

Presiones medidas en la base de una losa de fondo con juntas paralelas al flujo en un canal

Measured pressures on the basis of bottom slab with gaps in the flow direction in a channel

Edwin Hurtado Orobio, Efraín del Risco Moreno, Mauricio González Betancourt*

Universidad del Valle, Ciudad Universitaria Meléndez, Calle 13 N.º 100-00, edificio 344 oficina 2012, Cali, Valle, Colombia

(Recibido el 25 de marzo de 2008. Aceptado el 6 de noviembre de 2008)

Resumen

Se estudió si las aristas traseras de las juntas longitudinales de una losa de piso, fija al fondo de un canal con flujo supercrítico, convierten energía cinética en energía de presión en el rango de números de Froude de 2,84 a 10,12. En cada prueba, se midió la presión en 16 puntos de su cara inferior, con transductores piezoresistivos en tres líneas longitudinales: una central con 8 sensores y dos laterales, a lado y lado de la primera, con cuatro sensores cada una. De esta forma, se determinó la distribución de las presiones medias debajo de la losa ensayada, similar a las usadas en obras civiles para evitar la acción erosiva de la turbulencia de un flujo supercrítico. El análisis de las presiones medidas muestra que, aún cuando las caras superiores del piso del canal y del bloque protector estén en el mismo plano horizontal, las aristas traseras de las juntas longitudinales transforman energía de velocidad en energía de presión. Así, se ha detectado un factor que interviene en la generación de la fuerza hidrodinámica que levanta revestimientos de diverso tipos de estructuras, hasta ahora ignorado en el estudio de este problema.

----- *Palabras clave:* Presión hidrodinámica, levantamiento, losas, modelo hidráulico, tanques amortiguadores.

Abstract

A study was conducted to determine whether the back edges of the longitudinal gaps of a floor tile fixed to the bottom of a canal with a supercritical flow convert kinetic energy into pressure energy using Froude numbers in the range of 2.84 to 10.12. In each test the pressure was measured on 16 points

* Autor de correspondencia: teléfono: + 57 + 2 + 321 21 53 ext. 119, fax: + 57 + 2 + 321 21 53, correo electrónico: efdelris@univalle.edu.co (E. Risco).

on the bottom surface of the tile with piezo-resistive transducers along three longitudinal lines: one central line with 8 sensors and two lateral lines with 4 sensors each on either side of the central line. In this manner the distribution of the median pressures under the test tile was determined. The test tile is similar to those used in civil engineering structures for the purpose of avoiding the erosive action of the turbulence of a supercritical flow. The analysis of the measured pressures shows that even when the top surfaces of the canal floor and of the protective block are in the same horizontal plane, the back edges of the longitudinal gaps transform the energy of velocity into pressure energy. In such a way a factor has been identified that intervenes in the production of the hydrodynamic force that lifts revetments of different structures, and that has until now been ignored in the study of this problem.

----- *Keywords:* hydrodynamics pressure, uplift, linings, slabs, hydraulic model, stilling basins

Introducción

Algunas estructuras que conducen grandes caudales y transportan flujos de gran velocidad (canales de control de avenidas, túneles de hidroeléctricas, rápidas de aliviaderos y tanques amortiguadores) o que viajan a grandes velocidades (transbordadores espaciales), se recubren externamente con una capa protectora sólida contra la acción erosiva del flujo o el calentamiento generado por la fricción. Otras estructuras, hechas para soportar cargas cíclicas y facilitar el desplazamiento de vehículos (pavimentos rígidos de vías), a veces interactúan con corrientes rápidas en eventos naturales súbitos de corta duración (arroyos), sin estar diseñadas para esta situación. Es claro que ellas comparten el interactuar con un flujo de gran velocidad y tener la protección de una capa sólida, para evitar el agrietamiento por gradientes de la temperatura ambiente del medio donde operan.

El diseño estructural del revestimiento de esas estructuras considera que el recubrimiento no es continuo y lo forman losas con juntas de dilatación selladas con un material capaz de modificar su volumen sin dejar de impermeabilizar el espacio que sella [1 - 9]. Así, se controlan las contracciones o expansiones de los bloques por gradientes de temperatura y se evita, en las condiciones de operación del dispositivo, la conti-

nuidad del medio fluido para la transmisión de fuerzas hidrodinámicas desestabilizantes. Pero, pese al cuidado puesto en su diseño y construcción, esos revestimientos a veces resultan dañados porque aún no se comprende bien este problema de interacción flujo tangente-estructura y se desconocen aspectos decisivos en la falla que no toman en cuenta los modelos probabilísticos actuales. Esta falencia condujo a la destrucción de grandes extensiones de superficies revestidas en grandes represas -Karnafuli [10], Malpaso [11], [(Tarbela en Pakistan, Bhakra en la India; Bratsk, Boutcharnisk, Pavlosk, Krasnoiarsk, Sayano-Sushenskoe, en la ex USSR; Pit 6, Pit 7 y Folsom, en USA), [12] y en Liu Jia-Xia y Wu Qiang-Xi [13] en China- con grandes costos de reconstrucción y dolorosas pérdidas humanas.

Por lo anterior, en obras estratégicas de gran escala o en aparatos de alta tecnología con exigencias extremas de seguridad, garantizar la estabilidad dinámica del revestimiento se ha convertido en una prioridad que asegura la integridad de todo el dispositivo y evita la pérdida de vidas y de ingentes cantidades de dinero [14, 15, 16, 17]. A raíz de las experiencias destructivas en revestimientos de estructuras de diferentes tipos, se inició el estudio de este problema con los matices propios de las áreas de la ingeniería generadoras del producto o con la visión de quienes investigan según la orientación de su disciplina. Es así cómo,

mientras unos buscan soluciones al problema a partir de un enfoque probabilística, al considerar a las fluctuaciones de presión como variable estocásticas, otros optan por aplicar un análisis determinístico con base en la física involucrada en el problema. Entre los primeros destacan quienes tienen formación en hidráulica [4, 15-24]. En cambio quienes trabajan con la visión de la mecánica de fluidos buscan las causas del levantamiento a través de las leyes de la dinámica [25-30].

Ante esa disyuntiva, los autores de este artículo decidieron analizar las juntas entre losas de fondo no sólo como conductos que transmiten las fluctuaciones turbulentas de presión del flujo sobre el revestimiento, como hasta ahora se ha hecho, sino también como cavidades con el mismo fluido del flujo rasante sobre ellos, el cual les puede transferir energía por colisión. Con ese fin, se postuló que la fuerza dislocante se produce sí y sólo sí el sello entre bloques es removido por las sollicitaciones turbulentas del flujo o por alguna otra razón. Así, el agua se filtra a las juntas y de éstas a la cara inferior de cada bloque, creándose el medio para que una fracción de la energía cinética del flujo, convertida en energía de presión en las aristas traseras de las juntas normales al flujo, se transmita a la base del revestimiento. Sin embargo, como las juntas de una losa tienen orientación diferente en el piso del canal, se juzgó primordial analizar por separado el efecto de las juntas paralelas al flujo del que produce las juntas transversales a la corriente, puesto que sus longitudes en el sentido de ésta difieren en varios órdenes de magnitud. Asimismo, se estimó importante aislar las fluctuaciones de presión por el movimiento vertical del agua de las que se originan en la conversión de energía de velocidad en energía de presión en la arista trasera de una junta paralela al flujo. Por esta razón, el estudio se limitó a analizar la posible conversión de energía cinética en energía de presión en las aristas traseras de las juntas longitudinales cuando el flujo es supercrítico.

Para evaluar las hipótesis anteriores se ideó y construyó un dispositivo experimental que permite averiguar cómo se distribuye la presión

debajo de una losa con sus juntas longitudinales abiertas y sujetas a un flujo de gran velocidad. La losa fue una caja rectangular de acrílico, con tapa superior y lado mayor en la dirección del flujo, pegada a la cara inferior del piso en lámina de acrílico del canal, quedando así fija. Para simular la cavidad que la aloja, se pegó otra caja sin tapa superior a la cara inferior del piso, de modo que fuera concéntrica con la primera y la contuviera. Las juntas longitudinales resultaron al hacer el ancho de la caja externa ligeramente mayor al de la interna, para formar entre ellas dos cavidades largas en el sentido del flujo pero angostas en la dirección normal a él, de ancho igual al de dos ranuras también longitudinales que atraviesan el piso del canal. Así, al acoplarse esas ranuras en el piso del canal con las cavidades longitudinales entre cajas se logró simular una losa del piso del canal con juntas paralelas al flujo. Con este arreglo se pudo ensayar con sus fondos haciendo contacto, condición no estudiada hasta ahora, o separados por una película de agua, situación analizada sólo para una separación de 2 mm con base en supuestos o estudios teóricos [14, 31], pero que aquí se examinó midiendo la presión debajo del elemento de protección para ver si se amortigua o no por efecto de ese parámetro. Un aspecto a resaltar, es que el dispositivo usado permitió analizar el efecto de las aristas normales superiores de las juntas longitudinales en el mismo plano horizontal. Con esto se quiso evitar la conversión de energía cinética del flujo en energía de presión por colisión con algún desnivel de la cara posterior que aloja al bloque. Además, se quería demostrar que aun cuando las aristas normales al flujo de una junta están en el mismo plano horizontal, es factible la conversión de su energía cinética en energía de presión en la cavidad por choque con las aristas posteriores, energía que se propaga a la cara inferior del bloque si ésta también es mojada por el fluido.

Resumiendo, el estudio aquí reportado fue exploratorio y tuvo como fin exclusivamente evaluar la conversión de energía cinética en energía de velocidad en las aristas traseras de las juntas longitudinales cuando los valores del número de Froude variaron entre 2,84 hasta 10,12, condiciones que

se lograron variando el caudal y la altura del orificio de alimentación, y separaciones entre losas y asiento de 0, 0,2, 0,5, 1 y 2 mm.

Aproximación a la interacción flujo-junta longitudinal

Las ideas que siguen resultan de la teoría del flujo cortante sobre una cavidad rectangular transversal a un flujo, aunque se reconoce que las juntas longitudinales de revestimientos de fondo son mucho más estrechas en la dirección normal al flujo que las cavidades usadas como referencia. Sin embargo, aún así cuando esas juntas carecen de sello son cavidades expuestas a un flujo rasante. Por esta razón, enseguida se analiza cualitativamente la interacción flujo - juntas longitudinales de una losa de piso con base en algunos aspectos del flujo tangente a una cavidad rectangular transversal, en un esfuerzo por comprender la conversión energía cinética en energía de presión por colisión de la frontera inferior del flujo con las aristas traseras de esas juntas. Al respecto se puede decir que por ser las juntas de interés muy angostas, el flujo en ellas será bidimensional, es decir no tendrá componente de la velocidad en la dirección transversal al eje longitudinal del canal. Además, por transferencia de momentum del flujo principal al fluido en su interior en éste, el flujo secundario tendrá movimientos de translación y de rotación. Así mismo, por la velocidad del flujo principal y la gran extensión de las juntas paralelas en la dirección de aquel, en el primer tipo de movimiento, por lo menos a nivel de su cima, las partículas fluidas se moverán en el sentido del flujo sobre el bloque y la velocidad de éstas será función de su posición respecto a la arista superior delantera y de su distancia respecto al fondo de esas juntas.

Por otro lado, como la cara delantera de la junta y su fondo forman un escalón descendente, inmediatamente después de ese borde se debe desarrollar el vórtice que sigue a una expansión de la frontera inferior del flujo. Una situación similar debe ocurrir en la cara posterior de las juntas salvo que ahora, debido a que el fondo y la cara forman un escalón ascendente que sube la frontera

inferior del flujo una altura igual a la profundidad de la junta, delante de la cara trasera de las juntas se debe generar el vórtice del escalón ascendente. Sin embargo, como el fondo de las juntas y sus caras delantera y trasera forman un ángulo recto, los vórtices en esas esquinas a su vez deben formar otros vórtices de menor escala, en un número que dependerá de la velocidad del flujo y de su razón profundidad-largo. En consecuencia, en las juntas longitudinales los movimientos de rotación estarían asociados a dos vórtices principales y otros secundarios de menor tamaño, colindantes con las esquinas formadas por su fondo y sus caras transversales al flujo, figura 1.

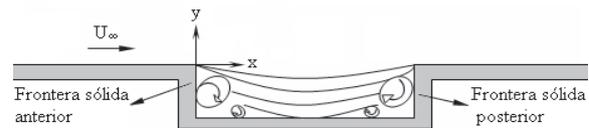


Figura 1 Patrón de flujo turbulento sobre una junta con gran longitud en el sentido principal del flujo

Los argumentos expuestos sobre el patrón de flujo dentro de las juntas de interés son factibles de ampliar si se considera que el tamaño de los vórtices de las esquinas será mayor cuanto más grande sea la velocidad del flujo y que probablemente para la misma condición el vórtice trasero será más grande que el delantero, debido a que la resistencia al flujo que ofrece un escalón ascendente es mayor que el descendente. Adicionalmente, por el hecho de ser las juntas paralelas al flujo demasiado angostas, la proximidad de sus paredes longitudinales frenará el movimiento de translación de las partículas fluidas en su interior, por lo que el mezclado turbulento puede ser tan pequeño que es factible asumir el flujo en esas juntas como laminar. Esta suposición conduce a ignorar lo que ocurre en el interior de las juntas en estudio y centrar los esfuerzos en el movimiento del fluido en su cima como una forma de aproximarse a la comprensión de la conversión de energía cinética en energía de presión en la arista trasera de cada una de las juntas longitudinales. Para alcanzar el objetivo antes propuesto

se supone que el mezclado entre el flujo y las juntas de interés se restringe a la zona de cortante de un flujo de capa límite [37], con espesor en la dirección vertical proporcional a la distancia desde la arista delantera de una junta longitudinal, a la que se supone se comporta como un chorro plano bidimensional.

Lo anterior equivale a asumir que la conversión de energía de velocidad en energía de presión está ligada básicamente a la energía cinética de las partículas fluidas en la cima de las juntas en estudio, esto es, con aquellas que partiendo desde el reposo en sus aristas delanteras alcanzan su máxima velocidad en un entorno próximo a las aristas traseras de las mismas, antes de colisionar con ellas. De modo que el choque de la capa cortante con las aristas traseras de las juntas longitudinales convertirá a esos bordes en pequeños segmentos de estancamiento donde la frontera inferior del flujo sobre la losa cede energía al fluido en esas juntas. Por su puesto que el efecto antes descrito aumentaría la presión en el extremo corriente abajo de las juntas longitudinales. Esta condición y la posible disminución de la presión en el extremo opuesto de esas juntas, como producto de la aceleración que experimentaría las partículas fluidas en esa zona de la capa cortante, son factores que inducen a pensar en una propagación de la presión hidrodinámica desde las aristas traseras hacia sus homólogas delanteras. Sin embargo, igual comportamiento se espera debajo de la losa debido a que al no haber juntas transversales, en principio la presión allí debería ser puramente hidrostática. Pero como esta presión sería menor a la existente en la parte trasera de las juntas longitudinales, entonces la presión en éstas se debe propagar hacia toda la cara inferior de la losa. De esta manera en esa cara del revestimiento la presión debe estar ligada a un gradiente de presión positivo producto de la conversión de energía en las aristas traseras de las juntas longitudinales y de la transferencia de momentum del flujo principal al fluido en ellas.

Por su parte, el efecto de la separación losa y piso sobre la presión debajo de ella, puede ser analizado en dos condiciones: 1) cuando las superficies

en mención tienen una película mínima de fluido debido a sus imperfecciones y 2) cuando la separación entre superficies se establece de manera predefinida. En este último caso la proximidad entre placas determina que el flujo que entre ellas se pueda analizar como un *flujo de Couette*, es decir como el que tiene lugar entre placas paralelas de ancho infinito en el plano del movimiento del fluido y de separación mínima entre sí. En cambio en el primer caso se espera que el flujo debajo de la losa sea como en un micro canal caracterizado porque el fluido en la frontera sólida no satisface la condición de no deslizamiento, es decir el fluido en contacto con la pared tiene velocidad. Por eso, en lo que sigue se partirá del supuesto de que la presión debajo del bloque varía linealmente en la dirección del eje longitudinal del canal y que además depende de la separación entre su cara inferior y el fondo de la cavidad que lo contiene.

Instalación experimental

El estudio se realizó en el canal experimental del Laboratorio de Fluidos e Hidráulica de la Universidad del Valle. El dispositivo es de circuito cerrado, con los componentes mostrados en la figura 2.

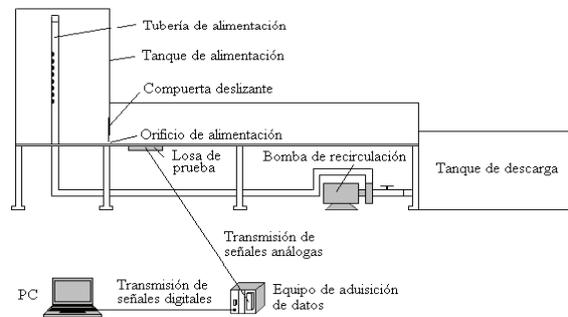


Figura 2 Instalación experimental

La velocidad del flujo en el canal la impuso la columna de agua que se formaba en el tanque de alimentación debido a un orificio rectangular inferior que conectaba a éste con el canal; el ancho del orificio era igual al del canal y su altura se varió con una compuerta deslizante. De este modo,

al fijar la altura del orificio y variar la abertura de la válvula de control a la salida de la bomba se establecieron diferentes alturas de la columna de agua en el tanque de alimentación a cada una de las cuales correspondió determinada velocidad. Así fue posible generar flujos con números de Froude desde 2,84 hasta 10,12, cuando las aberturas del orificio fueron de 2,5, 3,5, 4,5 y 5,5 cm y las separaciones entre losa y piso de 0, 0,2, 0,5, 1 y 2 mm. La losa de prueba, el piso que protege y las juntas longitudinales se simulaban con dos cajas concéntricas huecas construidas en lámina de acrílico transparente de 5 mm: una interna con tapa (losa) con dimensiones externas de 295 mm de largo por 155 mm de ancho y 30 mm de altura y otra externa del mismo material pero sin tapa (piso y paredes de las losas vecinas) con dimensiones internas de

295 mm de largo por 159 mm de ancho y 30 mm de altura. Así se obtuvo una losa de 295 mm de largo por 155 mm de ancho y 30 mm de altura y dos cavidades longitudinales de 2 mm de ancho (dimensión normal al flujo), 30 mm de profundidad y 295 mm de largo (dimensión en el sentido de flujo). Esas cajas, al pegarse a la cara inferior del piso del canal de manera que se acoplaran con dos ranuras longitudinales de 2 mm (dimensión normal al flujo) y 295 mm de largo (dimensión en el sentido del flujo) y 5 mm de profundidad (espesor del piso), formaron la losa de prueba de 295 mm de largo por 155 mm de ancho y 30 mm de altura (caja interna) y dos juntas longitudinales de 295 mm de largo por 2 mm de ancho y 35 mm de profundidad más el espacio losa-piso, separadas entre sí 155 mm en la dirección transversal, figura 3.

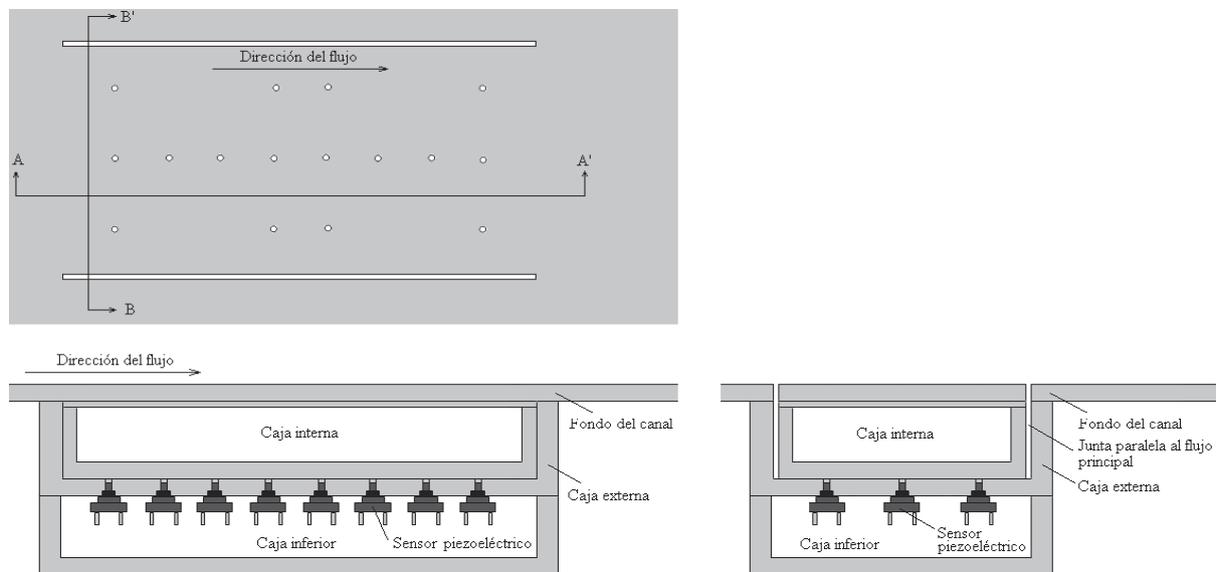


Figura 3 Ranuras longitudinales sobre el fondo del canal y distribución de las tomas sobre la superficie inferior de la caja externa y arreglo longitudinal y transversal de cajas acopladas al fondo del canal experimental (corte A-A' y B-B')

Por su parte, la separación losa-piso se logró interponiendo entre la cara interna de la base inferior de la caja externa y la cara externa de la base de la caja interna anillos de 1 mm de diámetro

hechos en lámina de aluminio del espesor requerido para lograr la separación deseada.

En síntesis, el arreglo para la medición de presión antes descrito permitió medir ésta variable simul-

táneamente en 16 puntos de la cara horizontal inferior de la losa de prueba. Como característica adicional, la distribución de sensores ofreció la posibilidad de tener cuatro líneas de medición normales al flujo, con 3 sensores cada una, y cuatro con un solo sensor en la misma dirección, todos ellos sobre la línea central coincidiendo con el eje longitudinal de la losa.

Instrumentación y sistema de adquisición de datos

La presión en la cara horizontal inferior de la losa se midió con sensores integrados de presión Motorola MPXV 4006GC7U Case 480D, montados en bases para la alimentación de corriente y transmisión de la señal medidas al sistema de adquisición de datos, todas ellas distribuidas en una tarjeta electrónica diseñada y construida en la Universidad del Valle, figura 4.

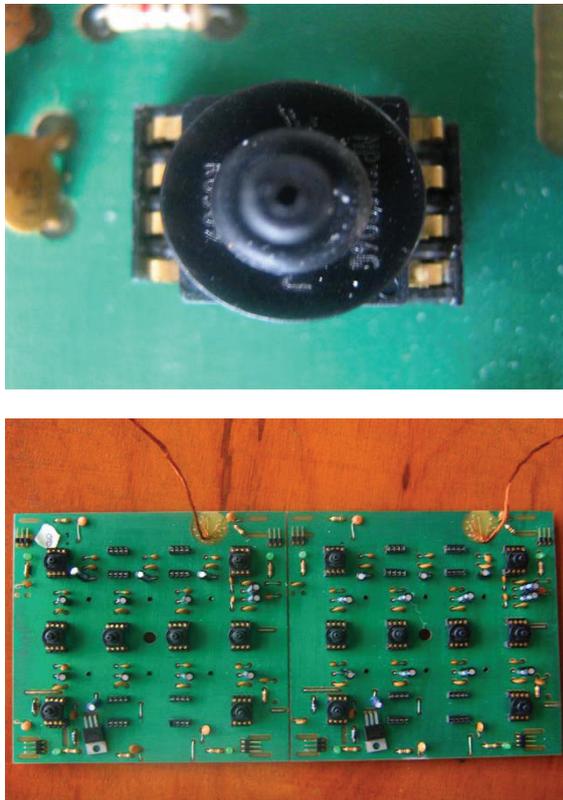


Figura 4 (a) Sensor piezoeléctrico Motorola MPXV 4006GC7U y (b) Tarjeta electrónica porta sensores

La tarjeta de 293 mm de largo por 153 mm de ancho y 2 mm de espesor, fue concebida para contener cada una tres líneas de medición longitudinales: una central con 8 transductores piezoresistivos de presión distantes entre sí 3 cm (los primeros y los últimos están a 3.5 cm de los extremos de la losa de prueba), y dos líneas laterales respecto a la central con cuatro sensores cada una, a fin de alcanzar la mayor información posible de la distribución de presión en la cara horizontal inferior de la losa de prueba con 16 sensores, la mitad del número máximo de canales con que cuenta el sistema de adquisición de datos. Para lograr este objetivo, la tarjeta se colocó en el interior de la caja inferior a fin de medir la presión en la cara inferior de la losa de prueba (caja interna); esto implicó la construcción de una caja de iguales dimensiones que la caja externa, la cual se ubicó exactamente debajo de ésta última.

La presión registrada por los sensores se acondicionó y transmitió a un computador portátil Toshiba Qosmio usando un sistema de adquisición de datos *National Instruments* con los siguientes módulos 1) *Chasis*, aislado contra ruido, tiene fuente de corriente directa y circuito de control de los 4 módulos en él instalables, es de propósito general y posee un sistema de instrumentación integrada, 2) Módulo de entrada de multiplexor, elemento NI SCXI-1104, con ajustes de ganancia programables, filtrado paso bajo a un rango máximo de muestreo de 333 KS/s, para su control se sugiere el uso del módulo NI SCXI-1600 (USB), 3) Módulo digitalizador, dispositivo NI SCXI-1600, es un convertidor analógico digital a 16 bits con rango de muestreo de 200 mil muestras por segundo (200KS/s); este módulo recibe señales analógicas de otros módulos y amplifica, digitaliza y envía, a través de un puerto USB, entradas y salidas digitales, y salidas analógicas de módulos de acondicionamiento de señales y 4) Multiplexor, un bloque Terminal NI SCXI-1300, de 32 canales para módulos SCXI; consta de 72 terminales tipo tornillo, un sensor de temperatura de junta caliente, 32 terminales tipo tornillo que conectan a 32 entradas diferenciales de un módulo de acondicionamiento de señal y dispone de dos terminales tipo tornillo para aterrizar el cha-

sis; este dispositivo en las condiciones actuales puede registrar 32 señales analógicas absolutas o 16 señales analógicas diferenciales.

La velocidad se midió con un tubo de *Pitot* estático. El número de pruebas generadas por las distintas condiciones hidrodinámicas ensayadas se

recopilan en la tabla 1, donde también se muestran los parámetros dimensionales y adimensionales, las separaciones entre la losa experimental y la superficie donde asienta; en ella además se indican las variables de trabajo y los parámetros adimensionales más adecuados para la presentación y análisis de los datos.

Tabla 1 Número de pruebas para distintas condiciones hidrodinámicas analizadas

Abertura de compuerta (m)	Número de pruebas para distintas separaciones entre la losa experimental y superficie de apoyo					Parámetros dimensionales	Parámetros adimensionales
	0 mm	0,2 mm	0,5 mm	1 mm	2 mm		
	0,025	3	3	3	3		
0,035	4	4	4	4	4		
0,045	0	0	0	5	5		
0,055	5	5	5	5	5		

Donde U_{∞} es la velocidad de la corriente principal, Q el caudal circulante a través del orificio de alimentación y Fr el número de Froude.

Procedimiento experimental

En cada prueba una vez definida la altura del orificio de alimentación, se procedía a la calibración de los transductores de presión para lo cual se les aplicaba columnas de agua desde alturas de 2 cm hasta 18 cm, con incrementos de 2 en 2 cm. Para tal efecto se confinaba el agua en la zona de prueba mediante una pared de acrílico de 25 cm de altura y ancho igual al del canal, cuyo perímetro de contacto con las paredes del canal se sellaban con material limpia tipo. Estos registros se procesaban para obtener los parámetros de sensibilidad y *offset* de la curva de calibración que relaciona los voltajes con las presiones. La mayor parte de los datos de sensibilidad y tendencia de los datos verificaban las características de linealidad de los sensores. La primera de éstas características se

logró cuantificando repetidas veces la razón entre el voltaje de salida y la presión aplicada resultado que se aproximó a los 766mV/kPa, reportado por el fabricante; la linealidad se verificó al graficar los datos presión aplicada voltaje de salida como se puede ver en las gráficas de la figura.

En cuanto a la precisión y exactitud de la mediciones realizadas, la información suministrada por el fabricante se verificó a través de un análisis estadístico a fin de conocer que tanto se aproxima la presión medida por los sensores a la presión de la columna de agua aplicada; estas mismas pruebas sirvieron para determinar la exactitud de la medición realizada con esos transductores. La exactitud fue de $\pm 5 \% V_{FSS}$.

Resultados y discusión

El producto del trabajo experimental realizado se condensa en las gráficas presentadas en las figuras 5 a 9 de los datos reducidos de la presión medida P_i debajo de la losa de prueba, adimensionalizada

con la presión estática $P_e = \gamma h$ en la misma cara donde h es la altura desde la superficie libre del flujo a la base de la losa de prueba y γ es el Peso específico del agua (9.8 KN/m^3). Los valores de esta razón se indican en las ordenadas de las gráficas citadas y en sus abscisas se presenta la razón de la posición del punto de registro de la presión medida (X_i), referido al orificio de alimentación de agua al canal, y la posición de la última línea de los sensores (X_g), medido respecto a la misma referencia.

De las figuras 5 a 9 es evidente que la presión debajo de la losa de prueba aumenta en la dirección del flujo encima de ella, lo que revela que en esa frontera del espécimen ensayado existe un gradiente de presión adverso. También es claro que ese comportamiento de la presión en la cara inferior de la losa se debe a la colisión de la frontera inferior de la corriente fluida en el canal con las aristas posteriores de las juntas. En efecto, de los estudios de interacción flujo-cavidad transversal de fondo se sabe que al contacto del flujo principal con el fluido refrenado en una cavidad de piso se forma una interfase entre ambos conocida con el nombre de capa cortante. Esa capa inicia en la esquina delantera de la cavidad, producto de la expansión hacia abajo de la frontera sólida del flujo, y se extiende a lo largo de su cima hasta su esquina trasera, donde transfiriere cantidad de movimiento del flujo principal al fluido en ella, al colisionar con ese borde y la pared trasera de la cavidad. A consecuencia de este proceso aumenta la presión en la arista y pared posterior de la cavidad mientras que en la esquina opuesta se da inicio al proceso de mezclado entre el flujo principal y el fluido refrenado, lo que conduce a la formación de la capa cortante porque desde ese borde se invalida la condición de no deslizamiento. Es así como se dan las condiciones para que el incremento de presión en la pared trasera se propague hacia la pared opuesta de la cavidad donde llegará a ser próxima a la presión estática, al ser mínima la velocidad del fluido en esa zona debido a la expansión de la frontera y a que desde allí se empieza la transferencia de cantidad de movimiento entre un fluido refrenado y flujo rápido.

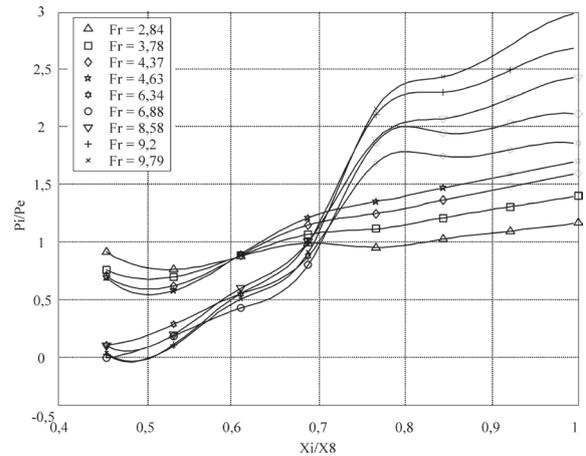


Figura 5 Distribución de presiones adimensionales debajo de una losa experimental en función de la posición adimensional, para una separación nula entre ésta y la superficie de apoyo

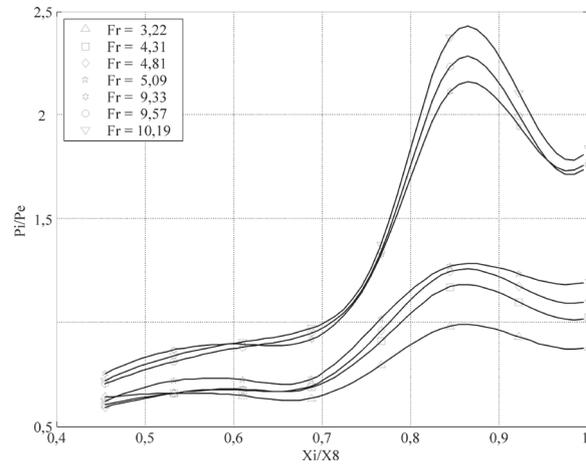


Figura 6 Distribución de presiones adimensionales debajo de una losa experimental en función de la posición adimensional, para una separación de 0,2 mm entre ésta y la superficie de apoyo

Por tanto, la distribución de presiones producto de las mediciones realizadas indican que las juntas longitudinales por ser cavidades expuestas a un flujo cortante responden tal cual, salvo que en este caso, debido a la gran razón de aspecto largo/profundidad, el gradiente de presión adverso

en el interior de ellas es en principio más notorio. Por otro lado, de acuerdo al conocimiento existente acerca de la interacción de flujo cortante con una cavidad de fondo, el comportamiento de la capa cortante depende del número de Reynolds función de la profundidad Re_d y de la razón de aspecto largo-profundidad de la cavidad b/d , y se caracteriza por presentar un movimiento ondulatorio cuando el flujo es laminar. Pero, al aumentar la velocidad del flujo exterior a la cavidad crece el mezclado turbulento entre el flujo principal y el fluido en ella, ocasionando inestabilidades que producen fluctuaciones de presión en su esquina trasera alrededor de un valor medio. Sin embargo, en el caso que nos ocupa la razón ancho-profundidad w/d de las juntas es muy pequeña hecho que debe restringir el movimiento del fluido en ellas en la dirección transversal al flujo. Esto y que la experiencia muestra que la frecuencia de las colisiones aumenta con el Re_d , son argumentos suficientes para pensar que en las juntas longitudinales el choque de la capa cortante con sus aristas traseras es tan frecuente que se puede admitir como casi permanente y además acompañada por fluctuaciones debido a que las colisiones no son siempre iguales.

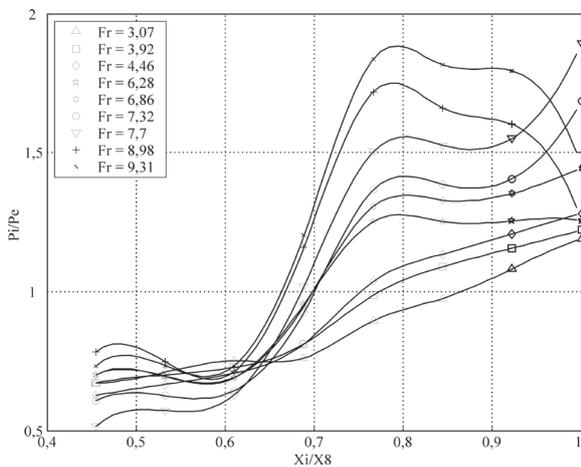


Figura 7 Distribución de presiones adimensionales debajo de una losa experimental en función de la posición adimensional, para una separación de 0,5 mm entre ésta y la superficie de apoyo

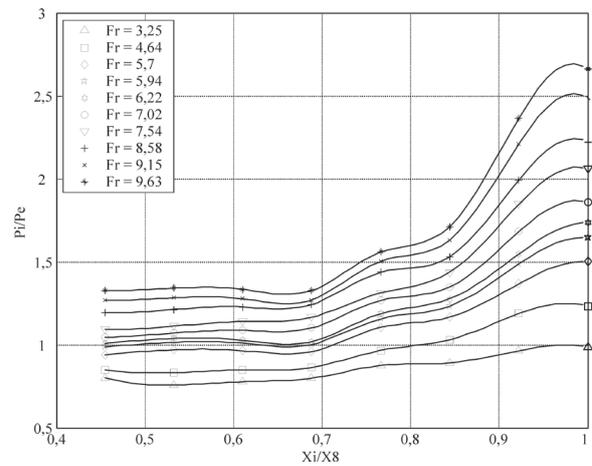


Figura 8 Distribución de presiones adimensionales debajo de una losa experimental en función de la posición adimensional, para una separación de 1 mm entre ésta y la superficie de apoyo

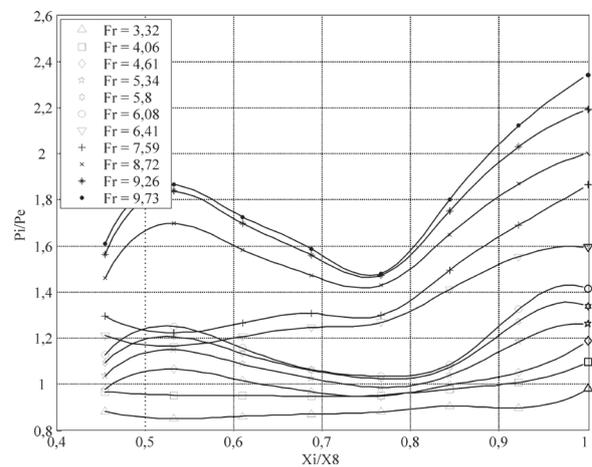


Figura 9 Distribución de presiones adimensionales debajo de una losa experimental en función de la posición adimensional, para una separación de 2 mm entre ésta y la superficie de apoyo

Ahora bien, si en la cara inferior de la losa de prueba la presión crece en el sentido del flujo, ello quiere decir que la distribución de presiones en las juntas longitudinales también se propaga hacia esa frontera del espécimen de prueba, porque al no haber juntas transversales no existe otro

conducto por donde el flujo pueda transferir energía a la base inferior de la losa. Por tanto, al haber presión estática debajo de la losa cuando no hay movimiento del fluido sobre ella, al establecerse el flujo y convertirse energía de velocidad en energía de presión en la pared trasera de las juntas, el incremento de presión encuentra las condiciones para propagarse hacia su cara inferior siguiendo la distribución de presiones existente en las juntas. No obstante, por la disposición simétrica de las juntas con respecto al centro, es probable que a lo largo del eje de simetría longitudinal de la losa la presión sea mayor que en sus lados, aunque el amortiguamiento de la presión en su propagación de los lados hacia el centro podría disipar cualquier diferencia. También es necesario agregar que la transferencia de energía del flujo principal al fluido en las juntas no sólo se produce en sus esquinas traseras, sino que ello ocurre a lo largo de toda su cima. Pero esa energía es probable sirva para fundamentalmente para formar y mantener las diferentes estructuras coherentes y no coherentes que se forman dentro de las juntas o para sostener los procesos de inyección o eyección de fluido hacia o desde la cavidad, eventos en los cuales también participa la energía transferida en la parte posterior de las juntas .

En síntesis hasta aquí se ha intentado interpretar porqué la presión debajo de la losa es mayor que la presión estática tomando como referencia el conocimiento existente sobre la interacción de un flujo cortante con una cavidad transversal de fondo. Sin embargo, falta por discutir el efecto de la separación losa-asiento. Al respecto, los resultados obtenidos indican que ese comportamiento sí se presenta como se puede inferir al analizar los valores extremos, es decir las presiones registradas por los sensores en la primera y última línea transversal. Ciertamente, cuando no hay separación entre la losa y su asiento se observa que la diferencia de presión entre los sensores extremos es superior a las que ocurre en las otras cuatro separaciones ensayadas. Además se ve que esa diferencia va disminuyendo conforme aumenta la distancia entre la losa y la superficie donde asienta, por lo que la pendiente entre los valores extremos decrece conforme aumenta esa variable.

El efecto de la separación losa-piso se podría explicar si se toma en cuenta que a menor separación mayor será la resistencia para la propagación de la presión en la cara inferior de la losa tal como sucede en el *flujo de Couette* y en general en cualquier flujo interior. Esto es lo que se podría esperar de la ecuación de Darcy para un conducto con sección no circular, en la que se sabe la pérdida de energía por unidad de peso del fluido es inversamente proporcional al radio hidráulico. Sin embargo en este caso se debe tener en cuenta que cuando esa separación es nula, como sucede cuando la losa asienta en el fondo, existe movimiento relativo entre la frontera sólida y el flujo, en cuyo caso se tendría que usar el análisis que se aplica en el flujo en un microcanal. Finalmente, como la diferencia entre este estudio y los que le preceden estriba en que en los experimentos realizados en el Laboratorio de Fluidos e Hidráulica de la Universidad del Valle se midió simultáneamente la presión en varios puntos de la cara horizontal inferior de una losa de revestimiento, lo que no se había hecho antes, no es posible comparar los resultados obtenidos con los efectuados por otros autores. Por eso es pertinente recordar que las investigaciones sobre levantamiento de losas de revestimiento fundamentalmente se han realizado mayoritariamente a partir de mediciones en la cara superior de la losa, por no decir en el piso del canal donde se desarrolla un salto hidráulico. Quizá el único estudio donde se reporta medición de la presión tanto en la cara superior como en la cara inferior es el realizado por Bellin y Fiorotto, salvo que ellos hicieron las mediciones sólo con separación placa-asiento de 2 mm, utilizando un número muy reducido de sensores de presión (2 transductores de presión) para medir esa variable en ambas caras de la losa [14], pero con las cuatro juntas abiertas. En esas condiciones los resultados de este estudio difieren cualitativamente de los de los autores quienes sostienen que la presión debajo de la losa no se amortigua aún para separaciones menores [31].

Por tanto, las presiones medidas en la base de la losa revelan que la presión total en esa frontera

del revestimiento es la suma de la presión estática y la fracción de presión dinámica que resulta en las juntas longitudinales por conversión de energía cinética en sus aristas traseras.

Conclusiones y recomendaciones

En este estudio se averiguó si las aristas traseras de las juntas longitudinales de una losa de revestimiento de fondo convierten energía de movimiento en energía de presión en sus aristas traseras cuando en el canal hay un flujo supercrítico. Esta hipótesis se evaluó en diferentes condiciones hidrodinámicas para lo cual se varió el número de Froude desde 2,84 hasta 10,19, y la separación losa-piso fue 0, 0,2, 0,5, 1 y 2 mm. Las mediciones de presión realizadas y el análisis e interpretación de los resultados permiten presentar las siguientes conclusiones:

- 1) Sí hay conversión de energía cinética en energía de presión en las aristas traseras de las juntas longitudinales de piso de un bloque protector de fondo, porque la presión medida es varias veces mayor que la presión hidrostática en la cara inferior de la losa.
- 2) La presión, cuando se trabaja sólo con las juntas longitudinales, se incrementa en el sentido del flujo, lo cual obedece a que la transferencia de energía de movimiento en energía de presión se da en la arista normal trasera de las juntas.
- 3) El comportamiento de la presión debajo de la losa también refleja que, como es lógico, no existe transformación de energía cinética en la arista normal delantera. Esto, es consecuencia de que las caras transversales de las juntas al formar un escalón descendente y otro ascendente inciden en la conversión de energía.
- 4) La geometría y orientación de las juntas, determinan el patrón de flujo en su interior, de modo tal que la presión necesariamente tiene que disminuir en el sentido contrario al del movimiento del fluido.
- 5) El comportamiento de la presión debajo del bloque de prueba, a pesar de su marcada tendencia a incrementarse en el sentido del flujo, refleja inconsistencias que podrían ser resultado de las irregularidades en las superficies de las láminas de acrílico utilizadas. Lo anterior sugiere que en los experimentos futuros se deben usar láminas más rígidas y con superficies uniformemente horizontales.

Referencias

1. F.W. Baisdell. "Development and Design of Saint Anthony Falls Stilling Basin". *Transactions of the ASCE*. Vol. 113. 1948. pp. 483-520.
2. D. Sorensen. *Handbook of Applied Hydraulics*. Ed. McGraw-Hill. New York. 1969. pp. 20-27.
3. A.R. Golzé. *Handbook of Dam Engineering*. Ed. Van Nostram Reinhold Co. New York. 1977. pp. 20-27.
4. F.G. Gunko, R.E. Vedeneev. "Macroturbulence of Flow Bellow Spillway Medium Head Dams and their Protection against Undermining". *Proceeding 12th IAHR Congress*. Fort Collias. Vol. 2. 1967. pp. 135-143.
5. M.A. Jabara, J. Legas. "Selection of Spillway Plunge and Stilling Basins for Earth and Concrete Dams". *Proceedings 11th ICOLD Congress*. Madrid. Q.1, R.17. 1973. pp. 269-287.
6. R. M. Khatsuria. *Hydraulics of Spillways and Energy Dissipators*. Marcel Dekker. New York. 2005. pp. 411-424.
7. A. J. Petarka. "Hydraulic Design of Stilling Basins and Dissipators". *USBR, Engineering Monograph*. Vol. 25. 1983. pp. 12-14.
8. A. D. Prosanto, A. C. Figueroa, H. Lhez. "Spillway Design Criteria of the Quebrada of Ullum Reservoir". *Proceedings of 11th ICOLD Congrès*, Madrid. Q.41, R.48. 1973. pp. 871-884.
9. T. Yedu-Koung, L.W. Mays. "Optimal Design of Stilling for Overflow Spillway". *J. of Hydraulic Division, Proceedings of the ASCE*. Vol. 108. 1982. pp. 9-12.
10. M. A. Rahman. "Damage at the Karnafulli Dam Spillway". *J. of Hydraulic Division, Proceedings of the ASCE*. Vol. 98. 1972. pp. 2155-2170.

11. B. Sánchez, V. A. Capella. "Turbulence Effects on the Lining of Stilling Basins". *Proceedings ICOLD. Congrès des Grands Barrages*. Madrid. Q.41, R.83. 1973. pp. 1575-1592.
12. L. Pei-Qing, L. Ai-Hua. "Model Discussion of Pressure Fluctuations Propagation within Lining Slab Joints in Stilling Basins". *Journal Of Hydraulic Engineering. ASCE*. Vol. 133. 2007. pp. 618-624.
13. C. M. Ramos. *Models for Study of the Hydrodynamic Actions on Hydraulic Structures, Recent Advances in Hydraulic Physical Modelling*. Ed. Kluwer Academic Publishers. The Netherlands. Series E: Applied Sciences. Vol. 165. 1989. pp. 52-55.
14. A. Bellin, V. Fiorotto. "Direct Dynamic Force Measurements on Slab in Spillway Stilling Basin". *J. of Hydraulic Engineering, ASCE*. Vol. 121. 1995. pp. 686-693.
15. C. E. Bowers, J. Toso, Karnafulli. "Project: Model Studies of Spillway Damage". *J. Hydraulic Engineering, ASCE*. Vol. 114. 1988. pp. 469-483.
16. J. Farhoudi, R. Narayanan. "Force on Slab beneath Hydraulic Jump". *J. of Hydraulic Engineering*. Vol. 117. 1991. pp. 64-82.
17. J. L. Sánchez, O. Fuentes. "Experimental Analysis of Macroturbulence Effects on the Lining of Stilling Basins". *Proceedings ICOLD, Treizième Congrès des Grands Barrages*. New Delhi, Indian. Q.50, R.8. 1979. pp. 85-103.
18. M. H. Abdul Khader, K. Elango. "Turbulent Pressure Field beneath a Hydraulic Jump". *J. of Hydraulic Research*. Vol. 12. 1974. pp. 469-487.
19. M. Akbari, M. Mital, B. Pande. "Pressure Fluctuations on the Floor of Free and Forced Hydraulic Jump". *Proceedings International Conference Modeling Civil Engineering Structures*. Coventry. England. 1982. pp. 163-170.
20. C. E. Bowers, F. Y. Tsai. "Fluctuating Pressures in Spillway Stilling Basins". *J. Hydraulic Division. ASCE*. Vol. 95. 1969. pp. 2071-2079.
21. V. Fiorotto, A. Rinaldo. "Turbulent Pressure Fluctuations under Hydraulic Jumps". *J. of Hydraulic Research*. Vol. 130. 1992. pp. 499-520.
22. N. Rajaratnam. "The Forced Hydraulic Jump". *Water Power*. Vol. 10. 1964. pp. 14 -65.
23. F. J. Resch, H. J. Leutheusser. "Mesures des Tensions de Reynolds dans le Ressaut Hydraulique". *Journal of Hydraulics Research*. Vol. 10. 1972. pp. 409-428.
24. F. J. Resch, H. J. Leutheusser. "Mesures des Tensions de Reynolds dans le Ressaut Hydraulique". *J. of Hydraulic Research*. Vol. 10. 1972. pp. 409-428.
25. M. E. del Risco. *Inestabilidad del Revestimiento de Fondo de un Tanque Amortiguador*. Tesis Doctoral, Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. México D.F. 1989.
26. D. L. Dwyer. "A Tile-Gap Flow Model for use in Aerodynamic Loads Assessment of Space Shuttle Thermal Protection System: Parallel Gap Faces". *NASA Technical Memorandum 83151*. 1981. pp. 1-75.
27. E. Levi, J. A. Masa. "Estudio sobre la Flotación de Losas en Tanques Amortiguadores". *Memorias 2^{do} Congreso Nacional de Hidráulica. Culiacán, México*. 1972. pp.147-165.
28. E. Levi. *Acción Hidrodinámica de la Corriente sobre Revestimientos de Tanque Amortiguadores*. Informe Técnico, Instituto de Ingeniería, UNAM. 1981.
29. E. Levi, E. del Risco. "Search for the Cause of High-Speed-Channel Revetment Failures". *ASCE, J. of Performance of Constructed Facilities*. Vol. 3. 1989. pp. 125-136.
30. J. Muylaert. "Aerothermodynamic Analysis of Space-Vehicle Phenomena". *ESA*. Vol. 105. 2001. pp. 69-79.
31. V. Fiorotto, A. Rinaldo. "Fluctuating Uplift and Linnings Design in Spillway Stilling Basins". *J. Hydraulic Engineering. ASCE*. Vol. 118. 1992. pp. 578-596.
32. S. Aki. "Dynamic Characteristic of the Force Acting on the Spillway Chute". *Proceedings 12th IAHR Congress*. Vol. 2. 1967. pp. 163-170.
33. American Concrete Institute. *Recommendations for Construction of Concrete Pavements and Concrete Bases*. 1982. pp. 50-52.
34. J. N. Bradley, A. J. Petarka. "The Hydraulic Design of Stilling Basins". *J. Hydraulic Division, Proceedings of the ASCE*. Vol. 38. 1957. pp. 1401-1 - 1406-17.
35. R. E. Coxon. "Control of Flow at Kainji Dam". *Proceeding ICOLD, Neuvième Congrès des Grands Barrages*. Istanbul. 1967. pp. 145-168.
36. E. del Risco. *Estudio del Levantamiento de una Losa de Revestimiento*. Informe de Año Sabático, Facultad de Ingeniería. Universidad del Valle. 2006.
37. R. L. Haugen, A. M. Dhanak. "Momentum Transfer in Turbulent Separated Flow Past a Rectangular Cavity". *J. of Applied Mechanics. Transactions of the ASME*. 1966. pp. 641-646.

38. H. Rouse, T.T. Siao, S. Nagaratnam. "Turbulent Characteristics of Hydraulic Jump". *J. of Hydraulic Division, ASCE*. Vol. 124. 1958. pp. 927 - 966.
39. L. Rudavsky. "Selection of Spillway end Energy Dissipators in Preliminary Planning of Dams Development". *Proceedings ICOLD, Douzième Congrès des Grands Barrages*. México. Q.46, R.9. 1976. pp. 153-180.
40. J. L. Sánchez, A.G. Echávez. *Criterio Preliminar para el Diseño de Losas de Tanque Amortiguadores*. Informe Técnico, Instituto de Ingeniería, UNAM. 1970.
41. E. Soucek, J. N. Gau. "Spillway and Closures for the Large Earth Dams on the Missouri River". *Proceeding ICOLD, Neuvième Congrès des Grands Barrages*. Istanbul. 1967. pp. 29-55.
42. O. F. Vasiliev, V. I. Brukeyev. "Statistical Characteristics of Pressure Fluctuations in the Region of Hydraulic Jump". *Proceedings IAHR*. Vol. 2. 1967. pp. 1-8.