

IAHR **AIPH**
XXI CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
SÃO PEDRO, ESTADO DE SÃO PAULO, BRASIL, OCTUBRE, 2004

**ESTUDIO NUMÉRICO Y EXPERIMENTAL DE UNA SUPERFICIE
NATURAL PROPUESTA COMO AFORADOR MORFODINÁMICO.**

V. Medina , A. Bateman, A. Pérez , D. Velasco.

Universitat Politècnica de Catalunya, Departamento de Hidráulica, Marítima y Ambiental. Campus Nord D-1 209
vicenteeresmas@eresmas.com

RESUMEN:

La situación actual de la hidrología Española obliga a una modificación en los criterios de diseño de las estaciones de aforo, pierde importancia la necesidad de aforar grandes avenidas y gana importancia la precisión de los aforos para caudales bajos parecidos a los medios. Esta nueva necesidad obliga a la búsqueda de nuevos diseños claramente diferenciados de los tradicionales. Con este objetivo calibramos la validez de un diseño obtenido de la propia naturaleza con un funcionamiento análogo a un sistema de aforo artificial. En este artículo se describe tanto el proceso constructivo como el de calibración de este aforo peculiar.

ABSTRACT:

The present situation of the Spanish hydrology forces criteria modification in water gauge stations design, the necessity to measure floods loses importance and the precision of the measuring in low discharges gains importance. This new situation needs new designs differentiated clearly from the traditional ones. With this objective we calibrate a new design obtained directly from a natural stream. This natural design has the same hydraulic behaviour of artificial ones. In this article we describe the construction and calibration method.

PALABRAS CLAVE: piedra, aforo, morfodinámica.

INTRODUCCIÓN:

Las cuencas Mediterráneas localizadas en Cataluña poseen caudales medios anuales reducidos. Las estaciones de aforo presentes en estos ríos fueron diseñadas en la filosofía de medir grandes eventos, es decir se construyeron como parte de un plan de previsión de riesgos que permitiese determinar caudales asociados a grandes periodos de retorno. La situación actual del agua en España debida a su hidrología y consumos introduce una nueva necesidad, la gestión del agua.

Para poder realizar esta gestión correctamente es necesario conocer los caudales que circulan en cada instante por los ríos, en la mayoría de casos y en la mayoría de ocasiones se trata de caudales reducidos, por ello el concepto actual de estación de aforo queda obsoleto. El objetivo actual consiste en desarrollar una estación de aforo que permita medir un rango de caudales que vaya de los asociados a épocas estivales, hasta los asociados a grandes avenidas, todos ellos con una precisión aceptable, es decir el objetivo es obtener una precisión relativa similar para todos los caudales.

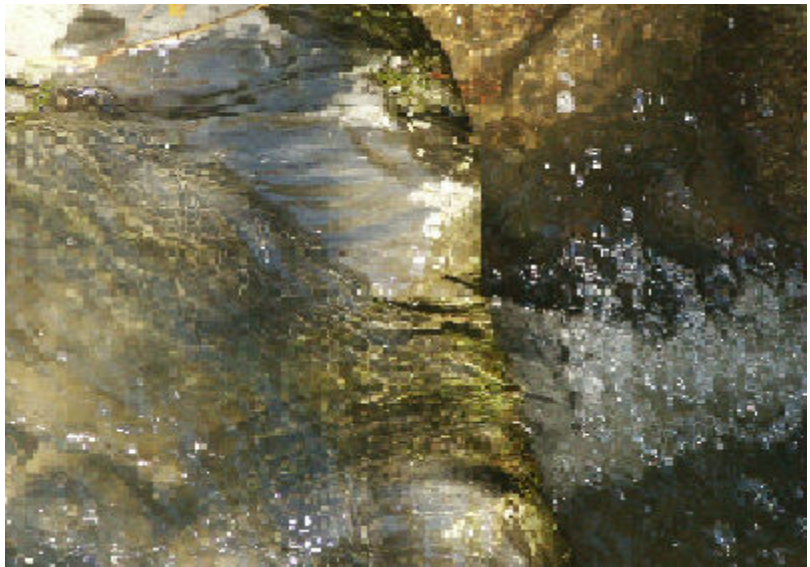
PROTOTIPO NATURAL:

Con este ambicioso plan en mente y dentro de las actividades de trabajo habituales en el grupo nos desplazamos al río Tordera en la provincia de Barcelona, en su tramo alto discurre por dentro de un macizo montañoso conocido como el Montseny, este tramo tiene el aspecto del clásico torrente de montaña.

El caudal medio anual no debe superar los 4 o 5 metros cúbicos segundo, observamos en la parte del cauce una piedra de geometría singular que interceptaba el flujo, esta barrera se veía desbordada por el agua que habría una brecha en ella, que con el paso del tiempo se había ido modificando hasta llegar a una forma hidrodinámica interesante. El tamaño total de la brecha no superaba los 50x50 cm.

Posteriormente y dentro del marco de una tesina de pregrado un alumno mostró interés en esta idea algo descabellada, con lo que nos pusimos mano a la obra para modelizar la geometría hidráulicamente.

En una primera fase, aprovechando un periodo de sequía extrajimos un molde de la piedra utilizando un cemento rápido. Una vez extraído este molde lo trasladamos al laboratorio donde en primer lugar se procedió a la medición exhaustiva de toda la superficie. La primera



parte del trabajo consistió en posicionar exactamente el molde para que tuviese la misma orientación que en el prototipo natural pero invertido, permitiendo medir correctamente los puntos de la superficie.

Mediante un limnómetro se tomaron algo más de 3.000 puntos del molde de cemento. Estos puntos medidos revelaron una geometría de gran simetría y de curvas suaves. Uno de los lados aparecía algo más deteriorado debido a la influencia de la propia litología de la piedra. Por ello para el ajuste posterior de la superficie mediante curvas analíticas se usó únicamente el lado mejor conservado.

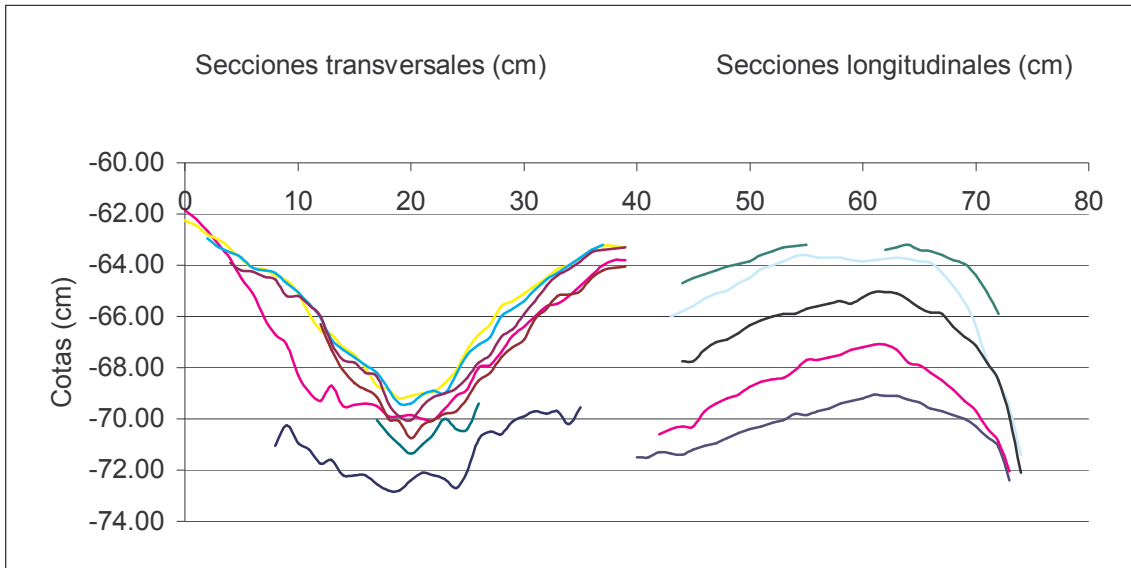
Los datos medidos se agruparon en secciones longitudinales y



transversales, de manera que facilitasen el posterior análisis geométrico.

PROTOTIPO NUMÉRICO:

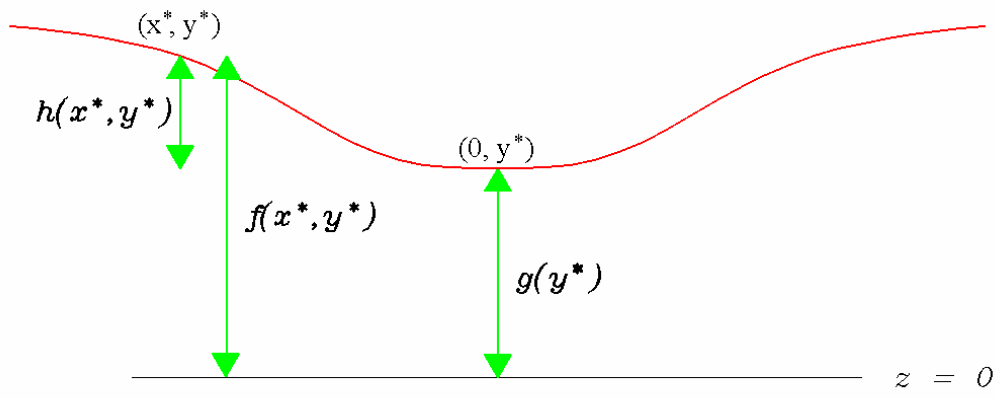
Con los datos medidos del prototipo natural ya se hizo posible empezar el análisis de las curvas que constituían la geometría. A pesar de la existencia de muchas técnicas numéricas de ajuste de superficies resultaba fundamental determinar a priori la



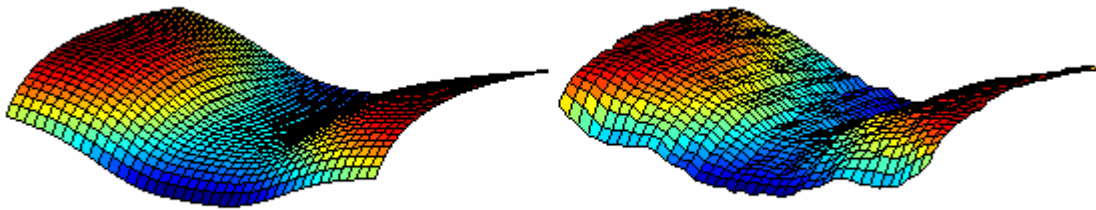
tipología de la fórmula de ajuste, para luego por métodos computacionales únicamente determinar los coeficientes de ajuste. Para ello se probaron muchas formulaciones para concluir con una ecuación del tipo:

$$f(x,y) = \underbrace{-[A*(y+B)+C/(y+B)]}_{g(y)} + \underbrace{D* \underbrace{[|x|^\alpha / (|x|^\alpha + F*y^2 + G*y + H)]}_{E(y)}}_{h(x,y)} + K$$

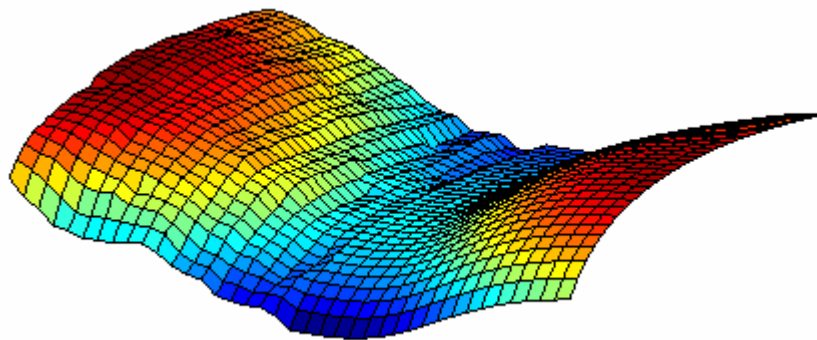
Donde vemos que la fórmula fundamental de ajuste f esta constituida por el producto de dos fórmulas, una de ajuste longitudinal $g(y)$, donde y es la coordenada longitudinal y otra de ajuste transversal $h(x,y)$, donde x es la coordenada transversal, si observamos una sección transversal el esquema es el siguiente:



Como podemos ver la función $g(y)$ nos da la cota mínima de la sección y le sumamos la función $h(x,y)$ que nos da la cota relativa de la sección respecto su punto mínimo. Como se puede ver en la fórmula se utilizan nueve coeficientes de ajuste diferentes para los más de 1.600 puntos. Para realizar el ajuste de estos coeficientes utilizamos un algoritmo de ajuste por mínimos cuadrados y después de un cálculo de larga duración se llega a un mínimo.



En la imagen podemos ver una comparación entre los datos de campo y la geometría derivada del ajuste numérico. Error medio sobre los datos del prototipo es de 0.215 cm. En la última imagen vemos una imagen resultado de la fusión de los datos de campo con los datos de la función analítica. La ventaja de tener la función analítica es que permite el cálculo exacto de parámetros geométricos como el radio hidráulico o el área del flujo.



MODELO FÍSICO:

Ya con la geometría bien caracterizada pasamos a reproducirla en el laboratorio. Al contrario del procedimiento habitual en este caso el modelo no es reducido sino que su escala geométrica es 2.5:1 es decir el modelo tiene 2.5 veces las dimensiones del prototipo. Para el posterior ajuste de los caudales utilizaremos la semejanza de Froude, ya que como en la mayoría de aforos las fuerzas preponderantes en el flujo son principalmente gravitatorias e inerciales. El motivo para esta ampliación en lugar de mantener la escala o reducirla es debido a que el ancho total de la geometría es de 40 cm, y el canal destinado a los ensayos es de 1 metro con lo que aplicando la escala 2.5 encajamos exactamente la geometría en el canal.



La técnica para reproducir la geometría consistió en reproducir las secciones transversales para luego ensamblarlas, esta técnica implicaba el recorte de muchas secciones, por lo que el material utilizado debía ser sencillo de cortar y no abrasivo, esto nos hizo descartar la madera y el PVC, materiales habituales del laboratorio de mecánica de fluidos.



Por otra parte debía ser un material de suficiente rigidez como para evitar su deformación en el proceso constructivo y no poroso para no verse afectado por el agua durante los ensayos. La solución fue utilizar unas placas de espuma aislante de alta densidad *K-FOAM D-35* de la casa *KNAU*. Se cortaron y ensamblaron 49 placas de 3 cm de espesor. Una vez acabada la estructura del modelo, la superficies expuesta al agua se recubrió de un cemento cola de alta adherencia, de manera que conseguimos una superficie homogénea, suave y de alta resistencia. Para ello utilizamos *FERMAFLEX-25*, cuya única pega consiste en la posible aparición de fisuras debido al secado del cemento. Para evitarlo el acabado final que se dio fue de tipo *MONOTOP 620* de la

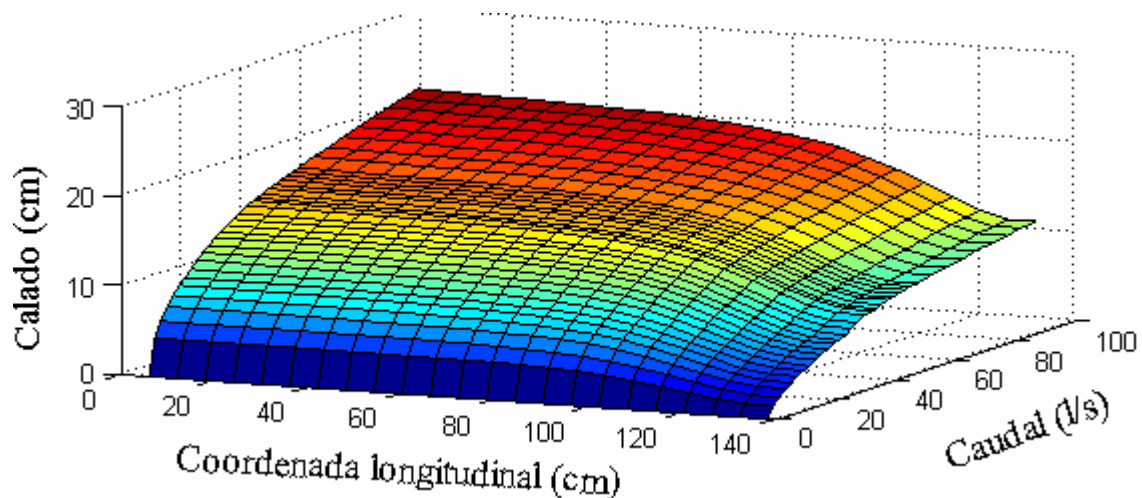
debido al secado del cemento. Para evitarlo el acabado final que se dio fue de tipo *MONOTOP 620* de la casa *SIKA*, que es un cemento para exteriores que resiste amplios cambios de temperatura de humedad e incluso heladas.

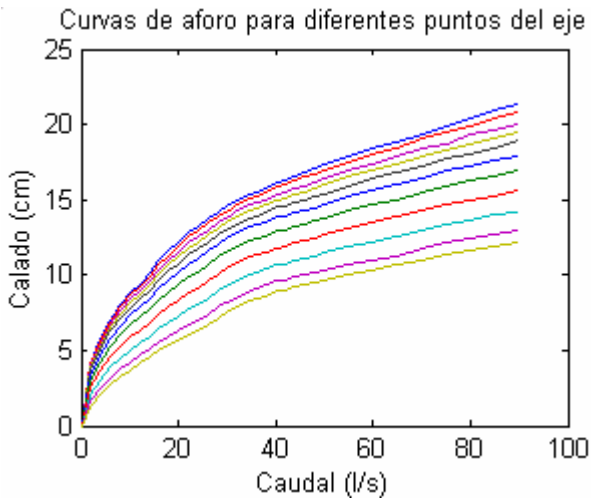
Para su ubicación dentro del canal de ensayo se dispuso una base de grava sobre la pudiésemos asentar el modelo con la nivelación correcta. Se dispuso así mismo un tubo de drenaje que permitiese desaguar el residuo de agua acumulado aguas arriba. Una vez obtenida una nivelación con un error inferior a 1 mm se selló todo el conjunto utilizando un elastómero puro de poliuretano de la casa *TSMO* que una vez seco se convierte en una membrana continua impermeable.



RESULTADO ENSAYOS:

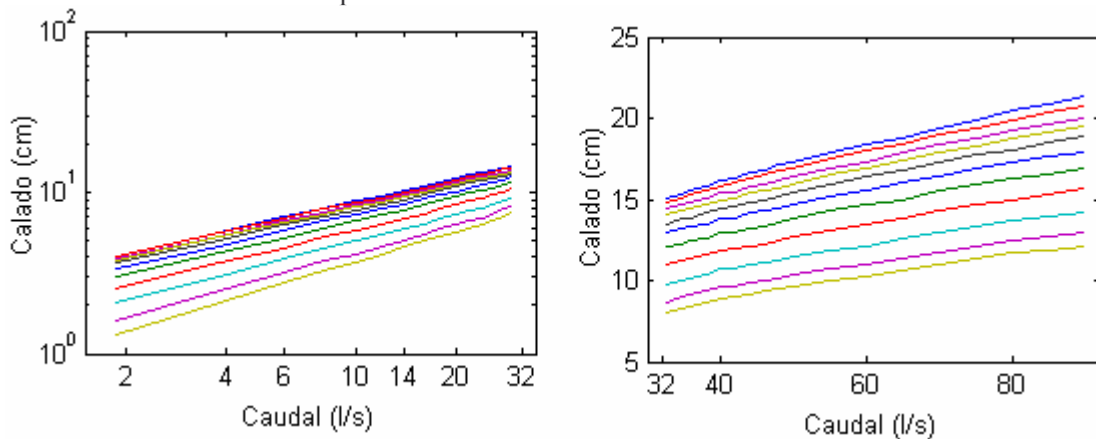
Los caudales de ensayo fueron de los 0 a los 50 l/s cada 2 litros y de los 50 a los 90 l/s cada 5 litros, es decir 33 caudales diferentes. La primera comprobación que se hizo fue que la lámina de agua se podía considerar horizontal a lo largo de las secciones transversales, evidentemente esto no es estrictamente cierto, ya que aparecían distorsiones en la lámina de agua, especialmente cerca del contorno mojado, sin embargo el orden de precisión de las medidas era similar a la deformación de lámina de agua en las secciones transversales, con lo que se decidió únicamente medir los calados en el eje longitudinal central del modelo. Los resultados de todos estos experimentos se pueden ver en la gráfica tridimensional, en la que los tres ejes son la abscisa de medida, el caudal que circulaba y el calado medido en el punto. Como puede comprobarse en la gráfica todas las transiciones en la lámina de agua son suaves, sin producirse saltos.





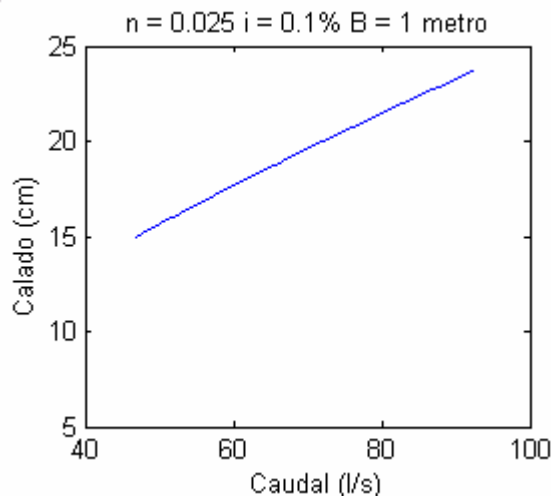
Con los caudales de ensayo se definen dos zonas de comportamiento, la comprendida entre 0 y 34 l/s y la comprendida entre los 34 y los 90 l/s. En la primera de ellas el flujo no llega a los límites del modelo, en la segunda de ellas el flujo moja completamente la superficie del modelo y se apoya en las paredes verticales del canal. Vemos que estos fenómenos originan un comportamiento completamente diferente de la curva de aforo para cualquiera de las secciones del modelo. Para la primera zona la grafica logarítmica revela un comportamiento del tipo $Q = C h^a + b$, que es análogo al presentado en vertederos triangulares y la segunda zona presenta un comportamiento del mismo tipo que un canal funcionando en régimen normal.

Podemos ver en la figura la relación caudal/calado para una canal en régimen normal de 1 metro de ancho, una rugosidad de 0.025 y una pendiente de un 0.1%. Esta doble faceta de la curva de aforo resulta muy interesante ya que nos garantiza para caudales pequeños un comportamiento similar a un aforo triangular y para los caudales de avenida un comportamiento más lineal.



Curvas de aforo para las dos zonas definidas.

El hecho de que en función del calado mojemos más o menos superficie del modelo define exactamente una curva de mojado que depende del caudal. Esto permite que para realizar la lectura del caudal dibujemos una serie de líneas sobre el modelo y finalmente para aforar basta con mirar la línea que dibuja la lámina libre y con que curva de aforo se solapa.



Curvas de aforo para un canal en régimen normal.

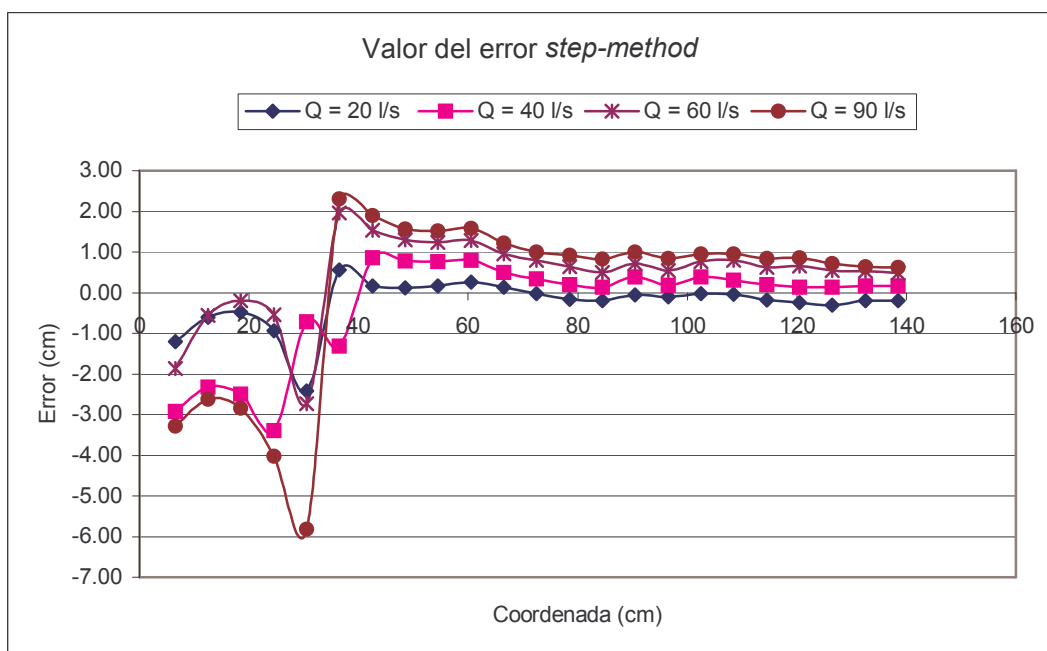
RESULTADO NUMÉRICO:

Con el fin de contrastar los resultados experimentales con algún tipo de predicción teórica desarrollamos una serie de modelos numéricos, en primer lugar trabajamos con las ecuaciones unidimensionales, a pesar de los problemas inherentes a estas ecuaciones en presencia de puntos críticos. Evaluábamos soluciones estacionarias, por lo que al llegar a un régimen crítico como es nuestro caso la pendiente de la lámina de agua se hace infinita, además se incumplen las condiciones de flujo unidimensional ya que las líneas de corriente dejan de ser paralelas a la solera. En los aforos en general se produce un cambio de régimen de régimen lento a régimen rápido. El punto de control de este cambio de régimen se da en la sección en la que se produce el crítico. Por tanto existe una incapacidad evidente para el modelado ya que la determinación de este punto de control coincide con una inestabilidad numérica.

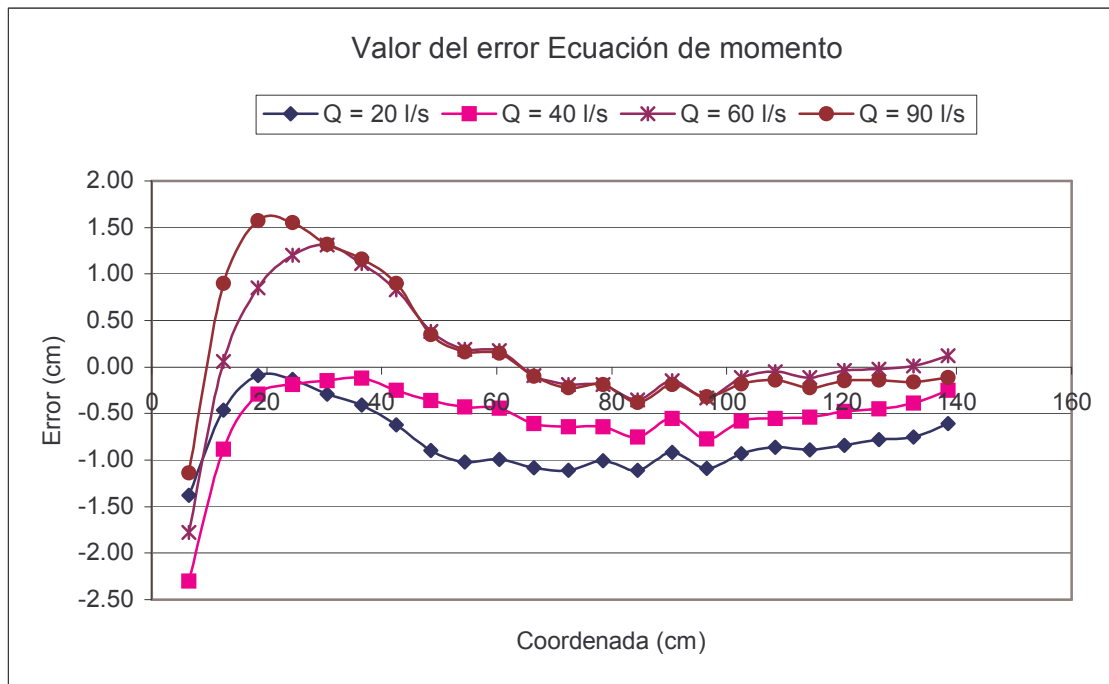
Para evitar este problema utilizamos dos modelos, uno de ellos aplica las ecuaciones del momento y de continuidad en régimen estacionario, resolviendo la ODE por el método de primer orden de Euler:

$$\frac{dh}{dx} = \frac{i - s_f + \left(\frac{Q^2}{gA^3} \right) \frac{dA}{dx} \Big|_{h=cte}}{\cos \mathcal{G} (1 - Fr^2)}$$

Donde h es el calado (m), x la coordenada longitudinal (m), A es área de flujo (m^2), g es la gravedad (m^2/s), Fr^2 es el número de Froude al cuadrado, \mathcal{G} es el ángulo de solera. Cerca del crítico se da una pendiente infinita, con lo que para garantizar la estabilidad del modelo limitamos la pendiente máxima. En el segundo modelo aplicamos la ecuación de la energía con el *step-method*, se resuelve iterativamente utilizando un esquema Newton-Rapson como la pendiente motriz se calcula como la media entre la pendiente de ambas secciones (anterior-siguiente) nos da un esquema de orden 2, es decir mayor que el de Euler. En este modelo se producía un salto en la zona del crítico ya que para evitar oscilaciones numéricas la lámina no tiene valores en $[0.9Y_c, 1.1Y_c]$ donde Y_c es el calado crítico.

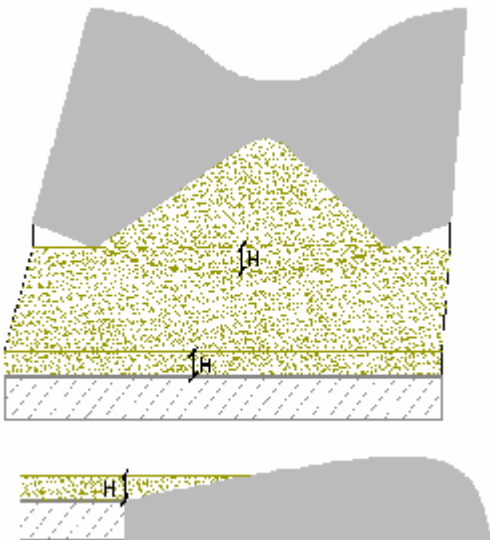


Los errores del modelo se acentúan en la zona del punto crítico pero en general son inferiores a un centímetro. Se puede apreciar que en casi todos los casos dan un calado algo superior al real del modelo.



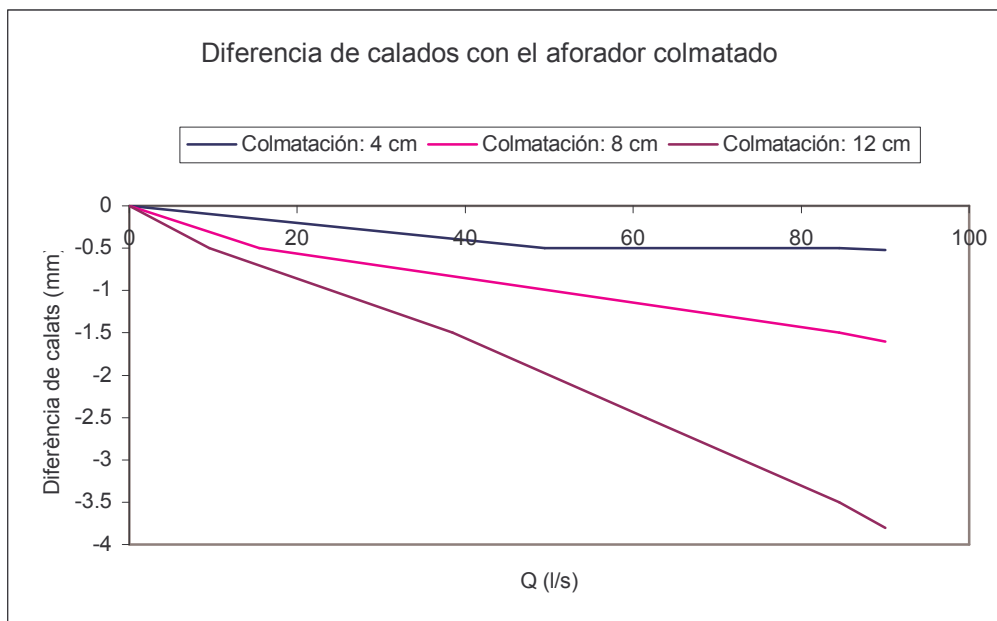
Para el primer modelo podemos ver que los errores son algo inferiores a lo largo de todo el eje longitudinal pero son claramente inferiores en la determinación del punto crítico llegando a un error máximo de 1.5 cm mientras el *step-method* daba errores mayores de 2 cm. La razón de esta mayor precisión en este método se debe a la mejor definición de la geometría para el método de Euler, ya que este admitía cálculo analítico de la geometría, mientras el *step-method* solo permitía una entrada de datos geométricos discretizados en pocos puntos.

Niveles de operatividad:



Debido al particular diseño del aforador existen contra pendientes de aproximadamente el 15%, esto hace que en un cauce natural se deban tener en cuenta los fenómenos de colmatación de sedimentos, para ello y aprovechando los modelos numéricos desarrollados se calcula la alteración en el aforo debida a una colmatación parcial por sedimentos.

Para diferentes hipótesis de colmatación en centímetros se miden las diferencias de calados obtenidas para los diferentes caudales. Se puede ver en los resultados que las diferencias en calado son máximas para 90 l/s y una colmatación de 12 cm. Este error en calado significaría una sobreestimación en el caudal del 2.64% con lo que el error asociado a una colmatación aunque esta sea máxima es aceptablemente reducido.



CONCLUSIONES:

-Hemos descrito la metodología empleada para la acotación de la geometría natural, su modelado matemático y su modelado físico.

-Hemos realizado una campaña experimental destinada a la elaboración de las curvas de aforo.

-El comportamiento del aforo resulta peculiar por el fenómeno de progresiva inundación de su superficie.

-Para caudales bajos tiene un comportamiento parecido a un aforador triangular.

-Para caudales altos su comportamiento es parecido a una sección de un canal funcionando en régimen normal.

-En ambos casos la relación caudal-calado es biunívoca por tanto adecuada para un aforo.

-Los modelos unidimensionales muestran las deficiencias asociadas a la presencia de regímenes críticos donde se incumplen las hipótesis de unidimensionalidad.

-La posible colmatación del modelo no interfiere excesivamente en los resultados.

AGRADECIMIENTOS.

Los autores agradecen la ayuda económica recibida por parte de la Escuela de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona (UPC) para la asistencia a este evento.

BIBLIOGRAFÍA:

- [1] Herschy, R.W. *Streamflow Measurement*. Elsevier Applied Science Publishers, 1985.
- [2] Pnueli, D. i Gutfinger, C. *Fluid Mechanics*. Cambridge University Press, 1992.
- [3] Jain, S. C. *Open-Channel Flow*. John Wiley & Sons Publications, 2001.
- [4] Bateman Pinzón, A. i Puertas Agudo, J. *Aguapucha. Programa de integración de curvas de remansao. Manual del usuario*. Departament d'Enginyeria Hidràulica, Marítima i Ambiental – ETSECCPB – UPC, 1989.
- [5] Nils Reidar B. Olsen. *A Three Dimensional Numerical Model for Simulation of Sediment Movements In Water Intakes With Multiblock Option (SSIIM). User's Manual*. Department of Hydraulic and Environmental Engineering - Norwegian University of science and technology, 2002.
- [6] Domingo i Melgosa, R. *Estudio teórico-experimental de un sistema de disipación de energia poco habitual al pie de una caída de agua*. Tesina d'especialitat ETSECCPB-UPC, 2003.
- [7] Bateman Pinzón, A. i Sánchez-Arcilla, A. *3rd IAHR Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics, Vol II*, 2003.