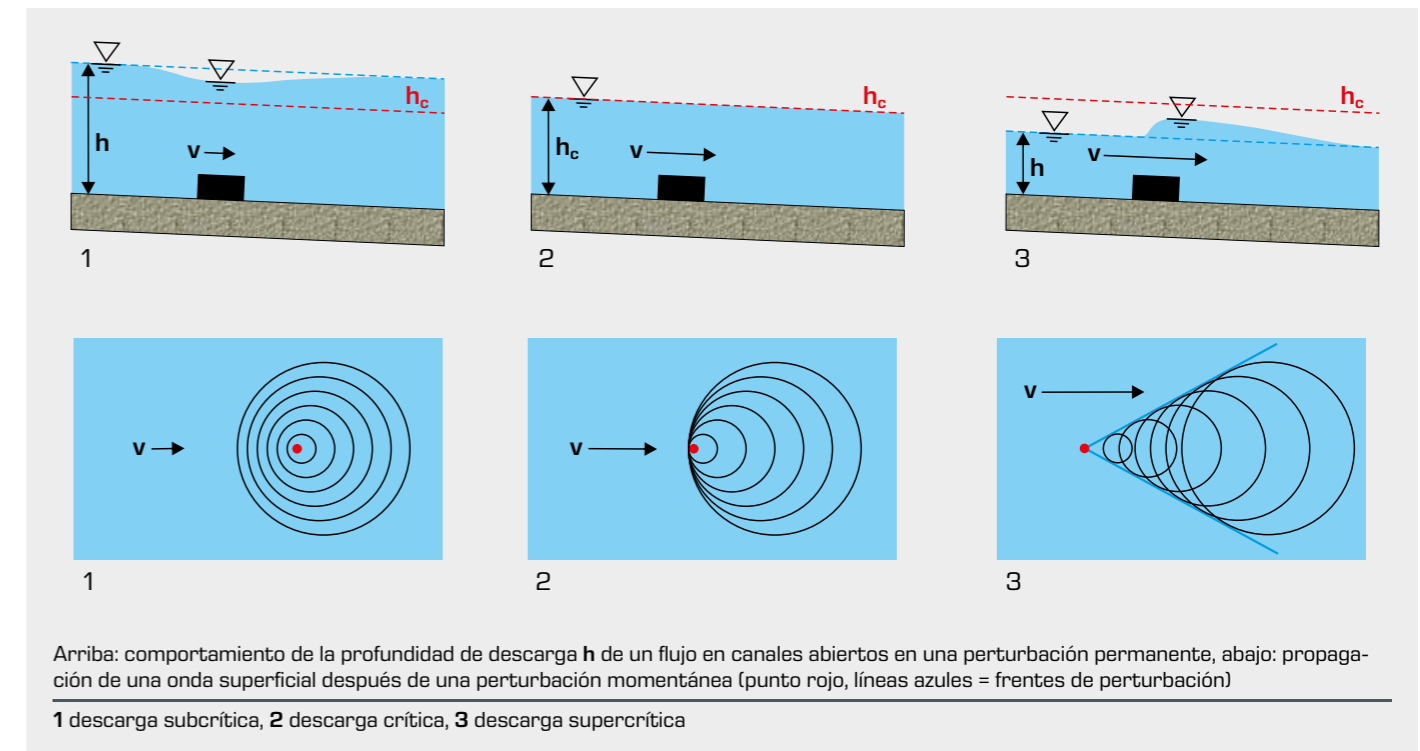
En el diagrama de energía específica y en el diagrama de fuerza específica se introduce la profundidad de descarga h_1 (puntos 1 y 2). Para determinar la profundidad de descarga h_2 después del resalto hidráulico, se determina gráficamente la profundidad seciente respecto a h_1 (punto 3) en el diagrama de fuerza específica. Las fuerzas específicas F_1 en el punto 2 y F_2 en el punto 3

son iguales (conservación del impulso). Después se introduce la profundidad de descarga h_2 en el diagrama de energía específica (punto 4). Las energías específicas E_1 y E_2 se leen en el diagrama. La pérdida de energía específica ΔE , que se produce en el resalto hidráulico, corresponde a la diferencia de las energías específicas.

La pérdida de energía ΔE producida también puede calcularse mediante la fórmula siguiente:

$$\Delta E = E_1 - E_2 = \left(h_1 + \frac{v_1^2}{2g} \right) - \left(h_2 + \frac{v_2^2}{2g} \right)$$

Número de Froude y descarga crítica



Descarga subcrítica

Las perturbaciones en el comportamiento de la descarga son perceptibles río arriba. La velocidad de flujo v es menor que la velocidad de propagación c de una onda superficial. La descarga subcrítica tiene normalmente una profundidad de descarga h mayor y una velocidad de flujo v menor.

Descarga crítica

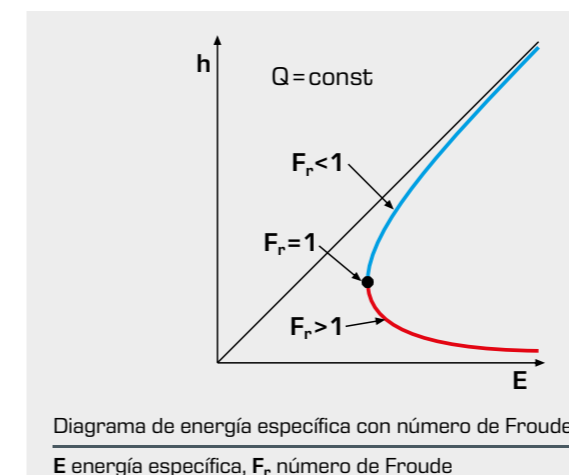
Las perturbaciones en el comportamiento de la descarga no son perceptibles río arriba. La velocidad de flujo v es igual que la velocidad de propagación c de una onda superficial.

Descarga supercrítica

Las perturbaciones en el comportamiento de la descarga no son perceptibles río arriba. La velocidad de flujo v es mayor que la velocidad de propagación c de una onda superficial.

El número de Froude describe el comportamiento de la velocidad de flujo v respecto a la velocidad de propagación c de una onda superficial y sirve, por tanto, como medida para la descarga subcrítica y supercrítica. El mismo número de Froude significa un flujo en canales abiertos con similitud dinámica.

$Fr < 1$: subcrítico, $Fr = 1$: crítico, $Fr > 1$: supercrítico

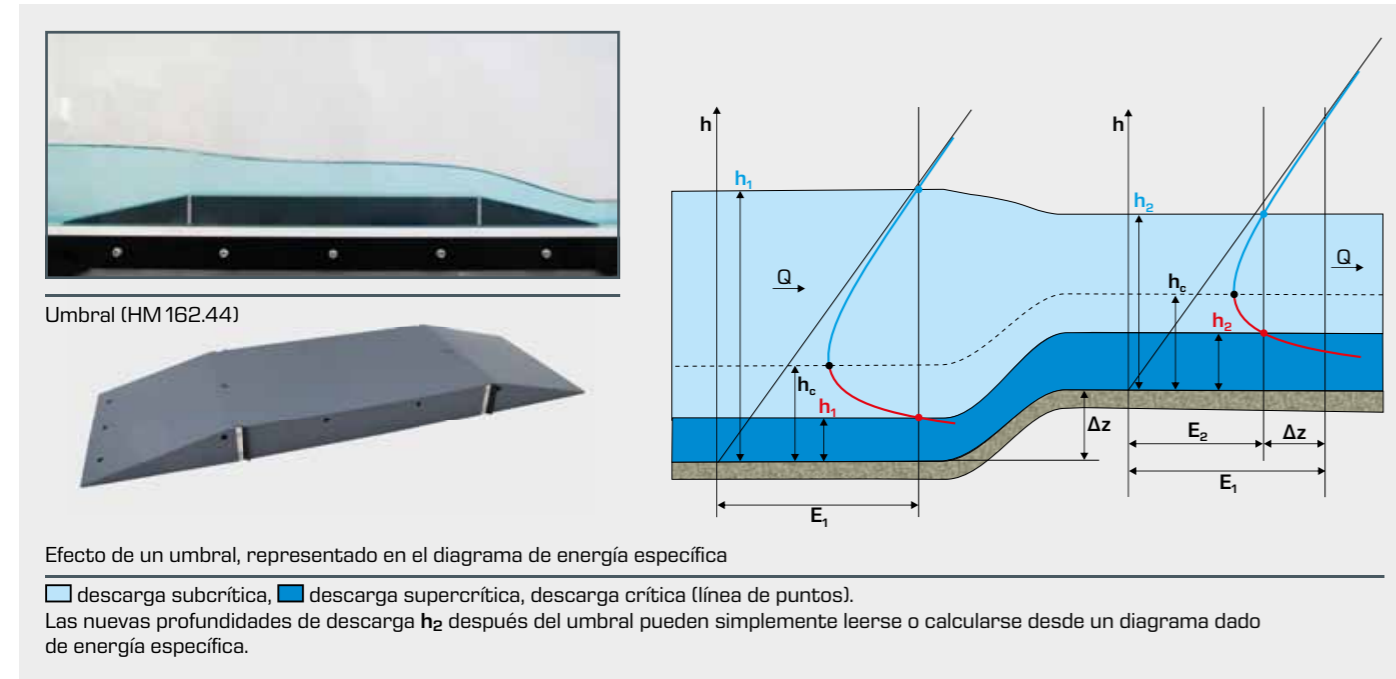


El flujo en canales abiertos tiene muchas similitudes con el flujo compresible. En ambos casos hay un número característico adimensional (Froude o Mach), que caracteriza al flujo. Muchas de las diferencias entre la descarga subcrítica y supercrítica tienen analogías en el flujo subsónico y supersónico.

Conocimientos básicos

Flujo en canales abiertos

Número de Froude y descarga crítica



Resalto hidráulico aguas abajo de un vertedero

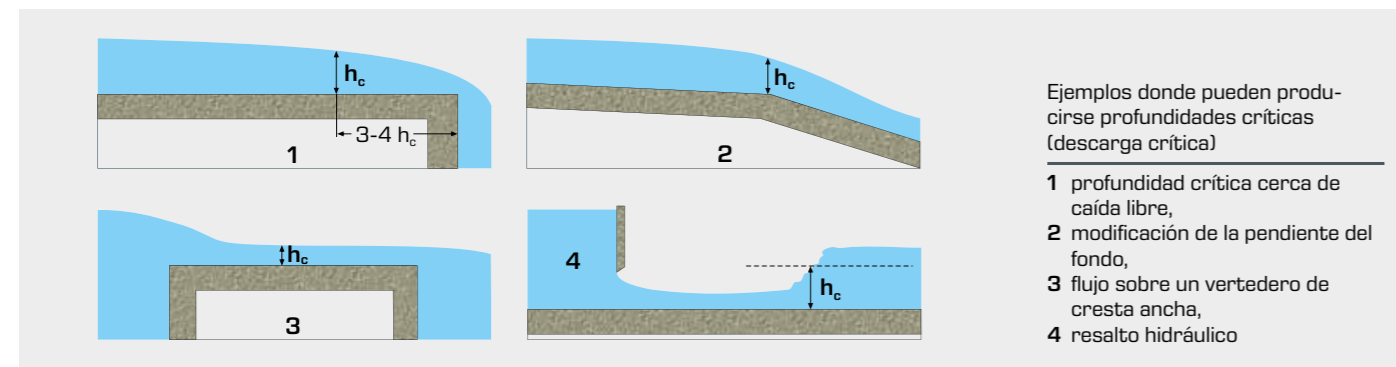


Resalto hidráulico en una pila

Descarga crítica (número de Froude = 1)

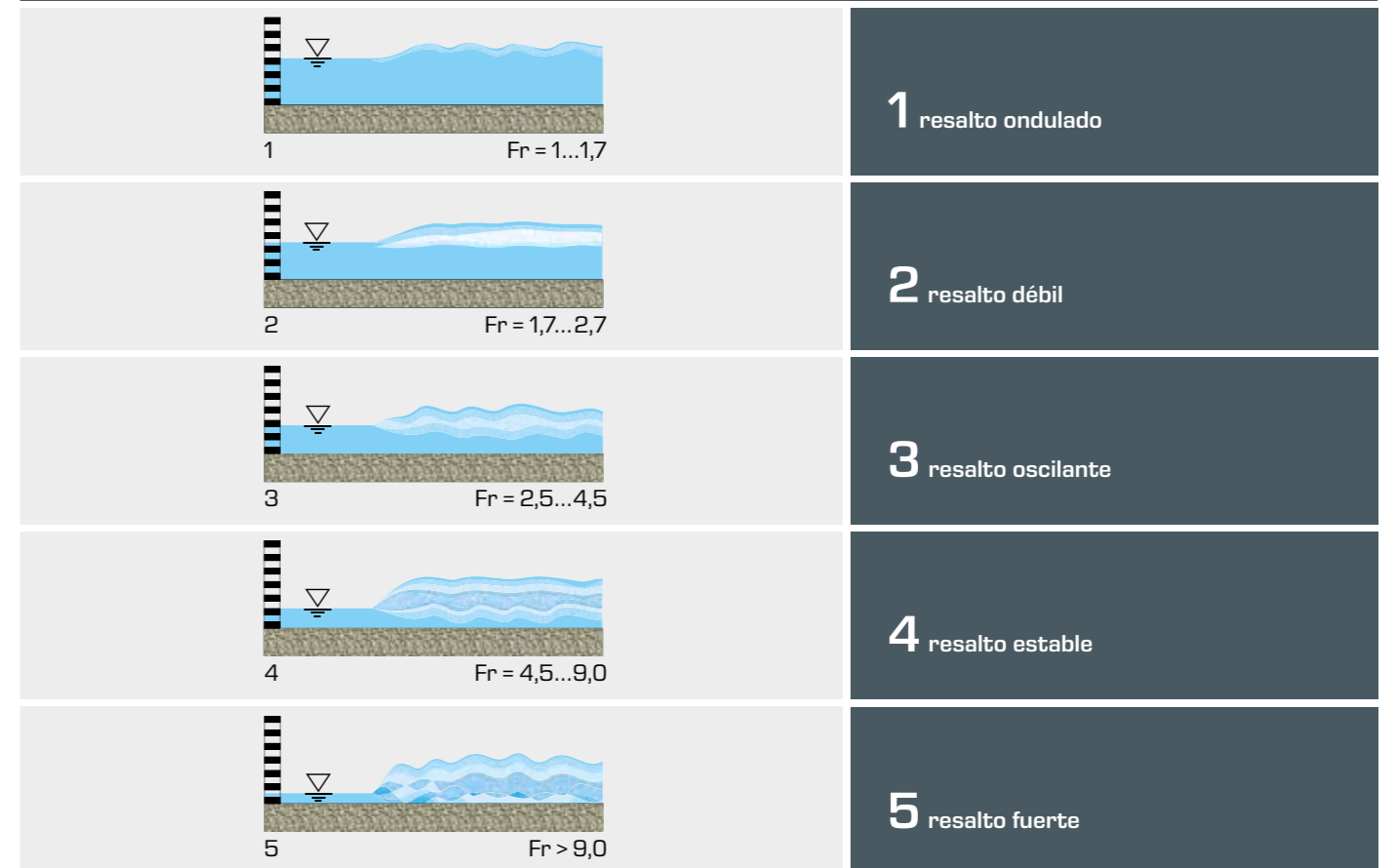
En la energía específica mínima E_{min} , la profundidad de descarga h corresponde a la profundidad crítica h_c . En este punto, el número de Froude es $Fr=1$; hay una descarga crítica y la veloci-

dad de propagación c es igual que la velocidad de flujo v . También en este punto la fuerza específica F en el canal es mínima.



Tipo de flujo	Profundidad de descarga	Velocidad de flujo	Pendientes	Número de Froude
descarga subcrítica	$h > h_c$	$v < v_c$	$J < J_{CRIT}$	$Fr < 1$
descarga crítica	$h = h_c$	$v = v_c$	$J = J_{CRIT}$	$Fr = 1$
descarga supercrítica	$h < h_c$	$v > v_c$	$J > J_{CRIT}$	$Fr > 1$
para canal rectangular	$h_c = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{gb^2}}$	$v_c = \sqrt{gh_c}$		$Fr = \frac{v}{\sqrt{gh}}$

Diseño del resalto hidráulico con distintos números de Froude



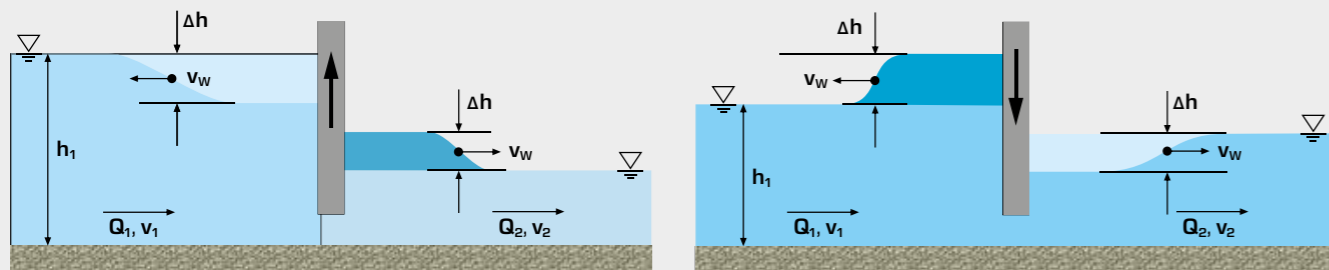
Conocimientos básicos

Flujo en canales abiertos

Subida y descenso del nivel en un canal abierto

Los fenómenos de "subida del nivel" y "descenso del nivel" en un canal abierto describen olas, que se producen por la variación repentina del flujo. En las tuberías se produce un fenómeno similar con los golpes de ariete. La variación repentina de flujo puede producirse, p.ej., al abrir y cerrar una compuerta o al parar turbinas. La ola positiva se forma pronunciadamente (la velocidad de propagación de la onda aumenta con el aumento de la profundidad del agua), mientras que la ola negativa es más bien plana.

En una primera aproximación, la altura de la ola negativa y la positiva son iguales y pueden calcularse con la ecuación de continuidad. En el caso de abertura repentina (ilustración izquierda), hablamos de descenso del nivel por toma de agua y represamiento, en caso de cierre de ola positiva por remanso y descenso del nivel río abajo.



Olas positivas y negativas al activar una compuerta repentinamente

Izquierda abertura de la compuerta, **derecha** cierre de la compuerta;
Q descarga, **h** profundidad de descarga, **Δh** altura de la ola positiva o altura de la ola negativa,
v velocidad de flujo, **v_w** velocidad de propagación de la onda;
índice 1 variables antes de la perturbación, **índice 2** variables después de la perturbación,
■ ola positiva, □ ola negativa



Ola positiva

Flujo en canales abiertos en el laboratorio

Aalto University
FinlandFederal Waterways Engineering
and Research Institute
GermanyUniversity of Southampton
United Kingdom

Conocimientos básicos

Flujo en canales abiertos

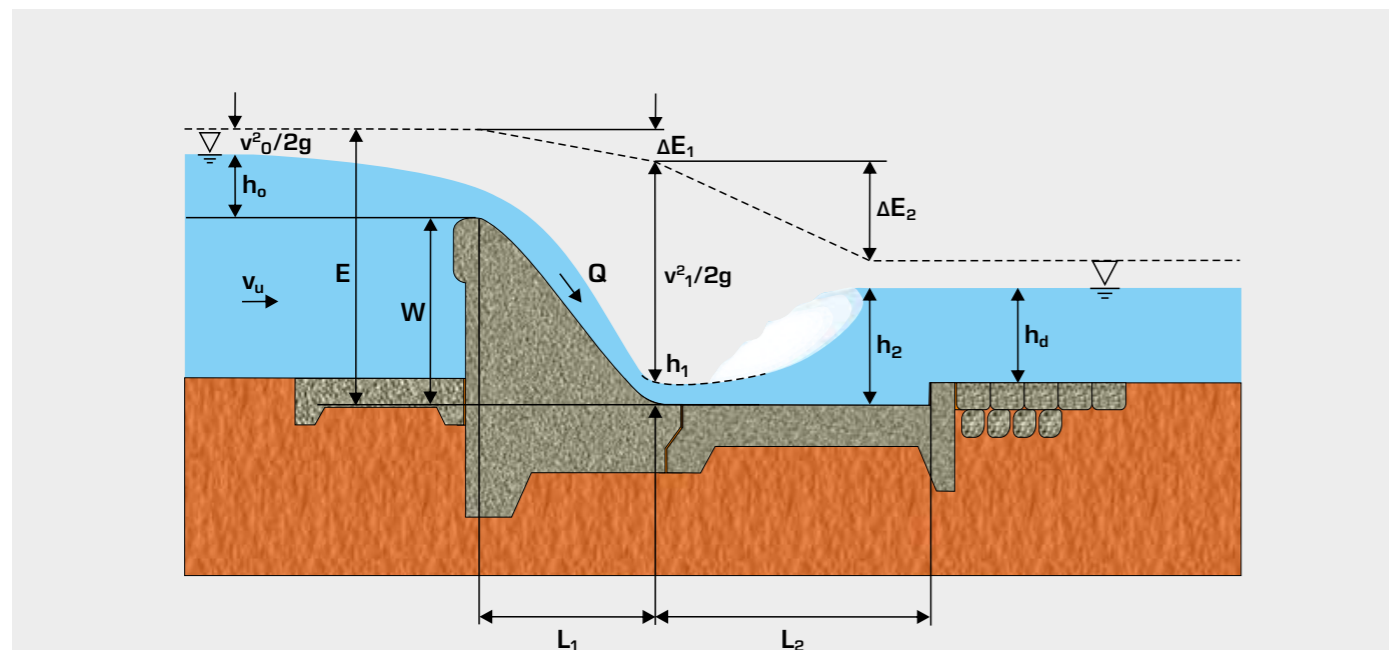
Disipación de energía

La descarga supercrítica suele tener una energía de flujo elevada, que se compone por la energía cinética, necesaria para que el flujo continúe fluyendo, y la energía excedente. La energía excedente puede, entre otras cosas, provocar erosión de la base. Por esta razón, es importante disipar la energía excedente. Esto puede realizarse en el ya citado resalto hidráulico (de forma natural o intencionada en un cuenco de disipación) o en caídas diseñadas especialmente (con forma escalonada o de salto de esquí). En un aliviadero con una instalación en forma de salto de esquí se forma un chorro libre, que salpica en el

aire y ha disipado su energía después de chocar con la base (véase la fotografía inferior de la izquierda).

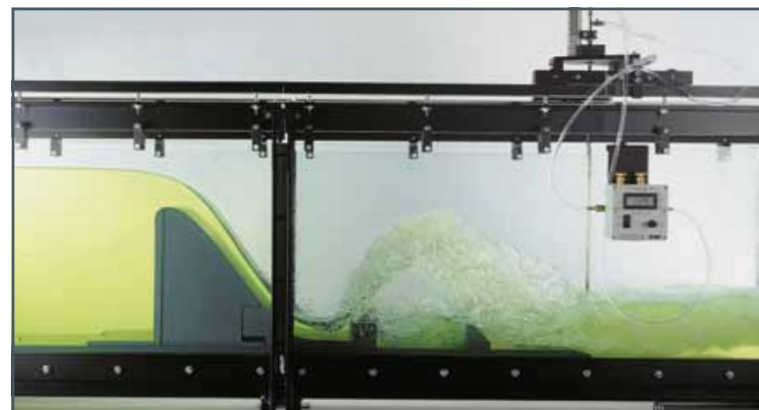
La energía excedente se puede localizar en los lugares siguientes:

- en contracciones de la sección transversal, p.ej., vertederos, compuertas
- en rápidas / pendientes pronunciadas
- al variar la profundidad de descarga por obstáculos



Descarga supercrítica en el vertedero de rebose con disipación de energía posterior en el cuenco de disipación

h_0 altura, v_u velocidad de flujo aguas arriba, W altura del vertedero, E energía específica, Q descarga, h_1 profundidad de descarga mínima, h_2 profundidad de descarga después del resalto hidráulico, h_d profundidad de descarga río abajo, L_1 longitud de cuerpo del vertedero, L_2 longitud de cuenco de disipación, ΔE energía disipada (pérdida de energía específica); **línea de puntos** línea de energía



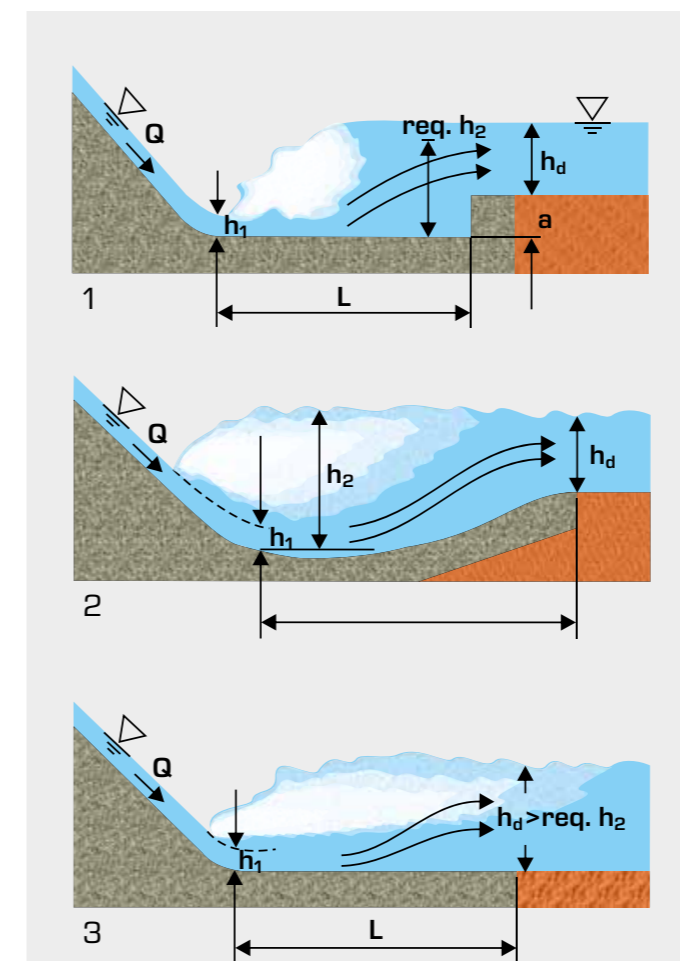
HM 162 con presa-vertedero de perfil Ogee HM 162.32 y umbrales de HM 162.35



Presa-vertedero de perfil Ogee HM 162.32

Los cuencos de disipación tienen las funciones siguientes:

- estabilización del resalto hidráulico en un lugar definido (dependiendo de la profundidad de descarga h o las condiciones del remanso aguas abajo, la posición del resalto hidráulico puede variar)
- además del resalto hidráulico, se produce disipación de energía adicional por elementos estructurales, p.ej., elementos deflectores, umbrales
- protección de la base del canal contra la erosión y la formación de socavación (depresión en forma de embudo o en forma de caldero en la base del canal)
- transformación de energía excedente del agua (cinética y potencial) en energía térmica y acústica; una buena transformación de energía se produce con números de Froude entre 4 y 8.



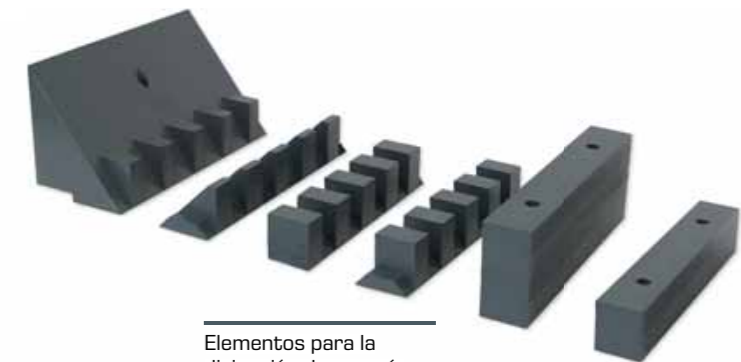
Formas constructivas de cuenco de disipación

- 1 en profundidad, 2 en forma de artesa, 3 sin depresión; a nivel positivo, Q descarga, L longitud del cuenco de disipación, h_1 profundidad de descarga al principio del cuenco de depresión, h_2 profundidad seciente en el resalto hidráulico, h_d profundidad de descarga aguas abajo, **req. h_2** profundidad de descarga requerida teórica

Es importante que el resalto hidráulico no migre del cuenco de disipación a aguas abajo, donde puede producir socavaciones. Para que no suceda se recomienda un ligero remanso. Una medida para el remanso del cuenco de disipación es el **grado de sumergencia**. El grado de sumergencia es la relación de la profundidad de descarga real h respecto a la profundidad de descarga requerida teórica **req. h** .

El cuenco de disipación puede ser más eficiente a través de distintas medidas. Es posible aumentar la sección transversal del flujo o utilizar los llamados bloques de rápida.

En los canales de ensayo GUNT pueden instalarse bloques de rápida y umbrales en el suelo del cuenco de disipación. Estos elementos para la disipación de energía ayudan a la transformación de energía y disipan la energía excedente con mayor rapidez.



Elementos para la disipación de energía HM 162.35

Conocimientos básicos

Flujo en canales abiertos

Estructuras de control

Las estructuras de control son elementos habituales en canales y tienen como fin:

- incremento del nivel de agua, p.ej., para una profundidad navegable suficiente para barcos, utilización de la energía hidráulica, protección de la erosión a través de una velocidad de flujo reducida
- regulación de la descarga
- medición de la descarga

Los **vertederos** y **compuertas** son estructuras de control típicas. La diferencia entre estas es si fluyen por encima (**vertedero**) o fluyen por debajo (**compuerta**). Existen estructuras de control **fijas** y **móviles**. Las compuertas suelen ser móviles y pueden regular el nivel de agua y la descarga. Los posibles movimientos son: elevación, inmersión, giro, inclinación, rodadura o combinaciones de estos movimientos. Los **vertederos** pueden ser fijos o móviles. Los vertederos fijos no pueden regular el nivel de agua pero, sin embargo, ofrecen la ventaja de que no contienen piezas móviles propensas a averías y que requieren mantenimiento. Una forma especial de los vertederos fijos es el vertedero de sifón (véase p. 92).

En el área de las estructuras de control se produce una transición de flujo de subcrítico a supercrítico.

Las estructuras de control reales constan de los componentes siguientes:

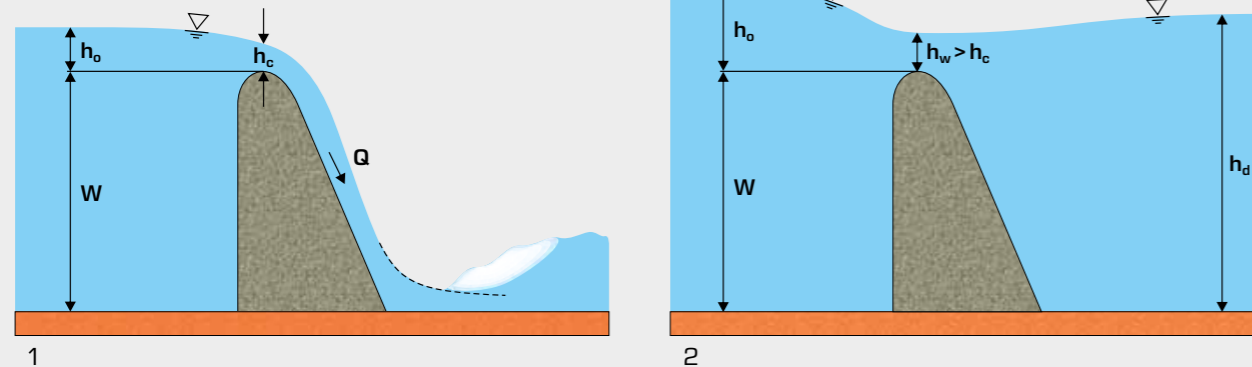
- cuerpo de retención (genera el incremento del nivel de agua); puede ser fijo, móvil o una combinación de ambos
- cuenco de disipación: disipación de energía de la descarga
- afirmado del cauce aguas arriba y aguas abajo, estructuras de conexión (muro lateral del vertedero)
- estructuras para la consistencia ecológica

Condiciones de la caída en el vertedero

En el vertedero puede haber dos **condiciones de la caída**. En el caso de **caída libre**, las condiciones de aguas arriba no se ven afectadas por las de aguas abajo. Se produce una descarga crítica en la cresta del vertedero. La cresta del vertedero está por encima del nivel de aguas abajo. El vertedero se denomina **vertedero de rebose**.

En el **chorro sumergido**, las condiciones de aguas arriba se ven afectadas por las de aguas abajo. El vertedero actúa como un **vertedero sumergido** y está en muchos casos totalmente bajo el agua.

En la **caída libre**, los vertederos eliminan la conexión de nivel de agua aguas arriba con el nivel de agua aguas abajo. Cuando las condiciones de aguas abajo se hayan acumulado en la cresta del vertedero hasta superar la profundidad crítica, se produce un **chorro sumergido**.



1 caída libre, 2 chorro sumergido;

W altura del vertedero, h_o altura, h_c profundidad crítica, Q descarga, h_d profundidad de descarga aguas abajo, h_w profundidad de descarga en la cresta del vertedero

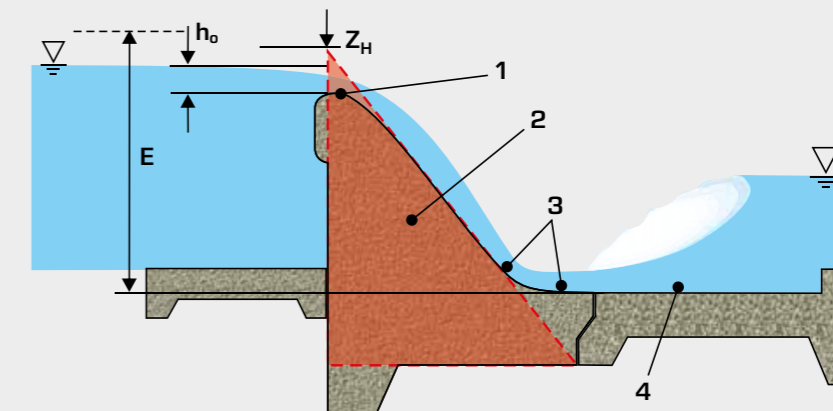
Se pueden diferenciar tres **tipos de vertederos**:

- de cresta delgada
- de perfil Ogee / redondeada (presa de rebose)
- de cresta ancha

Los vertederos de cresta delgada se utilizan preferentemente como vertederos de aforo. Las presas-vertedero de perfil Ogee se suelen utilizar como presas de retención y aliviaderos de crecidas. Y los vertederos de cresta ancha sirven a menudo como umbral y estructura de desbordamiento.

En los canales de ensayo GUNT se tratan estos tres tipos de vertederos.

Estructuras de control: flujo a través de vertederos fijos



Estructura de control simplificada:
presa-vertedero de perfil Ogee con cuenco de disipación

1 cresta del vertedero, 2 cuerpo del vertedero, 3 redondez, 4 cuenco de disipación;
 Z_H nivel máximo de retención, h_o altura, E energía específica;
■ triángulo básico del vertedero como ayuda para el diseño

Los vertederos fijos se suelen utilizar para embalsar ríos. El vertedero consta en sí de un cuerpo de retención. El momento aplicado de la presión de agua es compensado por el peso del muro de contención. Por esta razón, los vertederos se suelen construir de modo que los contornos externos correspondan aproximadamente a un triángulo. El dorso del vertedero puede diseñarse para favorecer al flujo y así lograr la descarga Q más grande posible. Un perfil de descarga hidráulicamente bueno es el llamado **perfil WES**, desarrollado por el Ejército de los EE.UU. en la **Waterways Experimental Station** en Vicksburg, MS, EE.UU.

El diseño del perfil WES no asume una descarga de cálculo. Normalmente se transitan descargas menores como descarga de cálculo sobre el vertedero. El vertedero se optimiza, por tanto, para una descarga ligeramente menor. Para descargas, menores o iguales a la "descarga proyectada", el perfil de descarga permanece estable y se evitan las separaciones del chorro. Con la descarga de cálculo se producen pequeñas depresiones en el perfil del vertedero, pero no suponen ningún peligro para el vertedero.

Conocimientos básicos Flujo en canales abiertos

Estructuras de control: tipos de caída en el vertedero

Existen dos tipos de caída: la llamada **caída sobre cresta delgada** y la **caída hidrodinámica**. En ambos tipos de caída, la condición de la caída puede ser libre o de chorro sumergido.

En la **caída sobre cresta delgada** es importante que la napa se airee para que caiga libremente. Si no hay aireación pueden producirse perturbaciones y, por tanto, una reducción de la descarga.

En la **caída hidrodinámica** del vertedero fijo es importante evitar separaciones del chorro (descarga reducida) y depresiones demasiado grandes (peligro de cavitación).



Caída sobre cresta delgada en el vertedero de aforo

Estructuras de control: cálculo de la descarga en el vertedero

El cálculo de la descarga desempeña un importante papel en el flujo sobre estructuras de control. Para calcular la descarga se utiliza la **ecuación de Poleni**. Para un vertedero con caída libre se aplica:

$$Q = \frac{2}{3} \mu b h_0 \sqrt{2gh_0}$$

μ es un factor, que considera la geometría del vertedero (véase la tabla), b es la anchura de cresta del vertedero, h_0 la altura.

En el chorro sumergido, la ecuación se complementa con un factor de reducción, que se toma de diagramas apropiados.

De la ecuación de Bernoulli podemos observar que la energía específica E se puede calcular a partir de la energía cinética (velocidad de aproximación v_u) y la profundidad de descarga h_u aguas arriba. En muchos casos, la v_u es relativamente pequeña y se desprecia.

En los canales de ensayo GUNT se estudian modelos con flujo normal, es decir, perpendicular a la dirección del flujo. Los vertederos considerados pertenecen todos al grupo de los vertederos fijos.

En la práctica existen también vertederos laterales, que solo se utilizan como aliviaderos. Los vertederos laterales se instalan en paralelo a la dirección del flujo. Los vertederos laterales también son vertederos fijos.

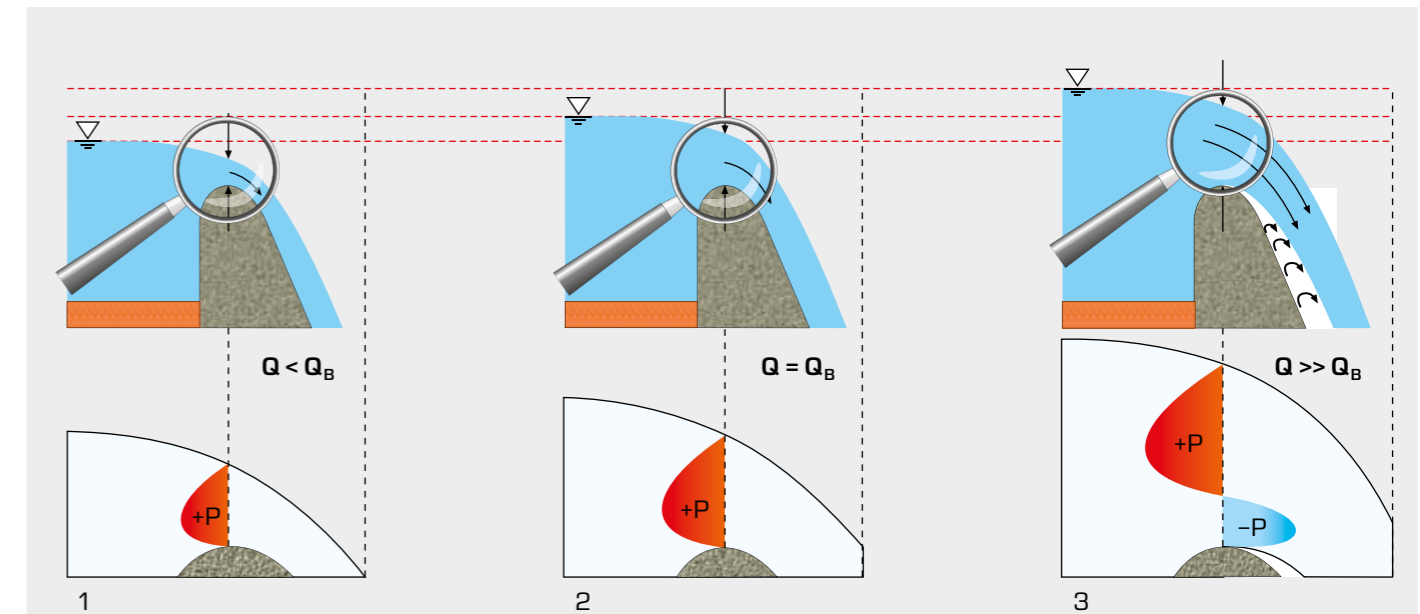
Coeficientes de descarga μ para vertederos con crestas de formas diferentes

	Diseño de la cresta del vertedero	μ
	ancho, de cresta delgada, horizontal	0,49...0,51
	ancho, bordes bien redondeados, horizontal	0,50...0,55
	ancho, cresta del vertedero totalmente redondeada, lograda por compuerta de retención desplazada	0,65...0,73
	de cresta delgada, napa aireada	$\approx 0,64$
	de perfil Ogee, lado de aguas arriba perpendicular y lado de aguas abajo inclinado	0,73...0,75
	en forma de tejado, cresta del vertedero redondeado	0,75...0,79

Estructuras de control: presas-vertedero de perfil Ogee

Las presas-vertederos fijas de perfil Ogee se utilizan preferentemente como presas de retención y aliviaderos de crecidas. Suelen tener un perfil de vertedero que favorece el flujo, p.ej., con el perfil WES.

En la presa-vertedero de perfil Ogee HM162.34 de GUNT se mide la distribución de presión a lo largo del dorso del vertedero y se indica directamente en ocho tubos manométricos.



Caída hidrodinámica en la presa-vertedero de perfil Ogee, distribución de presión en la cresta del vertedero con descarga diferente

1 napa sobre el vertedero, 2 el perfil del vertedero corresponde aproximadamente al contorno de la napa libre, 3 la napa podría despegarse del cuerpo de presa; Q descarga, Q_B descarga de cálculo



Distribución de presión en la presa-vertedero de perfil Ogee HM162.34

Conocimientos básicos
Flujo en canales abiertos



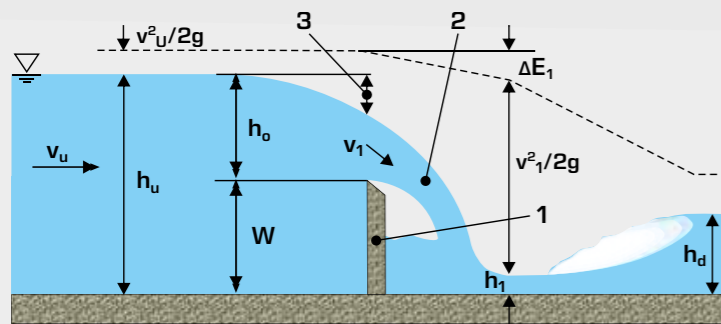
Estructuras de control: vertederos de cresta delgada

También en el vertedero de cresta delgada hay una caída libre y un chorro sumergido. Para la descarga óptima en el vertedero de cresta delgada es importante airear la napa. En la parte superior e inferior de la napa aireada hay presión ambiente.

Las variables típicas son la altura del vertedero W , la altura h_o sobre la cresta del vertedero aguas arriba y la profundidad de descarga h_d aguas abajo. Junto con el ancho del vertedero b , se introducen estas variables en la ecuación de Poleni (p. 88). Algunas variables están contenidas indirectamente en coeficientes o factores de reducción.

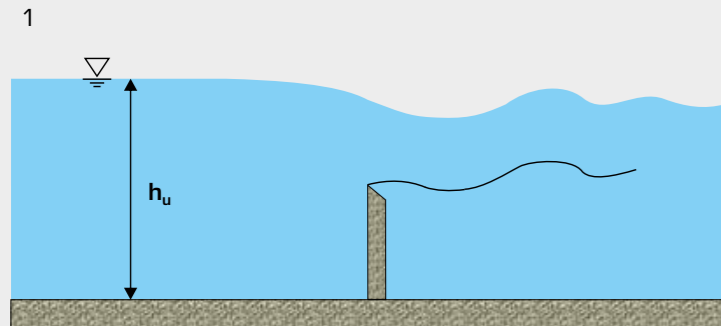
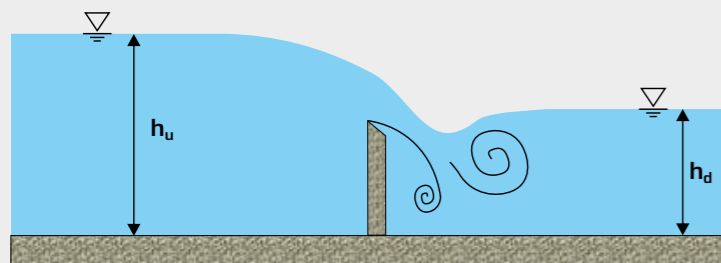


HM 162.30
Juego de vertederos de cresta delgada, cuatro tipos



Caída libre aireada en vertedero de cresta delgada

- 1 vertedero, 2 napa, 3 depresión;
- v_u velocidad aguas arriba,
- v_1 velocidad en la napa,
- h_d profundidad de descarga aguas abajo,
- h_o altura,
- h_u profundidad de descarga aguas arriba,
- W altura del vertedero



Chorro sumergido

- 1 en el vertedero de cresta delgada parcialmente sumergida,
- 2 en el vertedero de cresta delgada totalmente sumergido (descarga ondulada)

Estructuras de control: vertederos de cresta ancha

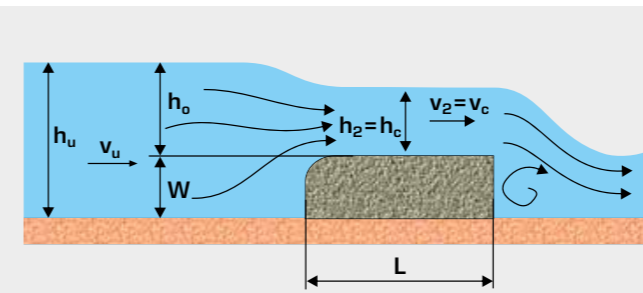
Los vertederos de cresta ancha son estructuras de desbordamiento, que se instalan en aguas corrientes en las que la descarga varía levemente y solo se desea un nivel máximo de retención más bien pequeño. Pueden servir de subestructura para una estructura de control móvil.

Los vertederos de cresta ancha se caracterizan porque una pequeña sección de descarga prácticamente uniforme con profundidad crítica se produce en la cresta del vertedero (véase ilustración). En esta sección se genera una distribución de presión hidrostática y las líneas de corriente se extienden casi horizontalmente. Estas condiciones se aplican siempre que la relación de la altura respecto a la longitud del vertedero h_o/L esté entre 0,08 y 0,5. Los vertederos de cresta ancha con estas dimensiones también pueden utilizarse como **vertederos de aforo**.

Cuando $h_o/L < 0,08$, las pérdidas por fricción no pueden ignorarse y el cuerpo del vertedero es demasiado largo para servir de vertedero de aforo. Cuando $h_o/L > 0,5$, es decir, con cuerpos del vertedero cortos, las líneas de corriente no se extienden horizontalmente y la distribución de presión no es hidrostática, de modo que no podemos utilizar los métodos de cálculo aquí presentados.

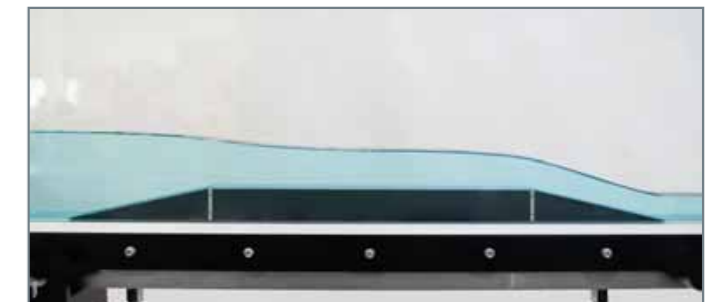
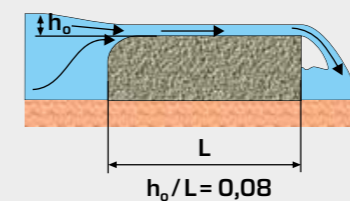
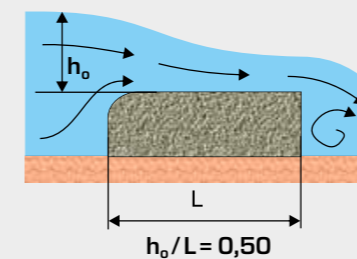
En la actualidad, por motivos ecológicos, se instalan raras veces vertederos de cresta ancha como umbral en un río. En su lugar se monta una rampa para que los peces y otros animales acuáticos puedan nadar río arriba.

Los canales de ensayo GUNT permiten el estudio de distintos vertederos de cresta ancha y las descargas correspondientes Q .



Vertedero de cresta ancha

- v_u velocidad de flujo aguas arriba,
- h_u profundidad de descarga aguas arriba,
- W altura del vertedero,
- h_c profundidad crítica,
- L longitud del vertedero;
- Las flechas indican las líneas de corriente



Umbral HM 162.44



Vertedero Crump HM 162.33



Vertedero de cresta ancha HM 162.31

Conocimientos básicos

Flujo en canales abiertos

Estructuras de control: vertedero de sifón

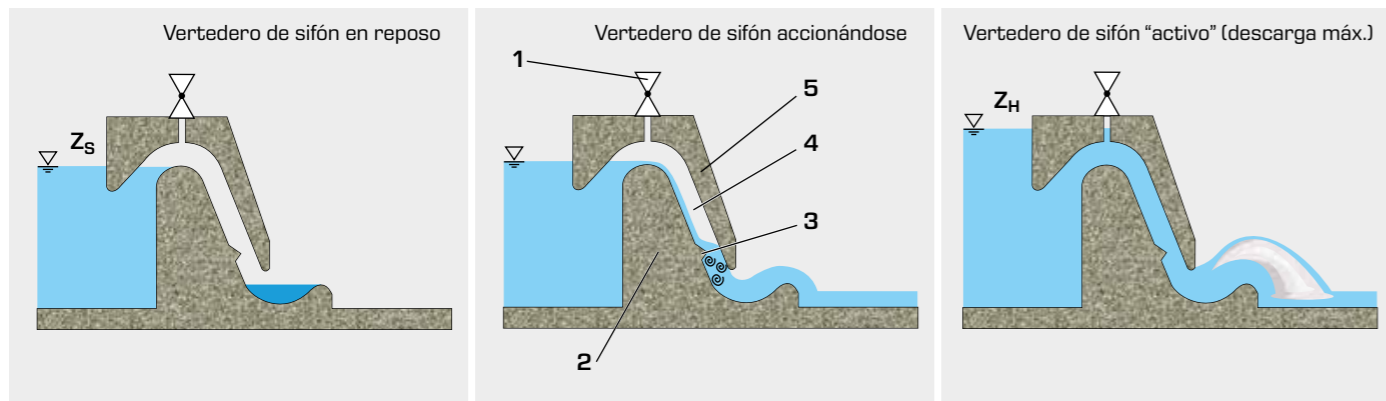
El vertedero de sifón forma parte de los vertederos fijos. En las ilustraciones se representa el principio hidráulico del sifón, p.ej. cómo se utiliza como aliviadero de crecidas.

Cuando el nivel de agua del embalse aumenta justo por encima de la cresta del vertedero del cuerpo de retención, el sifón se acciona y se produce brevemente una caída libre. Si el nivel de agua aumenta ligeramente, es decir, con un ligero aumento de la descarga, el deflector desvía el chorro de agua hacia la cubierta del sifón. Esto provoca una evacuación en el tubo del sifón, de modo que se produce una descarga de presión en el tubo con flujo total. Esta descarga en presión tiene una alta capacidad de descarga, que apenas aumenta si el nivel de agua sigue aumentando.

Si el nivel de agua del embalse vuelve a bajar, quedando por debajo del borde del labio de entrada, se aspira aire en el sifón y se airea el sifón. Esto detiene bruscamente el flujo de agua.

A través de una instalación adicional para la aireación, la descarga puede detenerse en cualquier momento. Los vertederos de sifón GUNT tienen una aireación para poder comparar la función o la capacidad de descarga del vertedero de sifón con y sin aireación.

Los vertederos de sifón solo se pueden ajustar de forma limitada y no pueden sobrecargarse. Antes solían instalarse como aliviaderos en presas debido a su gran capacidad de descarga específica.

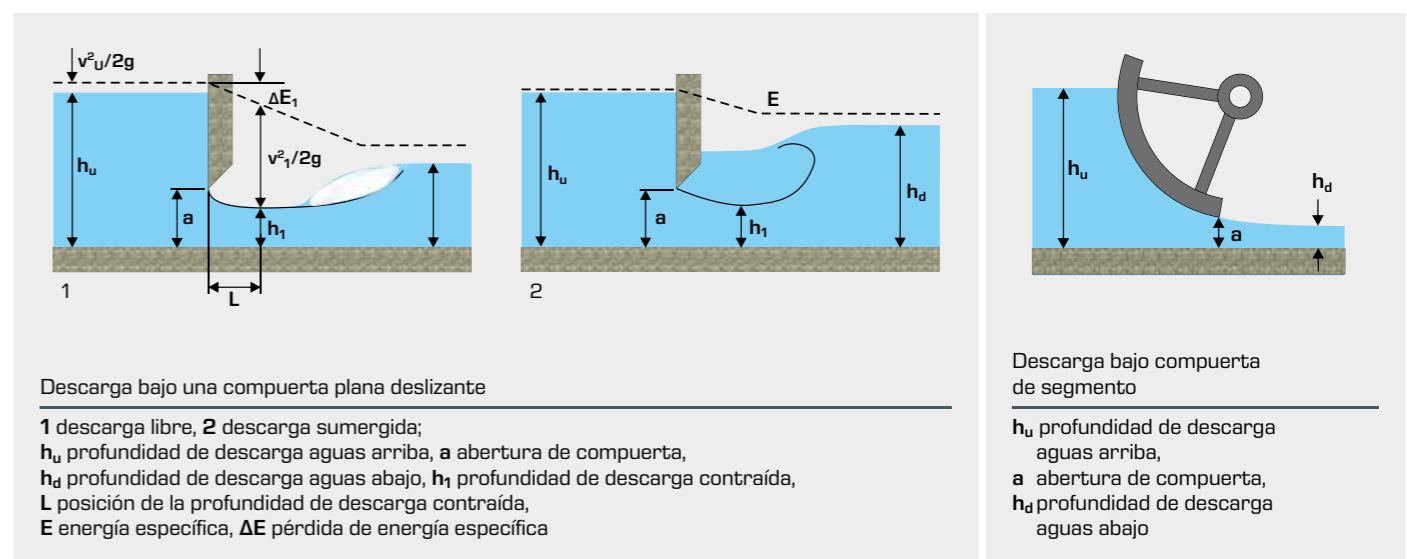


Principio del vertedero de sifón

1 aireación controlable, 2 cuerpo del vertedero, 3 deflector, 4 tubo del sifón, 5 cubierta del sifón;
Z_s nivel máximo de retención, Z_H nivel máximo de retención mayor

Vertedero
de sifón
HM 162.36

Estructuras de control: flujo bajo compuertas



Descarga bajo una compuerta plana deslizante

1 descarga libre, 2 descarga sumergida;
h_u profundidad de descarga aguas arriba, a abertura de compuerta, h_d profundidad de descarga aguas abajo, h₁ profundidad de descarga contraída, L posición de la profundidad de descarga contraída, E energía específica, ΔE pérdida de energía específica

Descarga bajo compuerta de segmento

h_u profundidad de descarga aguas arriba, a abertura de compuerta, h_d profundidad de descarga aguas abajo

Al igual que con los vertederos de desbordamiento, en las compuertas también hay **descargas libres** y **sumergidas**. La descarga produce la contracción del chorro, que se denomina "vena contracta" (profundidad de descarga mínima h₁). La **descarga libre** prevalece siempre que la descarga fluya bajo la compuerta sin perturbaciones y no se produzcan remansos desde aguas abajo de la compuerta. En la descarga libre hay una descarga supercrítica directamente después de la compuerta.

Al igual que con el flujo sobre vertederos, la descarga libre Q se calcula a partir de la ecuación de Bernoulli, el principio del momento lineal y la ecuación de continuidad, obteniendo

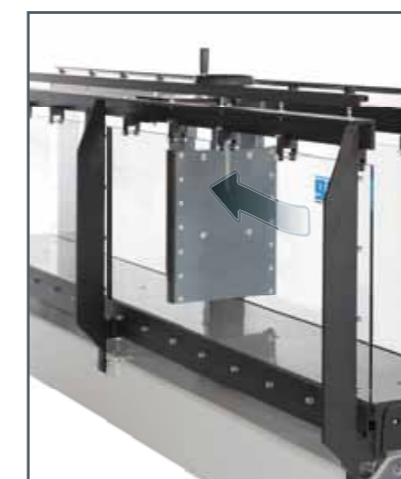
$$Q = \mu b a \sqrt{2gh_u}$$

con μ = coeficiente de descarga, b = anchura de la compuerta, a = abertura de la compuerta.

Las compuertas son estructuras de control móviles, es decir, la abertura de la compuerta a y, por tanto, la descarga Q se modifica y se adapta a las necesidades reales. En la práctica hay, por tanto, campos característicos que muestran la descarga Q (las profundidades de descarga aguas arriba y aguas abajo h_u y h_d y la abertura de la compuerta a vienen dadas).

Una compuerta muy utilizada en la práctica es la compuerta de segmento circular para el control de la descarga. La compuerta de segmento se instala a menudo sobre la cresta del vertedero de una estructura de control. El flujo no solo pasa por debajo de la compuerta de segmento, sino que también puede pasar por encima, si la compuerta de segmento está montada dentro de un canal (vertedero radial).

Los canales de ensayo GUNT permiten el montaje y el estudio de una compuerta plana deslizante plana y una compuerta de segmento.



Compuerta plana deslizante HM 162.29



Compuerta de segmento HM 162.40

Conocimientos básicos

Flujo en canales abiertos

Obra de paso

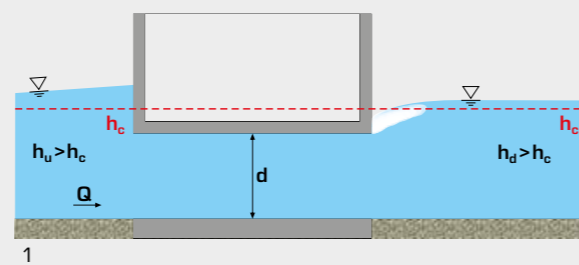
Las obras de paso pertenecen a las estructuras de cruce en aguas corrientes y permiten el paso de agua. Se puede tratar de una tubería, tendida por debajo de una calle y que permite el cruce del canal.

La obra de paso puede tener un flujo parcial o total, dependiendo de la descarga producida. La obra de paso con flujo parcial con superficie libre es tratada como un canal. Mientras que la obra de paso con flujo total y la obra de paso en la que la entrada está totalmente sumergida forman parte de las estructuras de control. Estas limitan la descarga. Puede darse también la combinación de ambas, de modo que la obra de paso tiene en parte flujo parcial y en parte flujo total.

Por diferentes motivos, las obras de paso no son ideales desde el punto de vista hidráulico: provocan pérdidas de flujo, son propensas a "atascos" (basura, sedimentos), pueden generar socavaciones a la entrada y la salida y sus dimensiones, en el caso de inundaciones, suelen ser demasiado pequeñas. Además, para los animales acuáticos son difíciles de atravesar. Desde el punto de vista hidráulico, los puentes son la mejor alternativa, sin embargo, son mucho más caros.

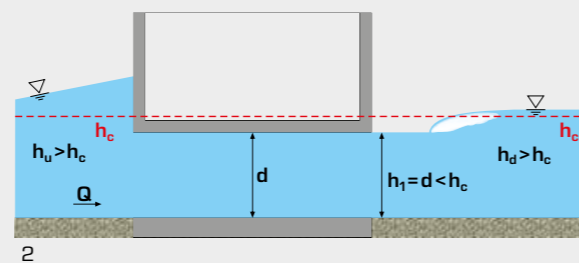
Tipo de descarga 1

obra de paso con flujo total, aguas arriba y aguas abajo de la obra de paso $Fr < 1$; h_u profundidad de descarga aguas arriba, h_c profundidad crítica, Q descarga, d diámetro de la obra de paso, h_d profundidad de descarga aguas abajo



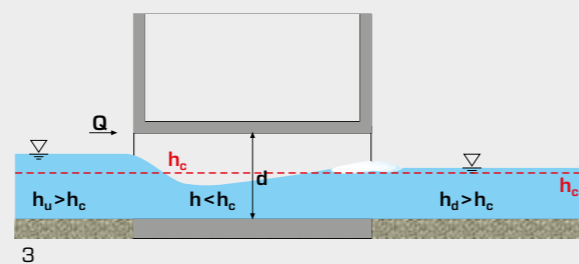
Tipo de descarga 2

obra de paso con flujo total, aguas arriba de la obra de paso $Fr < 1$, inmediatamente aguas abajo de la obra de paso $Fr > 1$



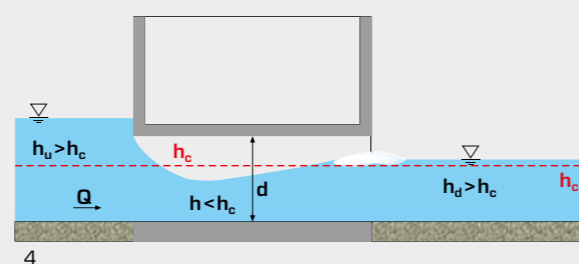
Tipo de descarga 3

obra de paso con flujo parcial, aquí con transición de flujo a la entrada y después de la obra de paso; también posible: descarga continua con $Fr < 1$ o $Fr > 1$



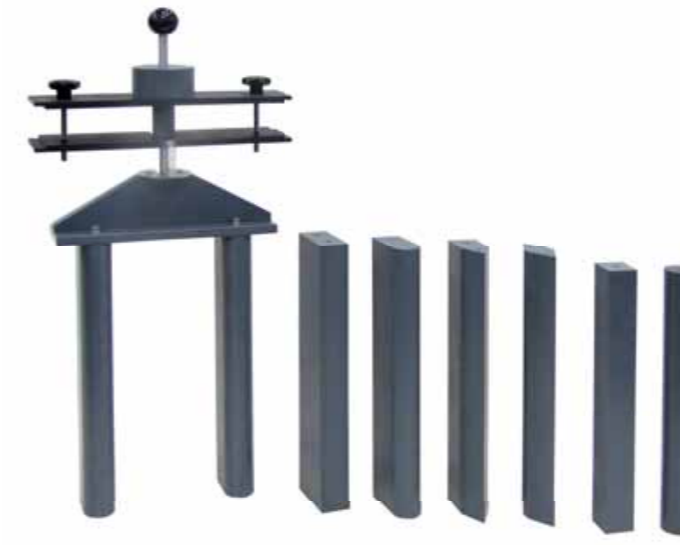
Tipo de descarga 4

obra de paso sumergida con control de la descarga; transición de flujo también posible en la obra de paso, de modo que la obra de paso tenga a veces un flujo total

Obra de paso
HM162.45

Pérdidas locales en canales

Las pérdidas locales se producen en modificaciones en la sección transversal (constricción, umbrales, canales para aforar), modificaciones de dirección y obstáculos. Los obstáculos en canales son, p.ej., pilares para puentes o vertederos. Los pilares estrechan la sección transversal del flujo. Debido a esto se pueden producir remansos.



Juego de pilares HM162.46

Desde el punto de vista hidráulico hay cuatro casos generales para pilares, que clasifican el comportamiento de desagüe sin obstáculos, es decir, como descarga normal. Los cuatro casos generales son:

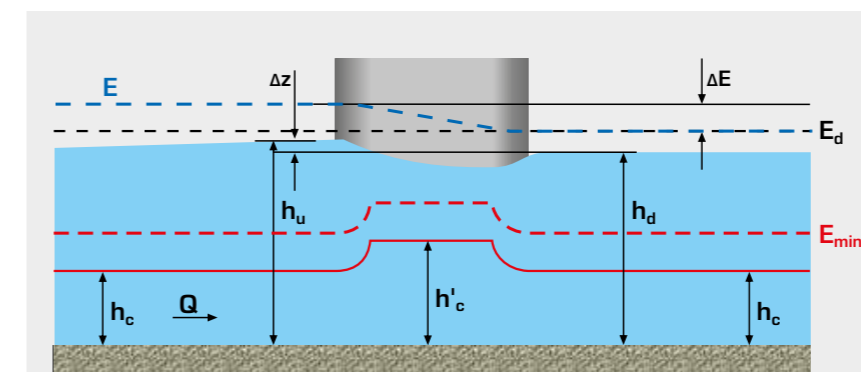
- descarga subcrítica con constricción de la sección transversal escasa o considerable
- descarga supercrítica con constricción de la sección transversal escasa o considerable

Se produce un remanso no insignificante y posiblemente una transición de flujo delante del pilar cuando la energía específica E de la descarga Q no perturbada es menor que la energía específica mínima E_{min} necesaria, que garantiza la descarga Q total. A medida que la anchura del caudal b_{rest} del canal disminuye a través de los obstáculos, la E_{min} aumenta (véanse las ilustraciones).

Para los canales rectangulares con una sección transversal ancha se aplica

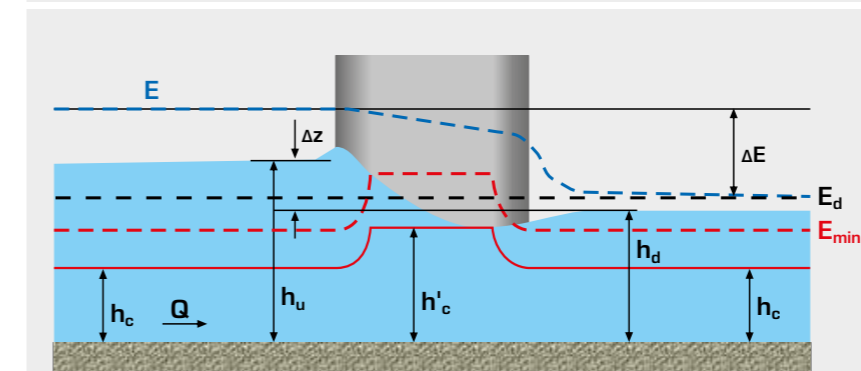
$$E_{min} = 1,5^3 \sqrt{\frac{Q^2}{gb^2_{rest}}}$$

Los pilares con perfil rectangular, con perfil redondeado y perfil terminado en punta se estudian en los canales de ensayo GUNT.



Descarga en el pilar redondeado sin transición de flujo

E energía específica con pilar,
 Q descarga,
 E_d energía específica sin perturbaciones,
 E_{min} energía específica mínima requerida,
 h_d profundidad de descarga aguas abajo (descarga normal),
 h_u profundidad de descarga aguas arriba con pilar,
 h_c profundidad crítica sin perturbaciones,
 h'_c profundidad crítica con pilar,
 Δz acumulación debida al pilar,
 ΔE pérdida de energía específica



Descarga en el pilar redondeado con transición de flujo

Conocimientos básicos

Flujo en canales abiertos

Métodos para la medición de la descarga

Los dos procedimientos más comunes para determinar la descarga de un canal abierto son los **canales para aforar** y los **vertederos de aforo**. En ambos procedimientos existe una dependencia fija entre la profundidad de descarga h y la descarga Q .

Canales para aforar

Los **canales de Venturi** como canales para aforar son canales con una forma especial con una contracción lateral definida y, a veces, también con un fondo perfilado. La contracción contiene la descarga Q . Esta contención de la descarga asegura una descarga subcrítica en el canal. En la contracción se produce la aceleración (incluyendo la transición de flujo) de descarga subcrítica a supercrítica. En la sección transversal más estrecha tiene lugar la descarga crítica. En la expansión del canal de Venturi se produce el resalto hidráulico. La descarga Q se calcula a partir de la profundidad de descarga h_u aguas arriba.

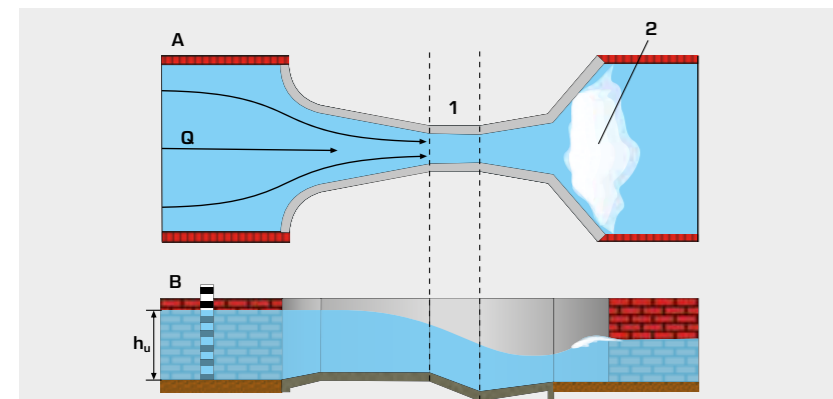
Los canales de Venturi GUNT tienen un fondo plano.

Para que la medición en el canal de Venturi no se distorsione, la descarga debe ser libre. La profundidad de descarga h_u aguas arriba no puede verse afectada por las condiciones de aguas abajo.



Canal Parshall
HM162.55

Los **canales Parshall** son canales de Venturi con un fondo perfilado. Las relaciones de contracción y expansión están definidas. Los canales Parshall están disponibles comercialmente como componentes completos, incluida una curva de descarga (descarga Q en función de la profundidad de descarga h_u aguas arriba). En Norteamérica son muy comunes.



A vista en planta del canal Parshall o Venturi, B vista lateral del canal Parshall;
1 sección transversal más estrecha, 2 resalto hidráulico;
 h_u profundidad de descarga aguas arriba, Q descarga



Canal de Venturi
HM162.51



Canal trapecial HM162.63

Los **canales trapeciales** pertenecen también a los canales para aforar. La sección transversal del flujo es triangular o trapecial con paredes lisas. En comparación con los canales Parshall, suelen tener una pérdida de carga de presión menor con la misma descarga y son más apropiados para descargas pequeñas.

Los canales para aforar se instalan principalmente en plantas depuradoras porque son idóneos para aguas contaminadas. Además pueden mantenerse fácilmente.

Vertederos de aforo

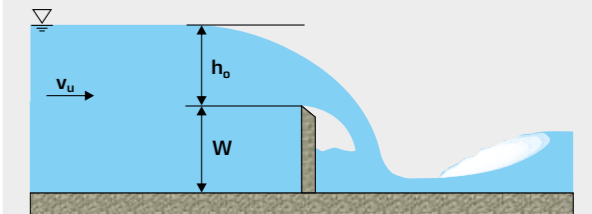
Los vertederos de aforo suelen ser de cresta delgada. Tienen un diseño sencillo, necesitan poco espacio y son relativamente fáciles de construir.

Los vertederos de aforo se instalan para determinar la descarga Q . La cantidad se mide a través de la detección de la altura h_o antes del vertedero. Entre el punto de medición y el vertedero debe haber una distancia mínima de $3h_o$. Para convertir la altura h_o en la descarga Q hay ecuaciones de aproximación que tienen en cuenta la geometría del vertedero de aforo y el coeficiente de descarga según Poleni.

Los vertederos de aforo siempre tienen caída libre.

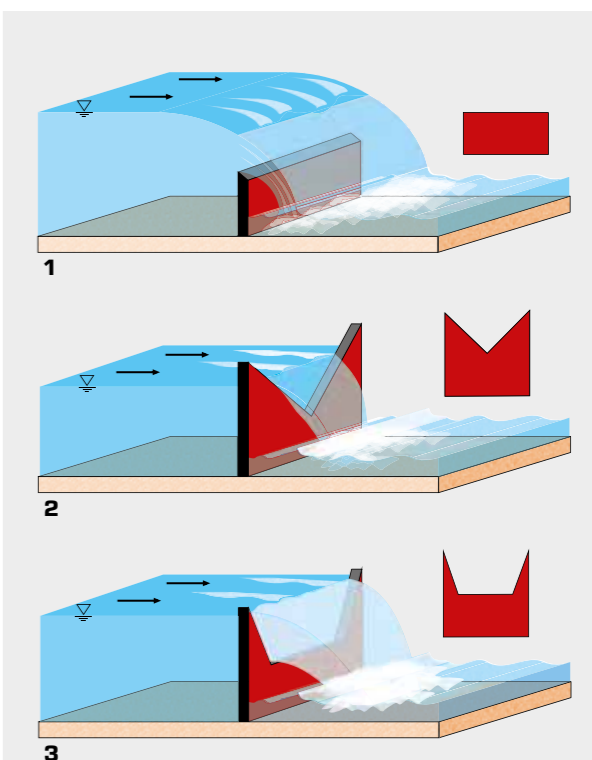
Los vertederos de cresta delgada tienen distintas geometrías, p. ej.:

- **vertedero rectangular según Rehbock**
uso con descargas relativamente uniformes de más de $50\text{m}^3/\text{h}$, pero con una precisión reducida en la parte inferior del área de medición. En el vertedero rectangular debe garantizarse la aireación.
- **vertedero triangular según Thomson**
uso con descargas variables ($0,75\text{...}240\text{m}^3/\text{h}$); buena precisión de medición para caudales más pequeños
- **vertedero trapecial según Cipoletti**
uso con descargas relativamente uniformes de más de $125\text{m}^3/\text{h}$.



Caída libre aireada en vertedero de cresta delgada

v_u velocidad aguas arriba,
 h_o altura,
 W altura del vertedero



Vista lateral del desbordamiento de vertederos de aforo típicos

- 1 vertedero rectangular sin contracción,
- 2 vertedero triangular según Thomson,
- 3 vertedero trapecial según Cipoletti



Juego de vertederos de cresta delgada, HM162.30

Conocimientos básicos

Flujo en canales abiertos

Flujo no estacionario: vibraciones inducidas por el flujo

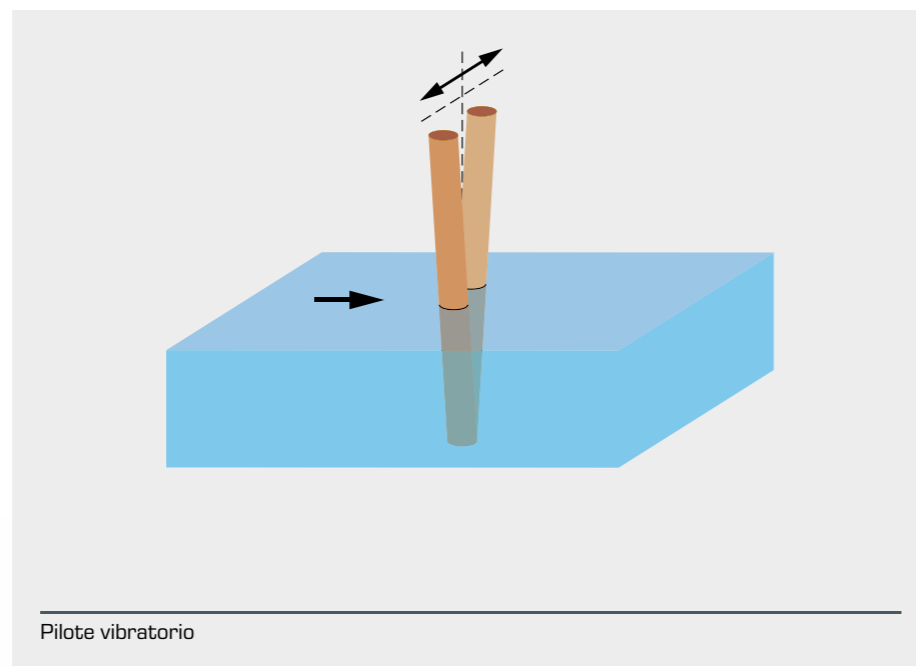
Los muelles o las plataformas de perforación se suelen encontrar sobre pilotes en el agua. El agua fluyente ejerce fuerzas sobre la parte de los pilotes que se encuentra en el agua y puede desencadenar vibraciones. Diferenciamos entre **vibraciones inducidas por vórtice** y **vibraciones inducidas por flujo**. Es importante ocuparse de estas fuerzas y las cargas que producen, ya que pueden provocar fallos de componentes.

Las vibraciones se producen por la interacción entre el fluido en movimiento y el pilote. Por ejemplo, en el flujo alrededor de un pilote puede formarse una calle de vórtices de Kármán. La separación de estos vórtices provoca una modificación en la dirección del flujo. En el peor de los casos, la frecuencia de separación del vórtice corresponde a la frecuencia propia del pilote.

El modelo GUNT "pilotes vibratorios" HM162.61 permite observar un solo pilote vibratorio. Además hay dos pilotes paralelos, colocados transversalmente respecto a la dirección del flujo y que comienzan a vibrar por el flujo. La distancia de los pilotes puede modificarse. Cuando la distancia es demasiado pequeña se producen oscilaciones acopladas entre los dos pilotes.



Pilotes vibratorios HM 162.61



Pilote vibratorio

Transporte de sedimentos

En prácticamente todos los canales abiertos, además del agua fluyente, hay **transporte de sedimentos**, que influye en el comportamiento del flujo. El transporte de sedimentos consta de **transporte de sedimentos en suspensión** y **transporte de fondo (o depósitos arrastrados por la corriente)**. Las materias en suspensión son materias sólidas suspendidas en el agua y sin contacto con el fondo. El transporte de fondo, por el

contrario, son materias sólidas que se arrastran a lo largo del fondo. Para el comportamiento de desagüe en canales abiertos, el transporte de fondo es el componente fundamental. Los sedimentos que se depositan ("sedimentación") o transportan (erosión o formación de socavación) pueden, p.ej., modificar la sección transversal del flujo o los perfiles de la superficie del agua. El transporte de sedimentos modifica la estructura

del fondo (formación de ripples o dunas, modificación de la rugosidad).

Con una descarga normal, además de la ecuación que ya conocemos, es necesario tener en cuenta el equilibrio de transporte en el volumen de control – ¿se vuelve a alimentar la misma cantidad de sedimentos que deja el volumen de control?

En los canales de ensayo GUNT se demuestra el transporte de sedimentos con arena. Junto al alimentador de sedimentos a la entrada del canal de ensayo se instala una trampa de sedimentos al final del canal de ensayo. Dependiendo de la velocidad de flujo, se pueden producir ripples u observar una duna migratoria. Junto con otros modelos, es posible observar la sedimentación en un vertedero o la formación de socavación en el cuenco de disipación.

En principio, el tema del transporte de sedimentos se estudia en profundidad en distintos bancos de ensayo individuales, p.ej., con HM 140 o HM 168.



Alimentador de sedimentos HM 162.73



Trampa de sedimentos HM 162.72 a la salida de HM 162



Depósitos de sedimentos en espigones



Sedimentaciones en el Rin



Conocimientos básicos

Flujo en canales abiertos

Flujo no estacionario: olas

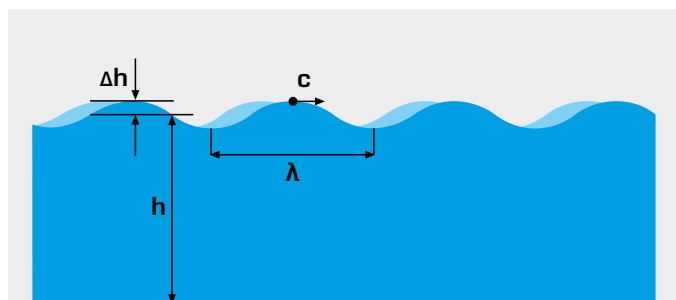
La superficie libre del agua es "deformada" (olas) por el aire. Existe una gran variedad de olas en la naturaleza (longitudes de ondas largas o cortas, que rompen o lisas, etc.). Las olas naturales son irregulares, p.ej., una ola plana sigue a una alta (amplitud). Independientemente de las olas generadas por el viento, hay ondas superficiales debidas a una perturbación, olas positivas y olas negativas y tsunamis, generados por una elevación del agua, p.ej., producido por un terremoto.

Las olas transportan energía pero no masa. Cuando una ola entra en agua poco profunda, p.ej., cerca de la playa, esta es frenada. El seno de la ola se frena con mayor intensidad que la cresta de la ola. Por ello, la cresta de la ola sobrepasa al seno de la ola y las olas rompen.

El estudio de la formación y efecto de las olas desempeña un importante papel en la navegación, la protección costera y el diseño de instalaciones en alta mar (parques eólicos, plataformas de perforación). En la protección costera se trata de reducir la fuerza destructora de las olas y el arrastre de sedimentos.

El generador de olas GUNT produce olas armónicas periódicas en los canales de ensayo GUNT. Se puede observar, p.ej., la reflexión de olas en el extremo del canal. Junto con las distintas simulaciones de playa es posible observar y comparar el comportamiento de las mismas olas en distintos fondos.

La acumulación en los pilares que están, p.ej., colocados en dársenas o que pertenecen a una instalación en alta mar, se puede observar con el accesorio de pilares HM 162.46.



Onda periódica

Δh amplitud, h profundidad media,
 c velocidad de propagación de la onda, λ longitud de onda

Periodo de una ola: $T = \frac{1}{f} = \frac{\lambda}{c}$

	Aguas poco profundas	Aguas profundas
Longitud de onda	$\lambda/h > 20$	$\lambda/h < 2$
Velocidad de onda	$c = \sqrt{gh}$	$c = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}}$
Senda de partículas	lineal	circular



Generador de olas HM 162.41



Juego de playas HM 162.80 (playa lisa, playa permeable y playa rugosa)