

**XXIII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
CARTAGENA DE INDIAS COLOMBIA, SEPTIEMBRE 2008**

**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LAS PRESAS DE ESCOLLERA
ANTE UN VERTIDO POR CORONACIÓN**

Cristina Lechuga, Miguel Ángel Toledo y Eugenio Oñate

CEDEX, UPM, CIMNE (España)

Cristina.Lechuga@cedex.es; matoledo@caminos.upm.es; onate@cimne.upc.edu

RESUMEN:

El objetivo del estudio es caracterizar el inicio y proceso de rotura de las presas de escollera debido a un sobrevertido y desarrollar un sistema informático para su análisis y seguimiento. El inicio y proceso de rotura se está caracterizando mediante la realización de ensayos en modelo físico a diversas escalas. El método de cálculo se basa en la combinación de métodos avanzados de elementos finitos y de partículas utilizando una formulación lagrangiana para modelar tanto la cinemática de las partículas del fluido como la deformación de la estructura. La validación del método se hará comparando sus resultados con los del análisis experimental de modelos de presas a escala de distinto tamaño. El nuevo método de cálculo permitirá analizar con detalle el estado tenso-deformacional de la presa y su posible rotura bajo la acción del flujo de agua durante un sobrevertido teniendo en cuenta la no linealidad geométrica y mecánica de la estructura, así como efectos acoplados de interacción fluido-estructura. El método de cálculo propuesto será una herramienta de gran utilidad para evaluar con precisión la estabilidad y, por tanto, la seguridad de una presa de escollera en situación de avenida extraordinaria que origine un sobrevertido.

ABSTRACT:

The objective of the project is to develop an original computational method for the stability analysis and the follow up of the failure process of rock-fill embankment dams due to an overspill. The onset and evolution of failure is being modelled by means of experimental tests on physical models at different scales. The new computational method is based on the combination of advanced finite element methods and particle techniques. A Lagrangian description is used to model both the cinematics of the flow particles and the deformation of the structure. The analysis method will be validated by comparing its results with those of experimental tests in scale models of dams. The method will allow to study in detail the stress-strain state of the dam and its possible instability and failure under water forces during an overspill accounting for geometrical and material non linearities in the structure and coupled fluid-structure interaction effects. The new computational method will be a useful tool for the accurate evaluation of the stability and the safety of a rock-fill embankment dam under unusual water loads, generally not considered in the design stage of such as constructions.

PALABRAS CLAVES:

Presas, escollera, vertido

INTRODUCCIÓN

Las presas de materiales sueltos en general, y las presas de escollera particularmente, son muy vulnerables frente al paso de agua sobre su coronación (sobrevertidos) como consecuencia de la insuficiencia de sus aliviaderos. Los criterios de seguridad hidrológica han sido revisados en España resultando más restrictivos en la actualidad, lo que está obligando a la comunidad científico-técnica a realizar un esfuerzo por comprender, en primer lugar, un fenómeno que es complejo para poder obtener conclusiones de orden práctico que permitan analizar con mayor rigor el estado real de la seguridad de las presas y definir criterios para proyectar protecciones seguras y económicamente viables. Como consecuencia de ello será preciso realizar actuaciones en gran número de presas existentes. La racionalidad de dichas actuaciones está actualmente limitada por la falta de un conocimiento preciso del proceso de rotura, y de un método de modelación numérica que permita el tratamiento integral de dicho proceso. Ello se traduce en una gran incertidumbre al analizar las posibles consecuencias de un sobrevertido accidental y en una ineficiencia económica al plantear la solución que, con un adecuado conocimiento del problema, y disponiendo de un método adecuado de modelación matemática y numérica, podría en muchas ocasiones resolverse con inversiones muy moderadas. Por otra parte, se están elaborando en España planes de emergencia que definen la forma de actuar en caso de rotura de una presa, pero el desconocimiento del proceso de rotura impide realizar hipótesis más ajustadas a la realidad de cada caso, lo que limita severamente las posibilidades de una planificación eficaz y, en muchas ocasiones, lleva a generar una alarma injustificada. El conocimiento del fenómeno y la disponibilidad de una herramienta de análisis numérico permitirían racionalizar la enorme inversión necesaria para implantar los planes de emergencia de las presas de escollera.

Debe tenerse en cuenta que el sobrevertido es la causa más frecuente de rotura de las presas de materiales sueltos, siendo la causa principal en uno de cada tres casos, y participando en la mitad de los mismos. Como caso más cercano de presa importante cuya rotura se ha producido por sobrevertido debemos recordar el caso de la presa de Tous, en Valencia (20 Octubre de 1982). Este es el caso más reciente de rotura grave con víctimas en España.

La rotura de la presa se debe fundamentalmente al efecto de las fuerzas hidrodinámicas sobre la escollera del espaldón, lo que se traduce en dos efectos de distinta naturaleza: arrastre de partículas de escollera, con el subsiguiente proceso erosivo, y pérdida de estabilidad de una parte del espaldón por deslizamiento en masa. En realidad, durante el proceso de rotura se suceden fases en las que predomina uno u otro mecanismo de rotura. Una vez que se ha producido una pérdida significativa de material del espaldón de escollera, el elemento impermeabilizante puede fallar mecánicamente por falta de apoyo, tanto si se trata de una pantalla, de hormigón o asfáltica, como si se trata de un núcleo arcilloso. En este último caso, puede además influir en el proceso la erosión del material cohesivo, generalmente mucho más lenta que la del material granular del espaldón.

En el Centro de Estudios Hidrográficos del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (en adelante CEDEX) se está estudiando el comportamiento de las presas de materiales sueltos ante vertidos por coronación a través de un convenio suscrito entre el CEDEX y el Ministerio de Medio Ambiente.

Asimismo, el CEDEX, la Universidad Politécnica de Madrid (en adelante UPM) y el Internacional Center for Numerical Methods in Engineering (en adelante CIMNE) han resultado adjudicatarios de un Proyecto de Investigación del Plan Nacional de I+D+i del Ministerio de Educación y Ciencia para el “Desarrollo de un método para el estudio del proceso de rotura de presas de escollera por sobrevertido combinando técnicas de elementos finitos y partículas” (XPRES) con una duración de tres años.

OBJETIVOS DEL PROYECTO

Los objetivos generales del proyecto son dos:

- a) Caracterizar el inicio y proceso de la rotura y,
- b) Desarrollar y validar un nuevo método de cálculo general.

En este proyecto se persiguen los siguientes objetivos concretos:

1. Definición de criterios de seguridad hidrológica de presas.
2. Definición de criterios de valoración del efecto de escala en la modelación física de la rotura de presas de escollera por sobrevertido. Para ello se están realizando ensayos en modelo reducido a distintas escalas y se utilizarán los ensayos realizados por otros investigadores.
3. Definición de criterios acerca de la adecuada consideración del coeficiente de rozamiento de la escollera en función de las características de la misma y del estado tenso-deformacional de la presa, con vistas al análisis de la estabilidad de la presa durante el proceso de rotura.
4. Caracterización del proceso de saturación de la escollera durante el sobrevertido y de la evolución de la red de filtración durante el proceso de rotura.
5. Caracterización de las condiciones de inicio de la rotura, definiendo criterios para determinar el caudal que la presa es capaz de resistir sin daño significativo que ponga en peligro su estabilidad. Para ello se están realizando ensayos en modelo físico.
6. Caracterización del proceso de rotura durante la fase de inicio de la brecha, previamente a que comience la liberación de agua del embalse.
7. Caracterización de la formación y propagación de la brecha.
8. Desarrollo de una nueva metodología de cálculo para el estudio de la inestabilidad y rotura progresiva de presas de escollera durante un sobrevertido (considerando los efectos de la corriente de agua sobre el espaldón y el oleaje correspondiente), basada en la formulación PFEM de elementos finitos y partículas.
9. Implementar los nuevos desarrollos sobre la formulación PFEM (Particle Finite Element Method)
 1. en un código de cálculo eficiente, robusto y de fácil utilización, equipado con potentes herramientas de preparación de datos y de visualización de resultados y con capacidad de resolver problemas de rotura de presas de escollera.
10. Calibrar y validar la precisión del nuevo método de cálculo de elementos finitos y partículas mediante su aplicación a diversos casos de sobrevertido en modelos de presas. Se realizarán para ese fin diversos ensayos en modelos a escala en los laboratorios del CEDEX y del Departamento de Ingeniería Hidráulica de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la UPM.
11. Demostrar la aplicabilidad del nuevo código de cálculo de elementos finitos y partículas en el estudio de la estabilidad y rotura de una presa de escollera de taludes 1,5H:1V, 2,2H/1V y 3H/1V bajo la acción de un sobrevertido.
12. Proporcionar al sector de la construcción un nuevo método de cálculo útil para evaluar de forma realista el peligro de rotura de una presa de escollera cuando se produce un sobrevertido, para conocer su evolución y, por tanto, definir planes de emergencia y criterios de explotación y gestión de avenidas más realistas y eficaces. También servirá para proyectar de forma racional y económicamente eficiente soluciones de mejora de la seguridad de las presas existentes y que actualmente no cumplen los criterios de capacidad de desagüe y por tanto están en riesgo inaceptable de sobrevertido. El código de cálculo resultante del proyecto será, por tanto, una herramienta eficaz para mejorar la seguridad de las presas de escollera frente al sobrevertido, causa principal de rotura, de forma realista y eficiente.

Los resultados del proyecto permitirán, en definitiva, proyectar presas de escollera más seguras y durables frente a situaciones de sobrevertidos durante la etapa de construcción y explotación, así como para evaluar y predecir el estado de las presas de escollera existentes frente a dichas acciones, favoreciendo así la definición de políticas de mantenimiento frente a unas acciones que, en general, se han tenido poco en cuenta hasta la fecha.

ÁMBITO DE TRABAJO

El estudio se está centrando en la rotura de presas cuyos espaldones están formados por material granular no cohesivo, típicamente presas de escollera. La rotura de presas de materiales cohesivos responde a mecanismos completamente diferentes.

El estudio se centra en la denominada “fase de inicio de la brecha”, es decir, desde el momento en que se inicia el sobrevertido hasta que la rotura empieza a afectar al elemento impermeable, núcleo arcilloso o pantalla. La rotura del elemento impermeable responde a fenómenos físicos completamente diferentes de los responsables de la rotura del espaldón granular, y deberán ser objeto de un estudio distinto. El estudio de la “fase de inicio de la brecha” aportará información esencial con respecto a la seguridad hidrológica de la presa, el caudal de rotura, el tiempo de rotura y los criterios de diseño de protecciones.

PARÁMETROS IMPLICADOS

Los trabajos realizados con anterioridad han permitido valorar la influencia de algunos de los parámetros considerados fundamentales, pero hay algunos otros cuya influencia resultará presumiblemente importante y que no han sido analizados hasta el momento. La adecuada comprensión del grado de influencia de los diversos parámetros implicados es fundamental para valorar el peligro de fallo, comprender el proceso de rotura y definir criterios prácticos de análisis y diseño.

Geometría

Los parámetros geométricos más significativos son:

- Talud
- Altura de presa
- Ancho de coronación
- Posición del elemento impermeable
- Altura del elemento impermeable

De todos ellos, el TALUD es el parámetro fundamental, pues resulta determinante en el deslinde del papel relativo que juegan los dos mecanismos básicos de rotura: el arrastre de partículas y el deslizamiento en masa.

Material

El material queda caracterizado por los siguientes parámetros:

- Granulometría (tamaño, uniformidad y continuidad)
- Tipo de árido (anguloso o rodado)
- Forma (redondeado, alargado...)

Como consecuencia de lo anterior quedan definidos dos parámetros esenciales: PERMEABILIDAD y ÁNGULO DE ROZAMIENTO INTERNO. Ambos tienen un papel preponderante en todo el proceso de rotura.

A efectos del análisis del proceso de rotura se considera esencial, además, el TAMAÑO de la escollera superficial, lo que no significa en modo alguno que los demás parámetros tengan una influencia pequeña. El tamaño de la escollera superficial influye de forma decisiva en que el inicio de la rotura se produzca por arrastre de partículas o por deslizamiento en masa.

Parámetros hidráulicos

Los parámetros hidráulicos principales son:

- Hidrograma de sobrevertido (caudal punta, duración y forma)
- Niveles aguas arriba y aguas abajo
- Aireación del movimiento en superficie sobre el talud de la presa

Aunque el CAUDAL PUNTA de sobrevertido es un parámetro fundamental, no cabe duda de que la duración del sobrevertido tiene una influencia apreciable en el proceso de rotura. Los ensayos realizados demuestran que para alcanzar el umbral máximo del efecto destructivo correspondiente a un caudal de sobrevertido es preciso mantener dicho caudal durante un tiempo apreciable. Los ensayos se han realizado hasta el momento por escalones de caudal mantenidos hasta el umbral máximo de rotura, lo que queda del lado de la seguridad, pero una correcta evaluación de la seguridad de la presa exigiría tener en cuenta la duración del sobrevertido.

Parámetros constructivos

Como parámetro constructivo más destacable debe señalarse el siguiente:

- Energía de compactación

La ENERGÍA DE COMPACTACIÓN es un parámetro fundamental por su influencia en la resistencia a cortante de la escollera y por la anisotropía que introduce en el material, producto del proceso de compactación.

MODELACIÓN FÍSICA

La realización de ensayos en modelo físico se estructura en diversas campañas.

Campaña previa

La campaña previa incluye todos los ensayos necesarios para abordar la campaña general en condiciones óptimas, extrayendo de ella la máxima cantidad de información fiable. Comprende esta campaña previa dos tipos de ensayos:

- Instalaciones y efecto de la aleatoriedad

Los ensayos se están realizando en las diversas instalaciones disponibles en el CEDEX y en la UPM, en 5 canales rectangulares cuyas dimensiones se resumen a continuación, indicando en primer lugar el ancho y luego la altura.

En CEDEX:

- Canal pequeño, de 40x60 cm² de sección
- Canal mediano, de 100x110 cm² de sección
- Canal grande, de 150x140 cm² de sección

En UPM:

- Canales pequeños, de 30x40 cm² de sección
- Recinto de ensayo de 250x130 cm² de sección

Por una parte, es necesario saber en qué medida son comparables los resultados de ensayos de presas de la misma altura realizados en instalaciones de distinta anchura y con distintos sistema de alimentación y control. Además, es preciso determinar si el mismo ensayo realizado varias veces en la misma instalación y en idénticas condiciones arroja resultados “similares”, es decir, conocer y acotar el efecto de la aleatoriedad en un fenómeno tan complejo como el que se está estudiando.

- Influencia de los parámetros implicados

Antes de realizar ensayos costosos y que requieren un tiempo dilatado de preparación, conviene utilizar los canales pequeños (tanto del CEDEX como de UPM) para realizar ensayos rápidos y económicos que permitan apreciar la mayor o menor influencia de los distintos parámetros, tanto geométricos como del material, hidráulicos o constructivos. Esta campaña de ensayos de pequeña altura permite mejorar el diseño de la campaña general para poder extraer de ella la máxima información.

Campaña general

Se trata de la campaña principal, con ensayos de tamaño grande, control detallado y variación sistemática de los parámetros principales. Aunque la campaña previa permitirá ajustar y afinar esta campaña general, de acuerdo con la experiencia adquirida hasta el momento se han elegido los parámetros esenciales siguientes: talud de aguas abajo, tamaño de partícula y posición de la pantalla. Si bien está claro que los dos primeros son verdaderamente esenciales, la posición de la pantalla (externa o núcleo interno) puede resultar de importancia menor.

La altura de presa se fija en 1 m. La energía de compactación deberá estudiarse para establecer un grado de compactación que simule en cierta medida el material compactado de una presa. Se combinarán los siguientes valores de los parámetros elegidos:

Pantalla: sin pantalla, núcleo interno y pantalla externa

Talud: 1,5 – 2,2 – 3,0

Tamaño de partícula: 7 – 15 – 30 mm

Con ello, el número de ensayos a realizar es de 27, que resulta abordable a pesar del tamaño del ensayo. Algunos de los ensayos se repetirán variando los diversos parámetros que no se varían sistemáticamente, para conocer su efecto en ensayos de gran tamaño y control estricto.

Campañas específicas

La limitación del número de ensayos de la campaña general, condicionado por el tiempo y el presupuesto necesario para realizar ensayos de tamaño importante (1 m de altura de presa), aconseja

realizar campañas específicas que aborden los aspectos no esclarecidos en la campaña general, y que son importantes para un adecuado tratamiento del problema. La limitación de la campaña al estudio de un sólo parámetro permite realizar el análisis con un número relativamente reducido de ensayos. En principio, se consideran las siguientes campañas específicas:

- Efecto de escala
- Características del material (tamaño, granulometría, tipo y grado de compactación)
- Evolución de caudales
- Estabilidad de partículas
- Anchura de coronación
- Diseño de protecciones

La adecuada consideración del EFECTO DE ESCALA es esencial para aplicar los resultados del estudio a presas reales. En todas las campañas específicas se prevé utilizar canales de diverso tamaño, realizando un mayor número de ensayos en los canales pequeños.

Preparación y ensayo del prototipo

Se están estudiando la ubicación y el diseño de un prototipo del mayor tamaño posible ensayado en condiciones de laboratorio. Se trata de un canal de unos 4,5 m de alto, 7,5 m de ancho y 25 metros de largo (ver Figura 1), construido en la nave del CEDEX, en el que podría ensayarse una presa de 3 ó 4 m de altura, que servirá como prototipo para análisis del efecto de escala. Este prototipo aumentará considerablemente la fiabilidad de las conclusiones obtenidas.

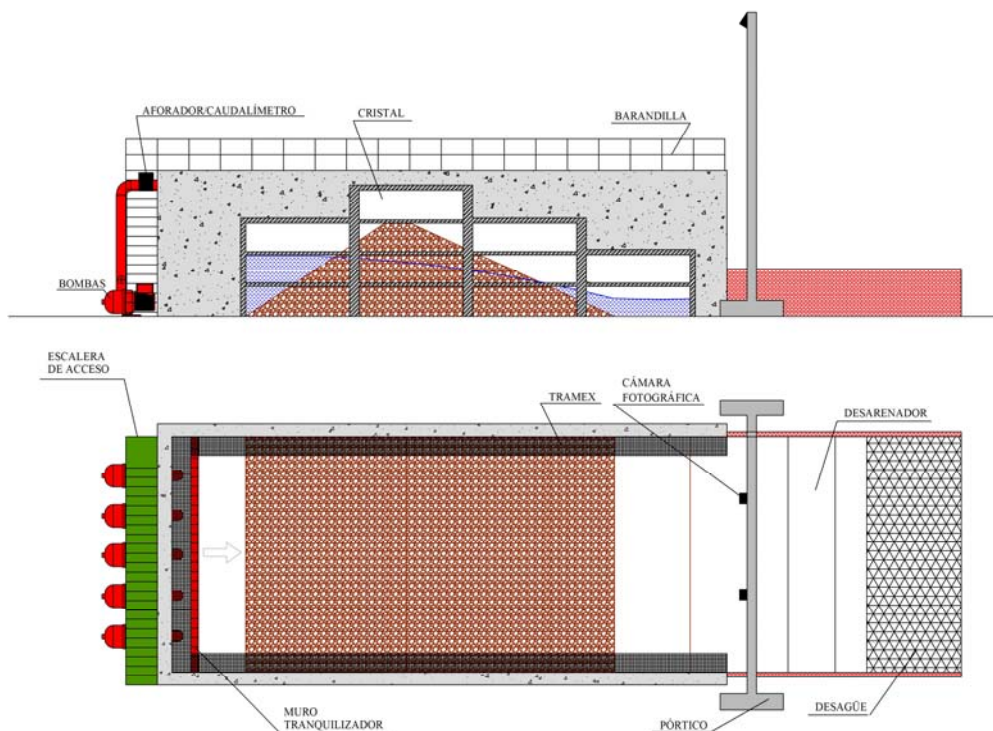


Figura 1. Esquema del prototipo

El conocimiento del proceso de rotura implica obtener una documentación geométrica de las características de la rotura en sí misma en un instante dado. Esta documentación gráfica va a ser obtenida utilizando técnicas similares a las utilizadas en fotogrametría para obtener la topografía de un terreno.

Campaña de diseño de protecciones

También es esencial la campaña de DISEÑO DE PROTECCIONES, que permitirá definir criterios para diseñar protecciones eficaces y de bajo costo que podrán aplicarse a multitud de casos de presas existentes con capacidad insuficiente de su aliviadero, y también al diseño de presas de nueva planta más seguras.

MODELACIÓN MATEMÁTICA

Las hipótesis de partida del modelo matemático y del método de cálculo son las siguientes:

- a) Utilización de una formulación Lagrangiana para modelar tanto el flujo de agua como la deformación de la estructura de la presa de escollera.
- b) Empleo de una técnica novedosa que combina métodos de elementos finitos y partículas para modelar el proceso de flujo de agua y la deformación de la presa de forma acoplada (la técnica PFEM).
- c) Inclusión de los efectos de acoplamiento fluido-estructura en los procesos de arrastre y deslizamiento.
- d) Inclusión de efectos de no linealidad geométrica y de los materiales para modelar el inicio y progresión de la rotura bajo la acción del agua.
- e) Consideración del efecto de la erosión y del arrastre de las partículas de la presa y del terreno en la zona de cimentación, para modelar el fenómeno de descalce del pie de la presa y de la base del núcleo por efecto de corrientes de agua.

En la formulación Lagrangiana se sigue el movimiento de cada una de las partículas de líquido o del sólido de forma individual y, consecuentemente, los nodos en una malla de elementos finitos pueden considerarse como “partículas” en movimiento. Por consiguiente, el movimiento de la malla que discretiza el dominio total (incluyendo los dominios del fluido y de la estructura) se sigue durante la evolución en el tiempo.

En los últimos años, el CIMNE ha desarrollado una clase particular de formulación Lagrangiana para resolver problemas en los que interviene la interacción entre fluidos y sólidos. El método se denomina método de partículas y elementos finitos (PFEM). El PFEM trata los nodos en la malla, tanto en los dominios del fluido como de la estructura, como partículas que pueden moverse libremente e incluso separarse del dominio principal del fluido representando, por ejemplo, el efecto de gotas de agua. Una malla de elementos finitos conecta los nodos que definen el dominio discretizado donde se resuelven las ecuaciones de gobierno de la mecánica de fluidos (para el líquido) y de la mecánica de sólidos (para la estructura) en la forma estándar del método de elementos finitos (MEF). El PFEM es la evolución natural del trabajo reciente de diversos investigadores del equipo de CIMNE para la resolución de problemas de interacción fluido-estructura utilizando métodos de elementos finitos Lagrangianos y técnicas sin malla [Idelsohn et al. (2003a; 2003b; 2004); Aubry et al. (2004); Oñate et al. (2003; 2004)].

Una ventaja obvia de la formulación Lagrangiana es que los términos convectivos desaparecen de las ecuaciones del fluido. La dificultad, sin embargo, se transfiere al problema de mover adecuadamente (y eficientemente) los nodos de la malla. Ciertamente para grandes movimientos de la malla puede ser necesario remallar a lo largo de la solución en el tiempo. En el proyecto se está utilizando un procedimiento de regeneración de la malla innovador que mezcla elementos de diferentes formas mediante un método extendido de Delaunay [Idelsohn et al. (2003a; 2003c)]. Estos elementos finitos poliédricos necesitan funciones de forma especiales. En este trabajo se están utilizando las funciones de forma del denominado método de elementos finitos sin malla (PFEM) [Idelsohn et al. (2003a)].

En la formulación Lagrangiana existe todavía la necesidad de tratar adecuadamente la condición de la incompresibilidad en el fluido. El uso de interpolaciones de elementos finitos estándar puede conducir al bloqueo de la solución por deformación volumétrica, a menos que se tomen algunas precauciones. En este trabajo se está utilizando una técnica de estabilización basada en el método de cálculo finito (FIC). En las referencias [García y Oñate (2003); Oñate(2004); Oñate et al. (2004); Oñate y García (2001); Oñate y Idelsohn (1998)] se pueden encontrar diferentes aplicaciones de la técnica FIC para problemas de fluidos incompresibles utilizando elementos triangulares y tetraédricos lineales.

La formulación Lagrangiana que se está utilizando en el proyecto tiene muchas ventajas para seguir el movimiento de las partículas del fluido en flujos en los que existen grandes desplazamientos de la superficie libre, como en el caso de olas que rompen sobre una estructura. Se recuerda que la información en el método PFEM es típicamente nodal, es decir la malla de elementos finitos se utiliza fundamentalmente para obtener los valores de las variables de estado (por ejemplo las velocidades, presiones, etc.) en los nodos.

En resumen, una solución típica con el PFEM involucra las etapas siguientes:

1. Discretizar los dominios del fluido y de la estructura con una malla de elementos finitos.
2. Identificar los contornos externos para los dominios del fluido y del sólido. Esta es una etapa esencial ya que algunos contornos (como la superficie libre en los fluidos) pueden haberse distorsionado severamente durante el proceso de solución, incluyendo la separación y reentrada de nodos. En este trabajo se utiliza el método de Alpha Shape [Edelsbrunner y Mucke (1999)] para la definición de los nodos del contorno.
3. Resolver las ecuaciones acopladas del movimiento Lagrangiano para los dominios del fluido y de la estructura. Calcular las variables de estado relevante en ambos dominios en cada paso de tiempo: las velocidades, la presión y las tensiones viscosas en el fluido, y los desplazamientos, las deformaciones y las tensiones en la estructura.
4. Mover los nodos de la malla a una nueva posición en función del tamaño del paso del tiempo. Esta etapa es típicamente una consecuencia del proceso de solución de la etapa 3.
5. Generar una nueva malla en caso necesario. El proceso de regeneración de la malla puede tener lugar después de un número prescrito de pasos de tiempo, o cuando la malla actual ha sufrido importantes distorsiones debido al movimiento Lagrangiano.
6. Volver a la etapa 2 y repetir el proceso de solución para el paso de tiempo siguiente.

En la Figura 2 se muestra un ejemplo típico de una aplicación 1 del PFEM. Las figuras corresponden al análisis del problema de la rotura de una columna de agua en el interior de un recipiente. La Figura 2a muestra la malla inicial de elementos rectangulares de cuatro nodos que discretizan el dominio del fluido y las paredes del recipiente. Se aprecia en las Figuras 2b y 2c la malla en los dominios del fluido y del recipiente en dos instantes de tiempo diferentes.

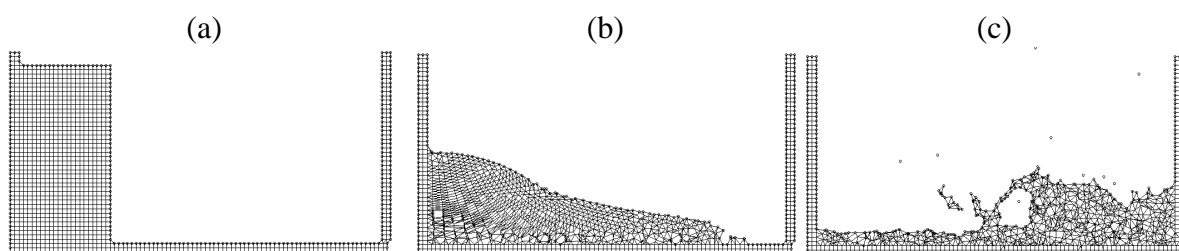


Figura 2. Modelización con el PFEM de la rotura de una columna de agua. (a) Discretización del dominio del fluido y de las paredes del recipiente. (b) y (c) Mallas en el fluido y en las paredes del recipiente en dos tiempos distintos.

RESULTADOS OBTENIDOS HASTA EL MOMENTO

Hasta el momento de la entrega de este artículo se han realizado más de 20 ensayos en modelo físico en los canales del CEDEX y de UPM. De estos ensayos se han analizado los resultados de 15 correspondientes a la campaña previa. El diámetro medio del material utilizado en los 15 ensayos analizados ha sido de 15 mm. Todas las presas ensayadas tienen un talud aguas arriba de 1,5H/1V y una altura de 100 cm. El ancho de coronación es de 20 cm. Las presas ensayadas no disponen de elemento impermeable.

Tabla 1. Resumen de los ensayos en modelo físico analizados

Talud aguas abajo	Anchura[cm]	Medidas tomadas	Objetivo perseguido	Nº ensayos
2,2H/1V	100	NIVEL AGUAS ARRIBA	COMPROBACIÓN INSTALACIONES ALEATORIEDAD	2
		NIVEL AGUAS ABAJO		
		CAUDAL		
		LONGITUD BRECHA		
2,2H/1V	100	NIVEL AGUAS ARRIBA	COMPROBACIÓN INSTALACIONES ALEATORIEDAD	3
		NIVEL AGUAS ABAJO		
		CAUDAL		
		PRESIONES EN SOLERA		
1,5H/1V	100	NIVEL AGUAS ARRIBA	COMPROBACIÓN INSTALACIONES ALEATORIEDAD	3
		NIVEL AGUAS ABAJO		
		CAUDAL		
		PRESIONES EN SOLERA		
1,5H/1V	100	NIVEL AGUAS ARRIBA	COMPROBACIÓN INSTALACIONES ALEATORIEDAD	1
		NIVEL AGUAS ABAJO		
		CAUDAL		
		LONGITUD BRECHA		
3H/1V	100	NIVEL AGUAS ARRIBA	COMPROBACIÓN INSTALACIONES ALEATORIEDAD	2
		NIVEL AGUAS ABAJO		
		CAUDAL		
		LONGITUD BRECHA		
3H/1V	100	NIVEL AGUAS ARRIBA	COMPROBACIÓN INSTALACIONES ALEATORIEDAD	2
		NIVEL AGUAS ABAJO		
		CAUDAL		
		LONGITUD BRECHA		
3H/1V	250	NIVEL AGUAS ARRIBA	COMPROBACIÓN INSTALACIONES ALEATORIEDAD	2
		CAUDAL		
		MOVIMIENTOS		
TOTAL ENSAYOS				15

A continuación se muestran los resultados parciales obtenidos para tres taludes distintos (1,5H/1V; 2,2H/1V; 3H/1V), representando cada línea un ensayo diferente. Se han comparado valores adimensionales, siendo:

- B Longitud de la brecha sobre la solera desde el pie
- H Altura total de la brecha
- h Nivel de agua aguas arriba
- Q Caudal de cada escalón considerado
- Qr Caudal de rotura del ensayo

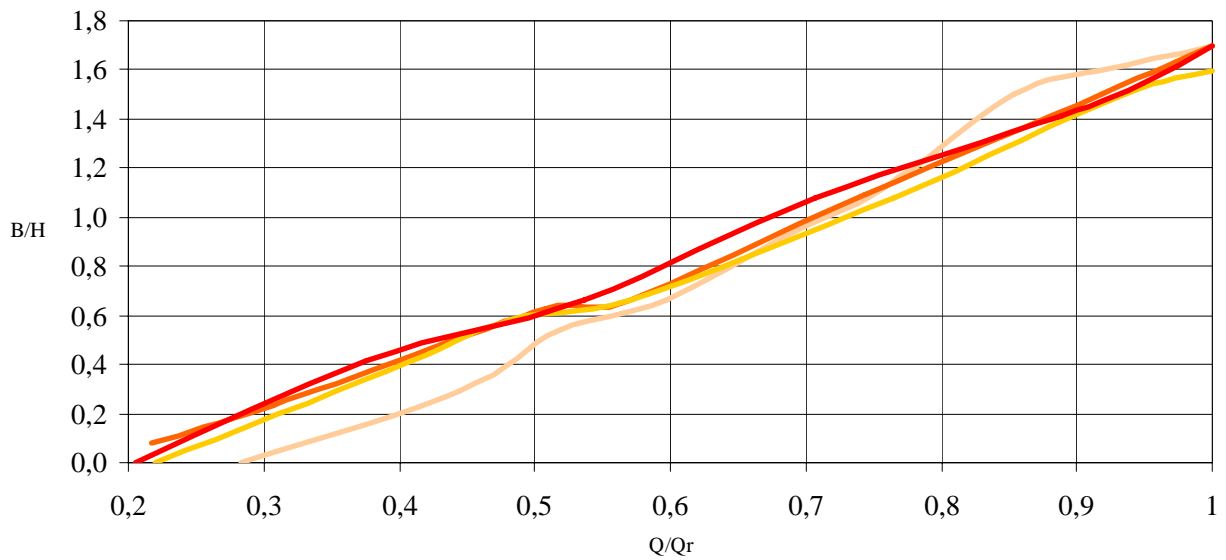


Figura 3. Comparación $B/H-Q/Q_r$ para talud 1,5H/1V

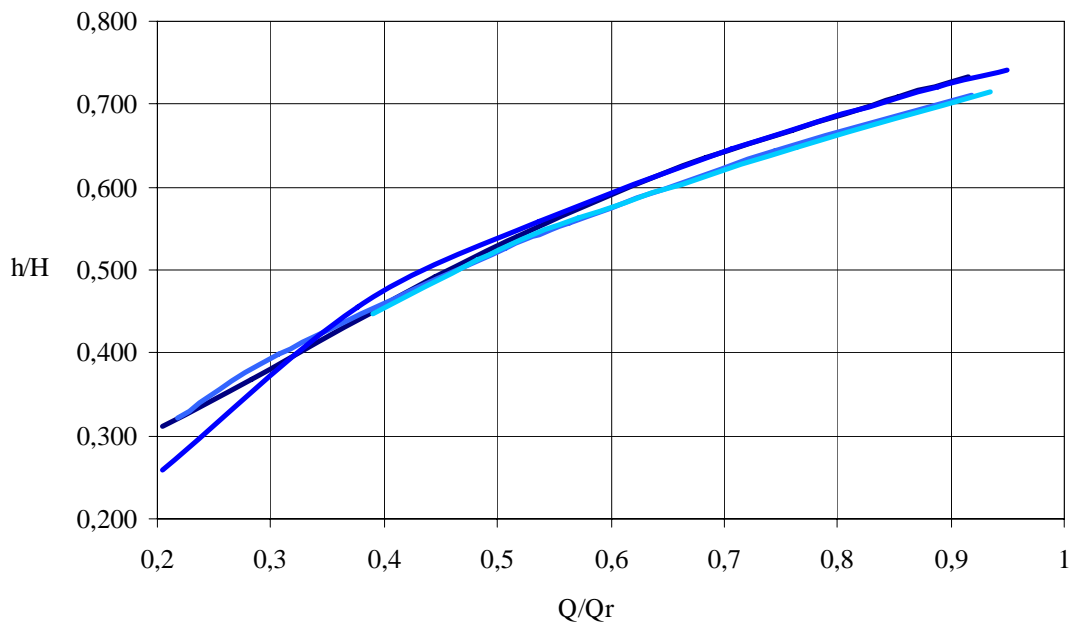


Figura 4. Comparación $h/H-Q/Q_r$ para talud 1,5H/1V

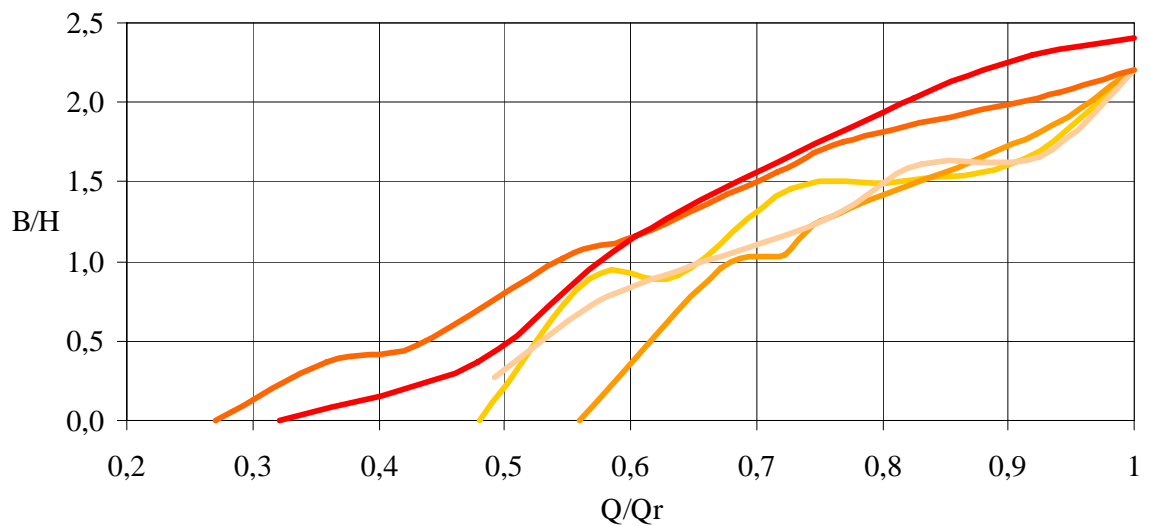


Figura 5. Comparación $B/H-Q/Q_r$ para talud 2,2H/1V

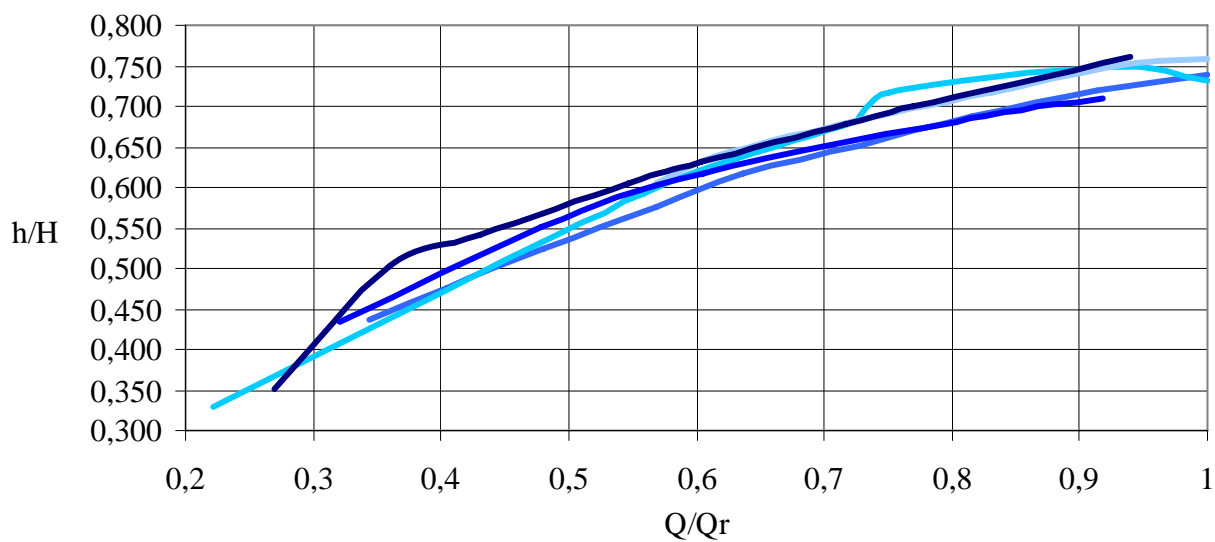


Figura 6. Comparación h/H - Q/Q_r para talud 2,2H/1V

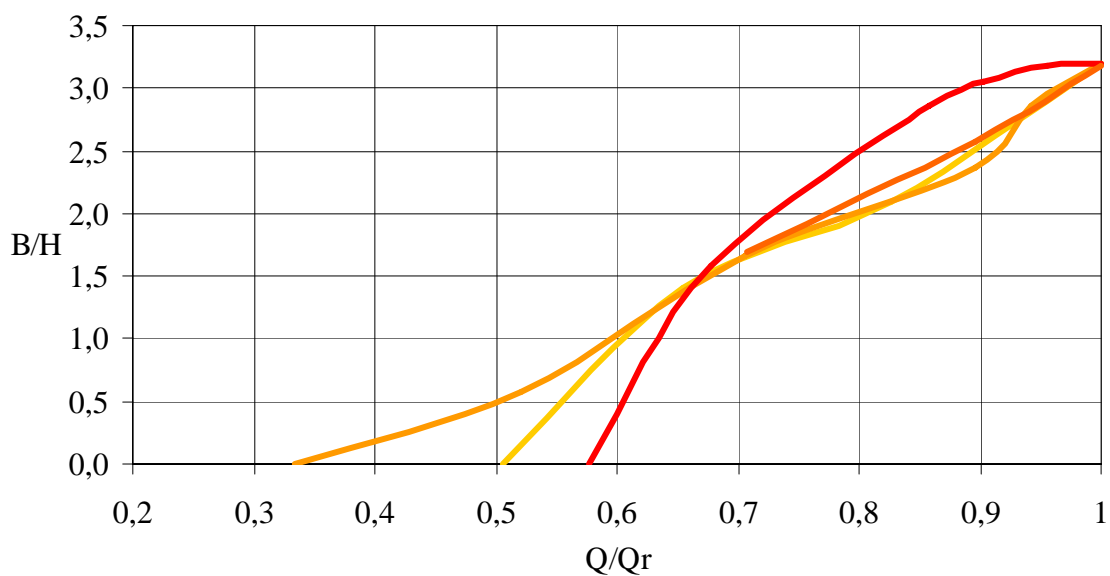


Figura 7. Comparación B/H - Q/Q_r para talud 3H/1V

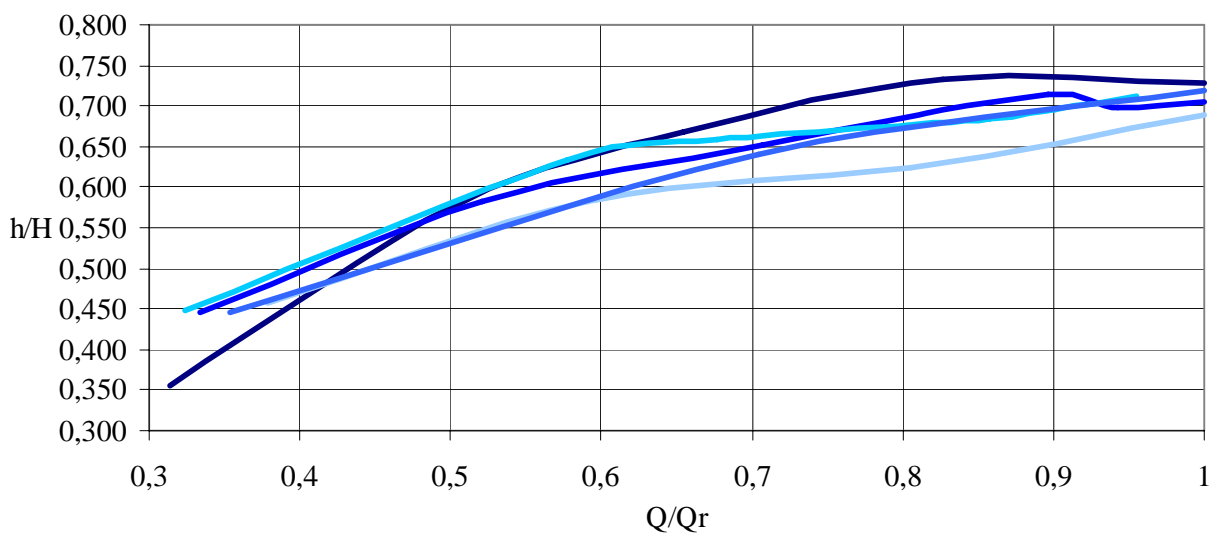


Figura 8. Comparación h/H - Q/Q_r para talud 3H/1V

El PFEM se ha desarrollado en los últimos meses para modelar el efecto de la erosión del terreno sobre el que circula una corriente de agua. Esto permite reproducir el efecto del arrastre de partículas de escollera en un espaldón de una presa, lo que será de gran utilidad en el proyecto XPRES. En la Figura 9 se muestra un ejemplo de la evolución de la erosión por arrastre debido a un sobrevertido en un montículo constituido por partículas granulares. Mas detalles sobre los desarrollos recientes del PFEM y su validación experimental pueden encontrarse en Oñate et al. (2008) y Larese et al. (2008).

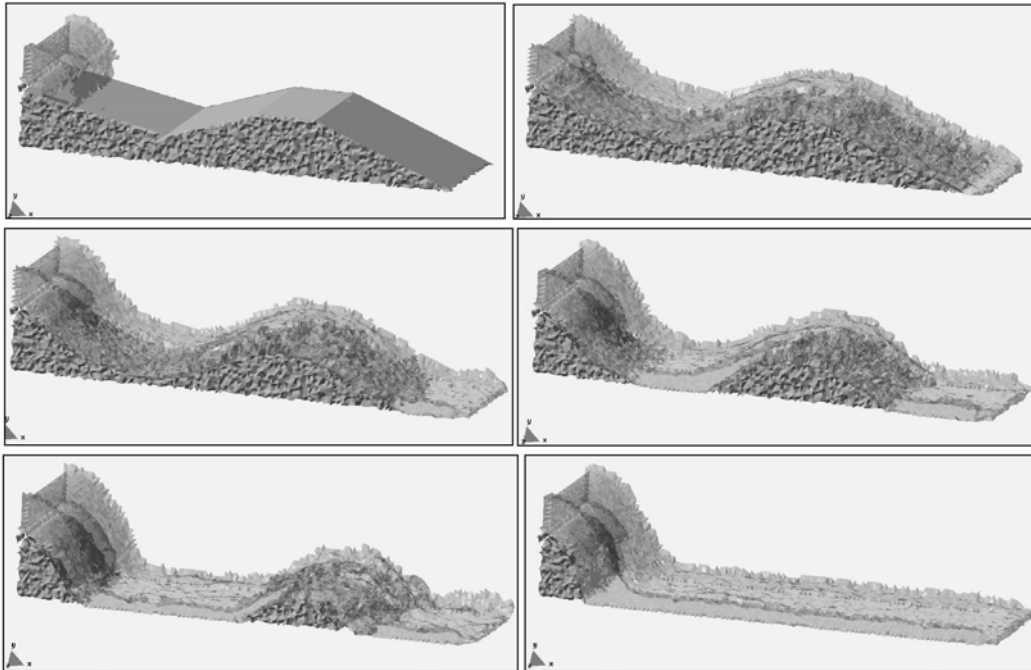


Figura 9. Modelización con el PFEM de la erosión de un montículo de material granular en un sobrevertido

CONCLUSIONES

A continuación se exponen unas conclusiones obtenidas a partir de los resultados conseguidos hasta el momento:

1. Para los taludes 1,5H/1V y 3H/1V, en los que los fenómenos de deslizamiento en masa y arrastre (respectivamente) están claramente definidos, las líneas de tendencia son claras, mientras que para el talud 2,2H/1V, en el que ambos fenómenos se solapan, éstas son menos claras.
2. Cuanto mayor es el talud, el caudal para el que comienza a producirse la apertura de la brecha es mayor, pero el caudal de rotura es inferior que para la rotura de presas con talud menor (ver Figura 10).
3. Los caudales unitarios necesarios para romper las presas del CEDEX son superiores a los necesarios en UPM. La relación entre ambos, con los datos obtenidos hasta el momento, es de 1,25 aproximadamente. Esta diferencia es atribuible al efecto pared que se produce en el canal del CEDEX, debido fundamentalmente a la escasa anchura del mismo.
4. A igualdad de talud, la longitud de la brecha depende fundamentalmente del caudal que la provoca independientemente del número de escalones de caudal que se hayan dado hasta ese momento, siempre y cuando se deje actuar el tiempo suficiente.

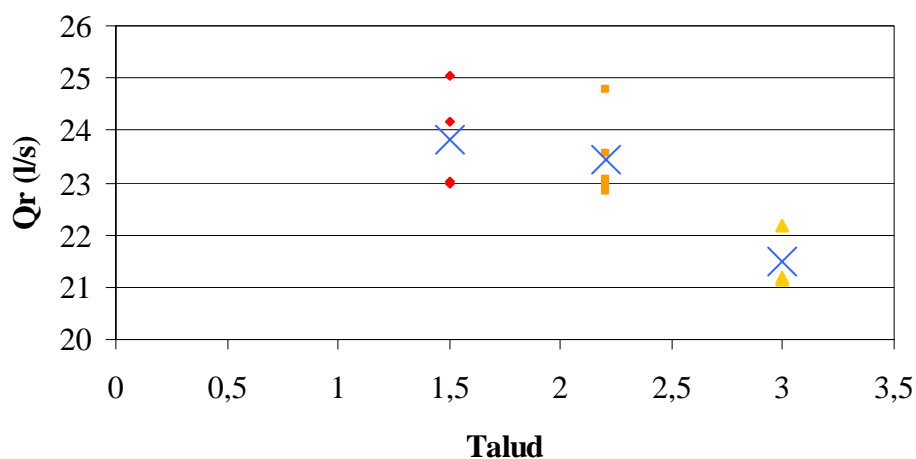


Figura 10. Caudal de rotura para distintos taludes

5. Para el tamaño de escollera manejado (15 mm), presas de 1 m de altura y un caudal dado, el tiempo necesario para que se desarrollen todos los movimientos suele estar comprendido entre 10 y 60 minutos.
6. El talud es un parámetro fundamental que influye en las relaciones entre las principales variables implicadas (ver Figura 11, de cada talud se ha escogido un ensayo representativo y se ha obtenido la línea de tendencia).
7. El efecto de la aleatoriedad se puede considerar bajo.

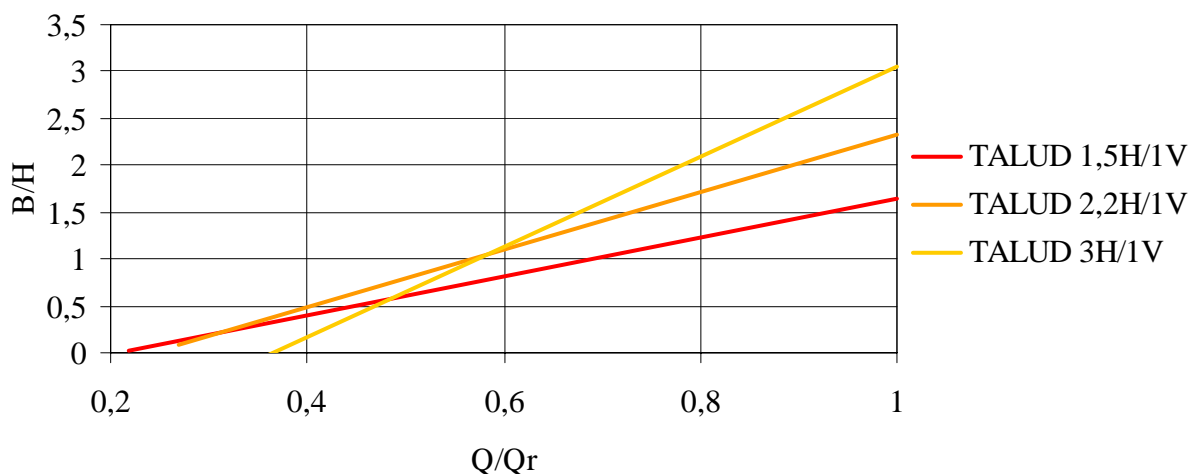


Figura 11. Variación de la relación B/H-Q/Qr para distintos taludes

REFERENCIAS

- Bathurst, Li y Simons (1981).** *Resistance equation for large-scale roughness.* ASCE, *Journal of the Hydraulics Division*.
- Fiori y Guercio (1996).** *Modelling the overtopping of embankment dams,* *Hydropower & Dams, Issue Two.*
- Giuseppetti y Molinaro (1989)** *A mathematical model of the erosion of an embankment dam by overtopping,* *International Symposium on Analytical Evaluation of Dam Related Safety Problems, Copenhagen.*
- Hartung y Scheuerlein (1970)** *Design of overflow rockfill dams,* *Congreso de ICOLD de Montreal;* Q.36; R.35.
- Knauss (1979)** *Computation of maximum discharge at overflow rockfill dams (a comparison of different model test results),* *Congreso de ICOLD de Nueva Delhi;* Q.50, R.9.
- Leliavsky (1965)** *Design of dams for percolation and erosion,* Ed. Chapman & Hall, Gran Bretaña.
- Martins (1991)** *Seepage flow through rockfill dams,* *Congreso de ICOLD de Viena,* Q.67, R.14.

- Mishra** (1998) *Riprap design for overtopped embankments*. Ann Arbor, Michigan: UMI Dissertation Services.
- Olivier** (1967) *Through and overflow rockfill dams. New design techniques*. Institution of Civil Engineers, paper 7012, Vol. 36, Londres.
- Parkin, Trollope y Lawson** (1966) *Rockfill structures subject to water flow*. ASCE; *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*.
- Parking** (1971) *Field solutions for turbulent seepage flow*. ASCE, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*.
- Skoglund y Solvik** (1995) *External and internal erosion in rockfill dams*, *Hydropower & Dams*.
- Solvik** (1991) *Throughflow and stability problems in rockfill dams exposed to exceptional loads*, *Congreso de ICOLD de Viena*, Q.67, R.20.
- Toledo** (1998) *Safety of rockfill dams subject to overtopping*. In L. Berga (ed.), *Dam Safety: 1163-117*, Rotterdam: Balkema.
- Toledo** (1999) *Diseño de presas de escollera resistentes al sobrevertido*, Madrid, Comité Nacional Español de Grandes Presas.
- Volker** (1969) *Nonlinear flow in porous media by finite elements*, ASCE, *Journal of the Hydraulics Division*.
- Ward** (1964) *Turbulent flow in porous media*, ASCE, *Journal of the Hydraulics Division*.
- Wright** (1968) *Nonlinear flow through granular media*, ASCE, *Journal of the Hydraulics Division*.
- Aubry, R., Idelsohn, S.R. and Oñate, E.** (2004). *Particle finite element method in fluid mechanics including thermal convection-diffusion*. *Computer & Structures*, 83 (17-18), pp 1459-1475, 2005.
- Edelsbrunner, H. and Mucke, E.P.** (1999). *Three dimensional alpha shapes*. *ACM Trans. Graphics*, 13: 43-72.
- García, J. and Oñate, E.** (2003). *An unstructured finite element solver for ship hydrodynamic problems*. in *J. Appl. Mech.*, 70: 18-26, January.
- Idelsohn, S.R., Oñate, E., Calvo, N. and del Pin, F.** (2003a). *The meshless finite element method*. *Int. J. Num. Meth. Engng.*, 58,6: 893-912.
- Idelsohn, S.R., Oñate, E. and Del Pin, F.** (2003b). *A lagrangian meshless finite element method applied to fluid-structure interaction problems*. in *Computer and Structures*, 81: 655-671.
- Idelsohn, S.R., Calvo, N. and Oñate, E.** (2003c). *Polyhedrization of an arbitrary point set*. *Comput. Method Appl. Mech. Engng.*, 192 (22-24): 2649-2668.
- Idelsohn, S.R., Oñate, E. and Del Pin, F.** (2004). *The particle finite element method a powerful tool to solve incompressible flows with free-surfaces and breaking waves*. *Int. J. Num. Meth. Engng.*, submitted.
- Larese, A., Rossi, R., Oñate, E., Idelsohn, S.R.** (2008), *Validation of the particle finite element method (PFEM) for simulation of free surface flows*. Accepted for publication in *Engineering Computations* (paper n.1246).
- Oñate, E. and Idelsohn, S.R.** (1998). *A mesh free finite point method for advective-diflusive transport and fluid flow problems*. *Computational Mechanics*, 21: 283-292.
- Oñate, E. and García, J.** (2001). *A finite element method for fluid-structure interaction with surface waves using a finite calculus formulation*. *Comput. Meth. Appl. Mech. Engng.*, 191: 635-660.
- Oñate, E., Idelsohn, S.R. and Del Pin, F.** (2003). *Lagrangian formulation for incompressible fluids using finite calculus and the finite element method*. in *Numerical Methods for Scientific Computing Variational Problems and Applications*, Y. Kuznetsov, P. Neittanmaki and O. Pironneau (Eds.), CIMNE, Barcelona.
- Oñate, E.** (2004). *Possibilities of finite calculus in computational mechanics*. *Int. J. Num. Meth. Engng.*, 60 (1): 255-281.
- Oñate, E., García, J. and Idelsohn, S.R.** (2004). *Ship hydrodynamics*. In *Encyclopedia of Computational Mechanics*, E. Stein, R. de Borst and T.J.R. Hughes (Eds), J.Wiley.
- Oñate, E., Idelsohn S.R., Del Pin F. and Aubry R.** (2004). *The particle finite element method. An overview*. *International Journal of Computational Methods*, 1 (2), 267-307.
- Oñate, E., Idelsohn S.R., Celigueta M.A. and Rossi R.** (2008) *Advances in the particle finite element method for the analysis of fluid-multibody interaction and bed erosion in free surface flows*. *Comput. Methods Appl. Mech. Engng.*, 197, 1777-1800.