

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

**EVALUACIÓN DE LAS SOLICITACIONES HIDRODINÁMICAS
EN CUENCOS DISIPADORES DE ENERGÍA.
APLICACIÓN AL DIQUE LOS QUIROGA, ARGENTINA**

Claudio A. Fattor y Jorge D. Bacchiega

Laboratorio de Hidráulica, Instituto Nacional del Agua, C.C.21-(1802) Aeropuerto Ezeiza, Argentina

e-mail: cfattor@ina.gov.ar; dbacchiega@ina.gov.ar

RESUMEN

El estudio de las solicitaciones hidrodinámicas inducidas por el flujo sobre estructuras hidráulicas, tales como las losas de cuencos disipadores de energía, es un tema de importancia en el proyecto de este tipo de obras. En este artículo se presentan los lineamientos generales de la determinación de solicitaciones sobre losas de fondo según las investigaciones realizadas por el Instituto Nacional del Agua de Argentina y por Fiorotto y otros investigadores de la Universidad de Trieste (Italia).

Se aplican estos criterios al caso particular de la ampliación del cuenco disipador de energía del azud vertedor del dique Los Quiroga, complementándose los estudios con mediciones simultáneas de presiones en un modelo físico de esta estructura. Los resultados obtenidos ponen de manifiesto que se aprecian diferencias entre ambos criterios, los cuales resultan en valores de las fuerzas sustancialmente menores a los obtenidos tras la medición llevada a cabo sobre el modelo físico.

Estos resultados marcan la necesidad de considerar la realización de estudios específicos sobre las estructuras a evaluar, toda vez que las condiciones de borde sobre la misma se aparten de las analizadas en las investigaciones básicas.

ABSTRACT

The study of the hydrodynamics forces induced by the flow on structures hydraulics, such as the slabs of stilling basins, is a theme of importance in the project of this type of structures. In this article, the general features of the computation of solicitations on bottom slabs according to investigations carried out by National Institute of Water of Argentina and by Fiorotto and other researchers of University of Trieste (Italy) are presented.

These criteria are applied to the case of the modification of the stilling basin of Los Quiroga deviation dam, being the studies complemented with simultaneous pressure measurements in a 1:40 length scale physical model. The results show important differences among both criteria, with smaller forces to them obtained after the measurement carried out on the physical model.

These results mark the necessity of considering the execution of specific studies on the structures to evaluate, every time that the boundary conditions differs from that analyzed in the basic investigations.

PALABRAS CLAVES: Fuerzas hidrodinámicas, cuencos disipadores, losas.

INTRODUCCIÓN

Los cuencos disipadores de energía a resalto son estructuras fuertemente solicitadas por las acciones hidrodinámicas derivadas del pasaje de caudales de cierta importancia. Estas acciones pueden derivar, en casos extremos, en la ocurrencia de fenómenos de cavitación, vibraciones, fatiga de los materiales e inclusive en el levantamiento de las losas por el efecto combinado del campo de presiones fluctuantes y de la subpresión en la base de la losa.

En el presente artículo interesa fundamentalmente analizar el último de los puntos, abordándose exclusivamente el estudio de las solicitaciones hidrodinámicas en la base de un resalto.

Las principales investigaciones realizadas sobre el tema fueron dirigidas por R. Lopardo, en el Laboratorio de Hidráulica del Instituto Nacional del Agua de Argentina, dando lugar a los trabajos de Sauma Haddad (1994), Fattor (1996) y Lopardo (1996). Estos trabajos estuvieron fuertemente orientados a la caracterización del campo de fuerzas fluctuantes sobre las losas de fondo de un cuenco disipador plano con un resalto libre estable formado aguas debajo de una compuerta plana vertical. Los resultados más significativos han sido la obtención de coeficientes de fluctuación de fuerzas (C'_F) y de momentos (C'_M) para distintos números de Froude y distintas relaciones entre longitud y ancho de losa. Estos coeficientes han sido determinados a partir de la medición simultánea del campo de presiones fluctuantes sobre una serie de puntos sobre una superficie dada de una losa.

Por otro lado, un aporte muy significativo ha sido realizado por Fiorotto y Rinaldo (1992) y Bellin y Fiorotto (1995), en la que se ha efectuado la medición directa de las fuerzas de origen hidrodinámico sobre una losa de fondo de un cuenco.

En adelante se presentan los aspectos más relevantes de la determinación de solicitaciones hidrodinámica en la base de un resalto hidráulico, efectuándose una comparación de la aplicación de estos criterios para el caso del cuenco disipador del dique Los Quiroga, el cual fuera oportunamente estudiado por el Instituto Nacional del Agua.

OBJETIVOS

Los objetivos establecidos en el marco del desarrollo del presente artículo son los siguientes:

- Analizar las características generales y resultados más significativos de la determinación de las fuerzas fluctuantes mediante la integración del campo de presiones fluctuantes medido de manera simultánea en un número determinado de tomas piezométricas.
- Considerar los aspectos más importantes de la determinación de las fuerzas de origen fluctuante generadas por un resalto hidráulico libre en la base de un cuenco disipador obtenidas mediante la medición directa de fuerzas.
- Efectuar una comparación de las dos metodologías.
- Realizar una aplicación de ambas metodologías para el caso específico del cuenco del dique Los Quiroga.

CÁLCULO DE ESFUERZOS FLUCTUANTES POR VÍA DE LA MEDICIÓN SIMULTÁNEA DEL CAMPO DE PRESIONES

A los efectos de calcular los esfuerzos de origen fluctuante, se ha implementado un sistema de adquisición simultánea de presiones sobre “n” tomas dispuestas sobre una losa de longitud “a” y ancho “b”, tal como se observa en la Figura 1, analizando el caso de resaltos libres con números de Froude entre 3 y 6, y relaciones $3 < a/h_1 < 6$, siendo h_1 el tirante conjugado inicial.

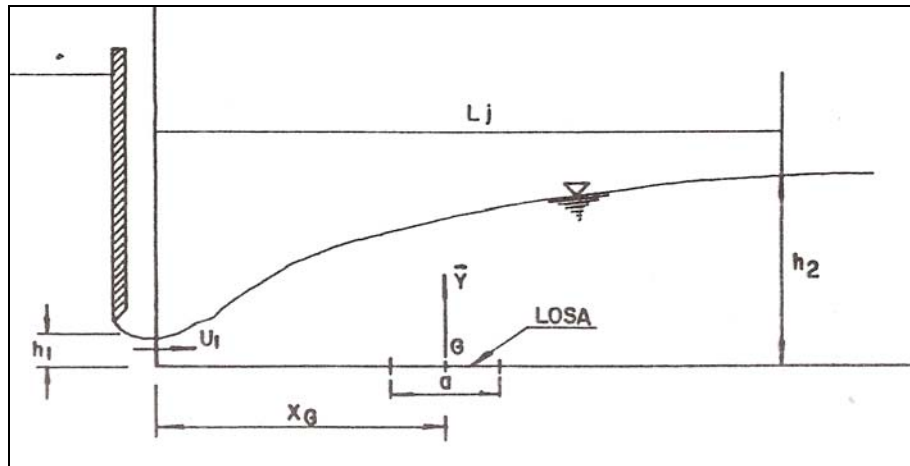


Figura 1.- Esquema general

Los coeficientes de fluctuación de fuerzas y momentos dependen de una serie de variables:

$$C'_F = \phi(F_1, x/h_1, z/h_1, a.b/h_1^2, a/b) \quad [1]$$

$$C'_{Mx} = \phi(F_1, x/h_1, z/h_1, a.b/h_1^2, a/b) \quad [2]$$

$$C'_{Mz} = \phi(F_1, x/h_1, z/h_1, a.b/h_1^2, a/b) \quad [3]$$

Tomando principalmente en cuenta el término C'_F , este queda expresado como:

$$C'_F = \frac{\sqrt{F'^2}}{1/2 \cdot \rho U_1^2 \cdot a \cdot b} \quad [4]$$

Los estudios experimentales arrojan, como resultado representativo la variabilidad de C'_F en función de x/h_1 para distintos valores de F_1 y a/h_1 , con una tendencia como la manifestada en la Figura 2.

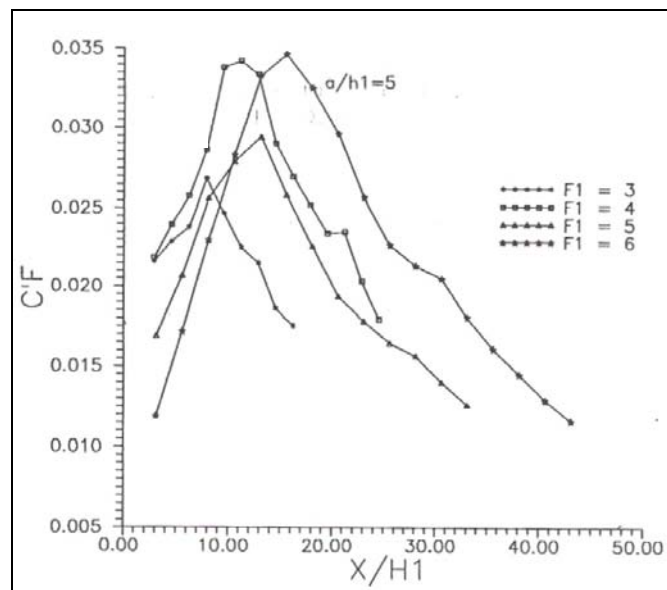


Figura 2.- Coeficiente de fluctuación de fuerzas

CÁLCULO DE ESFUERZOS FLUCTUANTES POR VÍA DE LA MEDICIÓN DIRECTA DE FUERZAS

Una vía alternativa para el cálculo de las solicitaciones máximas inducidas por la acción macroturbulenta del resalto es la propuesta por Fiorotto y Rinaldo (1992). Este criterio yace en la aplicación de la expresión [5], la que relaciona el espesor equivalente de las losas y los parámetros geométricos e hidrodinámicos:

$$\frac{s}{U_1^2/2.g} > \Omega \left(\frac{a}{h_1}, \frac{a}{\lambda_x}, \frac{b}{\lambda_y} \right) (C_p^+ + C_p^-) \frac{\gamma}{\gamma_c - \gamma} \quad [5]$$

, siendo “s” el espesor equivalente, Ω el coeficiente de uplift, λ_x , λ_y : escala integral longitudinal y transversal de presiones fluctuantes, C_p^+ y C_p^- los coeficientes de presiones positivas y negativas definidos por las diferencias de presiones $\Delta P_{\text{máx}}$ respecto del valor medio.

La condición límite de estabilidad se alcanza cuando:

$$\Omega = \frac{F'_{\text{máx}}}{(C_p^+ + C_p^-) \left(\frac{U_1^2}{2.g} \right) \gamma . a . b} \quad [6]$$

, siendo $F'_{\text{máx}}$:

$$F'_{\text{máx}} = s . (\gamma_c - \gamma) . a . b \quad [7]$$

En la Figura 3 se observa la curva de variación de Ω en función de b/h_1 para $F_1=5.7$ y distintos valores de a/h_1 .

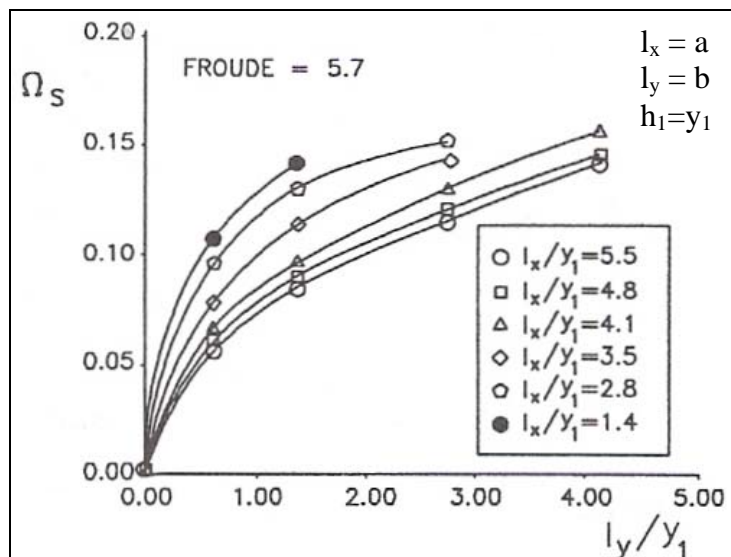


Figura 3.- Coeficiente de uplift para $F=5.7$

APLICACIÓN AL CUENCO DISIPADOR DEL DIQUE LOS QUIROGA

A los efectos de obtener una valoración concreta del cálculo de las fuerzas de origen fluctuante sobre una losa de referencia, se realizó una estimación de esta magnitud sobre una losa del cuenco disipador del dique Los Quiroga, emplazado en río Dulce, Santiago del Estero, Argentina.

Las losas analizadas corresponden a la prolongación prevista para el cuenco dissipador de energía, el cual tendrá una longitud de 10 m abarcando todo el ancho del azud vertedor, conformando losas cuadradas de 2 m de lado, tal como surge de la Figura 4.

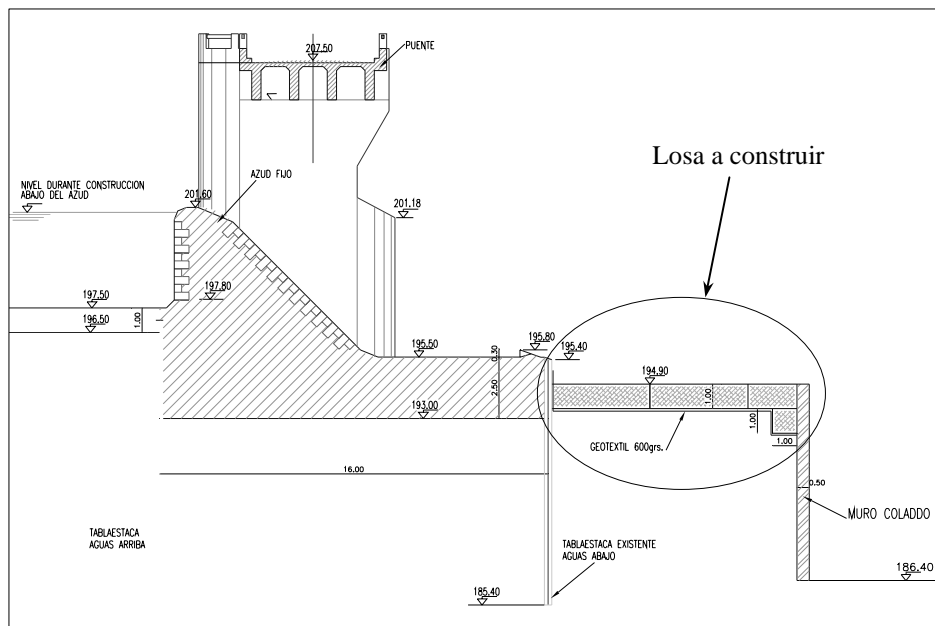


Figura 4.- Corte del azud fijo del dique Los Quiroga

En el presente caso se efectuó la medición de presiones fluctuantes de manera simultánea en un modelo físico a escala 1:40, integrándose de modo de obtener la fuerza instantánea, para finalmente determinar un valor de la fuerza asociado a una probabilidad de ocurrencia, siendo de interés las fuerzas de levantamiento más significativas, asociadas a bajas probabilidades de ocurrencia.

Asimismo, a partir de los parámetros adimensionales característicos se ha determinado la sollicitación sobre la losa aplicando el criterio de Fiorotto, observándose una buena correlación de los resultados.

Las condiciones analizadas para esta obra de dissipación de energía, situada aguas abajo de un azud fijo, han sido las ilustradas en la Tabla 1:

Tabla 1. Escenarios analizados

q (m ³ /s.m)	Froude	a/h ₁
1.88	2.80	5.90
3.13	2.26	3.64
4.69	1.92	2.49
7.50	1.58	1.60

Cálculo de las sollicitaciones mediante la aplicación de los criterios del INA y Fiorotto

Teniendo en cuenta los escenarios planteados en la Tabla 1, se han considerado las condiciones evaluadas en los ensayos de Lopardo et. al y Fiorotto que más se aproximan a las relaciones dadas por el número de Froude y el valor adimensional a/h₁, siendo “a” la longitud de la losa, tomada en la dirección del escurrimiento, y “h₁” el tirante conjugado inicial del resalto.

Es preciso tener en cuenta que tanto las experiencias realizadas por el INA como las ejecutadas por Fiorotto consideran un resalto hidráulico libre aguas abajo de una compuerta plana vertical, situación que difiere de la condición real que caracteriza la losa del cuenco dissipador de Los

Quiroga.

En este contexto, se ha tomado como referencia la primera de las condiciones, obteniéndose que los resultados asociados a cada uno de los criterios marcan diferencias importantes en los valores observados. La elección de la primera condición no se asocia con su grado de criticidad sino con la disponibilidad de referencias para su estimación.

La aplicación del criterio de Fiorotto encuentra algunas limitaciones en el rango de los números de Froude considerados, ya que sus experiencias parten de valores de $F_1=5,7$. Aún en ese contexto, y teniendo en cuenta las dimensiones de las losas involucradas, el valor del coeficiente Ω_s se ubicaría en el orden de 0,11. Por otro lado, este criterio requiere el conocimiento preliminar de los valores de C_p^+ y C_p^- , los cuales marcan valores máximos y mínimos, dados, por ejemplo, por Toso y Bowers (1988), que para el presente caso se sitúan en 0,70. Aún en estas condiciones, la estimación de las solicitaciones, probablemente en exceso, arroja un valor de 816 kgr sobre la losa de 2 m de lado.

Por otra parte, tomando como referencia las investigaciones del INA, para un número de Froude de 3 y una relación $a/h_1=5$, el valor de C'_F es aproximadamente 0,033, lo cual conduce a un valor medio cuadrático de la fuerza de 185 kgr, derivando en una fuerza máxima del orden de 540 kgr.

Cálculo de las solicitaciones mediante medición simultánea de presiones

Dado que las condiciones de borde que resulta de los valores de número de Froude y de las relaciones entre la longitud de la losa y el tirante conjugado inicial del resalto, son sólo aproximaciones al caso específico a resolver, pero especialmente que las condiciones del flujo entrante no responden estrictamente a las dadas por los criterios previamente evaluados, se ha implementado un registro simultáneo de presiones fluctuantes sobre una losa de referencia.

De los registros observados, se ha puesto especial énfasis en los valores extremos dadas por las presiones fluctuantes con 0,1% y 99,9% de probabilidad de no excedencia, los cuales arrojan los valores de fuerzas que se aprecian en la Tabla 2.

Tabla 2. Resultados de las mediciones

q (m ³ /s.m)	Froude	p0.1% (m)	F _{pt'} min. (kg)
1.88	2.80	0.48	1920
3.13	2.26	0.84	3360
4.69	1.92	0.07	280
7.50	1.58	-0.84	-3360

Dado que las losas son relativamente pequeñas, la correlación longitudinal y transversal de las presiones fluctuantes es prácticamente 1, lo cual no sucedería con losas mayores. En tal caso, se apreciaría un valor resultante de la fuerza sustancialmente inferior a la derivada del producto de la presión de referencia por la superficie de la losa.

De la lectura de la tabla precedente se observa que para la primera de las condiciones, el valor de la fuerza registrada sobre la losa de referencia es de 1920 kgr, sustancialmente mayor que la derivada de las estimaciones realizadas con los criterios anteriormente expuestos, que arrojaban valores de 816 kgr y 540 kgr respectivamente. Esta diferencia puede atribuirse a que las condiciones del flujo sobre la losa en estudio son disímiles a las consideradas en las investigaciones del INA y de Fiorotto, debido básicamente, a la separación que se genera en el ingreso de la lámina, la cual genera una acción dinámica tendiente a levantar la losa.

Para las demás condiciones, se aprecia que las fuerzas hidrodinámicas son aún más severas, llegando para el máximo caudal a una fuerza hidrodinámica ascensional que debe ser compensada con el peso de la losa o un eventual anclaje de la misma.

CONCLUSIONES

- Se ha realizado un análisis de la determinación de las sollicitaciones de origen fluctuante sobre losas de fondo de cuencos disipadores a resalto, considerando dos metodologías diferentes.
- Estos criterios están dados por la medición simultánea de presiones fluctuantes y su integración sobre un área dada, y por la medición directa de fuerzas.
- Se ha efectuado una aplicación de los dos criterios al caso específico para la extensión del cuenco disipador a resalto del dique Los Quiroga, habiéndose procedido además a la medición simultánea de presiones en un modelo físico a escala 1:40.
- Se observaron algunas diferencias de resultados que estarían derivadas de la propia metodología así como de la diferencia entre las condiciones del flujo aguas abajo de un vertedero y las dadas aguas abajo de una compuerta vertical.
- La medición simultánea de presiones sobre la losa y su integración ha permitido corroborar que los esfuerzos dinámicos son mayores a los estimados mediante los criterios del INA y de Fiorotto, encontrándose esta diferencia en las condiciones particulares de ingreso del flujo a la losa, las cuales no coinciden con las evaluadas en las investigaciones básicas.
- La aplicación de estos criterios es absolutamente válida y de suma importancia en aquellas estructuras que presenten rangos de funcionamiento y condiciones de borde que guarden similitud con los escenarios evaluados en las investigaciones mencionadas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bellin, A. and Fiorotto, V.** (1995). "Direct Dynamic Force Measurement on Slabs in Spillway Stilling Basin". *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 121, No. 10, October 1995, pp. 686-693.
- Fattor C., De Lío, J. y Lopardo R.** (1996). "Alternative forces on slabs in an energy dissipater". *Ist. International Conference on Rivertech '96: New/Emerging Concepts for Rivers*, Illinois, U.S.A., Setember 1996.
- Fiorotto, V. and Rinaldo, A.** (1992). "Fluctuating uplift and linings design in spillway stilling basins". *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 118, No. 4, April 1992, pp. 578-596.
- Lopardo R. et al.** (1996). "Influencia de la distribución de tomas de presión sobre el cálculo de los esfuerzos fluctuantes en flujos macroturbulentos". *XVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, Guayaquil, Ecuador, Octubre 1996.
- Toso, J. and Bowers, E.** (1988). "Extreme Pressure in Hydraulic Jump Stilling Basin". *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 114, No. 8, August 1988, pp. 829-843.
- Sauma Haddad, J., De Lío, J. y Lopardo R.** (1994). "Estimación de esfuerzos dinámicos aleatorios actuantes sobre losas de cuencos amortiguadores". *XVI Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, Santiago, Chile, Noviembre 1996.