

DOI: 10.24850/j-tyca-14-02-03

Artículos

Causa de falla en la obra de excedencias, presa Endhó: modelación física

Cause of failure at Endhó dam spillway: Physical modeling

Martha Bautista-Hernández¹, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1329-8515>

Oscar Luis Palacios-Vélez², ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7907-2802>

Martín Rubén Jiménez-Magaña³, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1034-5996>

Ramón Eduardo Arteaga-Tovar⁴⁺, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9505-1200>

¹Colegio de Postgraduados, Texcoco de Mora, México, bautista.martha@colpos.mx

²Colegio de Postgraduados, Texcoco de Mora, México, opalacio@colpos.mx

³Facultad de Estudios Superiores Aragón, Universidad Nacional Autónoma de México, Nezahualcóyotl, México, mr.jimenez@comunidad.unam.mx



†⁴Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco de Mora, México,
artrem71@gmail.com

Autora para correspondencia: Martha Bautista,
bautista.martha@colpos.mx

Resumen

En las últimas décadas, la demanda de agua se ha incrementado y con ello la necesidad de almacenar los escurrimientos de forma artificial. Así, han surgido las presas de almacenamiento, estructuras consideradas de alto riesgo en caso de falla. La obra de excedencias de la presa Endhó presenta daños importantes en las losas de revestimiento del canal de descarga, específicamente en la parte final de la rápida, en lo correspondiente a la trayectoria, que entrega el agua al estanque amortiguador, lo cual pone en riesgo la estabilidad del embalse. De acuerdo con las características geológicas e hidráulicas de la obra es probable que la fuerza de subpresión sea la causa principal del desgaste, ruptura y desprendimiento de las losas. Para determinar las causas que originan la falla, se construyó un modelo físico escala 1:100, donde se cumplieron las leyes de similitud (Froude) y semejanza (geométrica, cinemática y dinámica) y se simuló el flujo subterráneo con suelo de la presa. El gasto máximo que se transitó sobre la obra de excedencias fue de 11 l/s (1 100 m³/s en el prototipo); se operó durante 240 h continuas. Con siete sensores de presión se registraron valores en la zona de interés

y se obtuvieron datos hasta de 9 220 kgf/m² (prototipo). Los valores de subpresión obtenidos en el modelo físico fueron mayores que los estimados con la metodología de Lane. El análisis estructural indica que el peso de la estructura no es suficiente para contrarrestar la subpresión en la rápida parabólica.

Palabras clave: modelación hidráulica, prototipo, subpresión, infiltración, sensores, desprendimiento de losas, empuje hidrostático, análisis estructural.

Abstract

Over last decades, water demand has increased, and with it the need to store runoff artificially. This way reservoirs have emerged; structures considered high risk, in the event of failure. The work of spillway of the Endhó dam presents important water shocks in the coating slabs of the discharge channel, specifically in the final part of the rapids in relation to the trajectory, which delivers water to the buffering pond, which puts at risk the reservoir stability. According to the geological and hydraulic features of the work, it is probable that the subpressure force is the main cause of the wear, rupture and detachment of the slabs. To determine the causes that originate the failure, a 1:100 scale physical model was built. In this, the laws of resemblance (Froude) and similarity (geometric, kinematic and dynamic) were met, and the underground flow with soil from of the dam was simulated. The maximum flow that was passed on the spillway work was 11 l/s (equivalent to 1 100 m³/s in the prototype),

it was operated for 240 continuous hours. With seven pressure sensors the values were recorded in the area of interest and data up to 9 220 kgf/m² (prototype) were obtained. The subpressure values obtained in the physical model were higher than those estimated with Lane's methodology. The structural analysis indicates that the weight of the structure is not sufficient to counteract the subpressure in the rapid parabolic.

Keywords: Hydraulic modeling, prototype, subpressure, infiltration, sensors, slab detachment, hydrostatic thrust, structural analysis.

Recibido: 12/03/2021

Aceptado: 20/09/2021

Introducción

La seguridad de una presa depende, entre otros factores, del funcionamiento óptimo de la obra de excedencias, la cual se construye con el objetivo de dar paso a los volúmenes de agua que no pueden retenerse en el vaso (Ramírez, 2011) y que, de no desalojarse, podrían verterse por encima de la cortina, generando un problema mayor.



En las obras de excedencias se presentan flujos turbulentos y velocidades altas, lo que propicia condiciones desfavorables para las losas de revestimiento (Khatsuria, 2013), mismas que se utilizan para evitar la propagación de presiones, infiltración, erosión, tubificación y socavación, fenómenos que amenazan la estabilidad estructural (Del-Risco, Hurtado, & González, 2010; Khatsuria, 2013). Por ello, es necesario realizar un diseño confiable tomando en cuenta todas las variables que se pudieran presentar bajo diferentes condiciones, debido a que una reacción neta positiva en la estructura de descarga y disipación no es suficiente para asegurar la estabilidad de la obra.

En la cara de la losa opuesta al flujo es inevitable que el agua se filtre a través de fisuras, juntas, grietas y, sobre todo, al estar en contacto directo con el suelo, lo que da lugar a filtraciones (Hurtado, Del-Risco, & González, 2009), las cuales originan acciones químicas, físicas y mecánicas negativas hacia las losas (Sahuquillo, 2010). Al presentarse una superficie expuesta al flujo (por falta de revestimiento) se genera inestabilidad y, por lo tanto, un peligro para todo ser humano y bienes materiales que se encuentren aguas abajo de la presa (Ochoa & Camilo, 2006).

Del funcionamiento de la presa Endhó se beneficia un gran número de agricultores, pues la agricultura es la principal actividad económica de la región; otro uso es para el control de avenidas en época de lluvias, que proceden de la Ciudad de México y de la cuenca propia (Conagua, 2009).

Para determinar las causas que originan el desprendimiento de las losas se enfatizó en los factores geotécnicos e hidráulicos, como infiltración, subpresión y dimensiones físicas. Al saber qué fenómeno atenta contra la estabilidad de la obra es posible dar alternativas de solución para rehabilitar con obras eficientes al menor costo (González, 2016; Iñiguez-Covarrubias, Ojeda-Bustamante, & Díaz-Delgado, 2015). Por ello, el presente escrito tiene como objetivo conocer la distribución de presiones de la plantilla de la obra de excedencias por medio de sensores de presión colocados en la parte inferior del modelo físico, y definir la distribución de fuerzas, esfuerzos, momentos, desplazamientos y deformaciones de la estructura, tomando en cuenta los efectos de rigidez de la cimentación y del suelo mediante un análisis estructural.

La modelación hidráulica es una herramienta que ayuda a seleccionar el diseño óptimo de cualquier estructura; es un instrumento confiable, donde es posible inspeccionar, medir, analizar, evaluar, observar, verificar y optimizar recursos (Del-Risco *et al.*, 2010; Jiménez-Castañeda, Berezowsky-Verduzco, Hernández-López, & Caballero-Coranguez, 2020; Lopardo, 2010), para visualizar en conjunto los fenómenos a lo largo de todo el espacio y en forma continua en el tiempo, reproduciendo con exactitud las condiciones de frontera (Arteaga, 2012).

Si no se cumplen las condiciones de semejanza pueden aparecer los llamados “efectos de escala”, donde en razón de la magnitud de la transformación adoptada existen fuerzas que cobran importancia, fundamentalmente las moleculares, que por lo general son insignificantes

en el prototipo, y que en cambio, por el reducido tamaño del modelo, se vuelven relevantes. Tales fuerzas se asocian, principalmente, con las fuerzas capilares derivadas de la tensión superficial, y con las fuerzas viscosas o de fricción interna (Chanson, 2009).

Los sensores son instrumentos precisos para registrar los valores de presión, sin embargo deben calibrarse de forma correcta para obtener datos confiables (González & Giraldo, 2014).

Materiales y métodos

Descripción del prototipo

La presa Endhó se localiza en el municipio de Tula, Hidalgo (20° 08' 15" N, 99° 21' 45" W y 2 023.5 m de altitud). En la margen izquierda del embalse se encuentra la obra de excedencias, la cual consta de un vertedor tipo medio abanico de cresta libre, que vierte las aguas excedentes al canal de descarga, y dos estanques amortiguadores ubicados al final de la misma; posteriormente, se incorpora al río Tula.

El cimacio presenta una altura de 3.5 m y se diseñó para una avenida de 1 700 m³/s, con una longitud de cresta de 200 m y una carga máxima de 2 m. El canal de descarga es de ancho variable, de 138 m al pie del cimacio a 20 m en la estación 0 + 400, continuando con ese ancho hasta el final, donde se encuentra una rápida, que al final de la misma, en la parte correspondiente a la trayectoria (de perfil parabólico), cuenta con tres dientes, fraccionadores de flujo. Toda la estructura está revestida de concreto reforzado, con drenes transversales y longitudinales (Conagua, 2009). En el primer estanque amortiguador, que fue el diseño original, hay dos filas de deflectores formados por dentellones alternados longitudinalmente y enseguida, posterior a su construcción original, ante una inadecuada disipación del flujo, se tuvo que proyectar el siguiente estanque (Figura 1 y Figura 2).

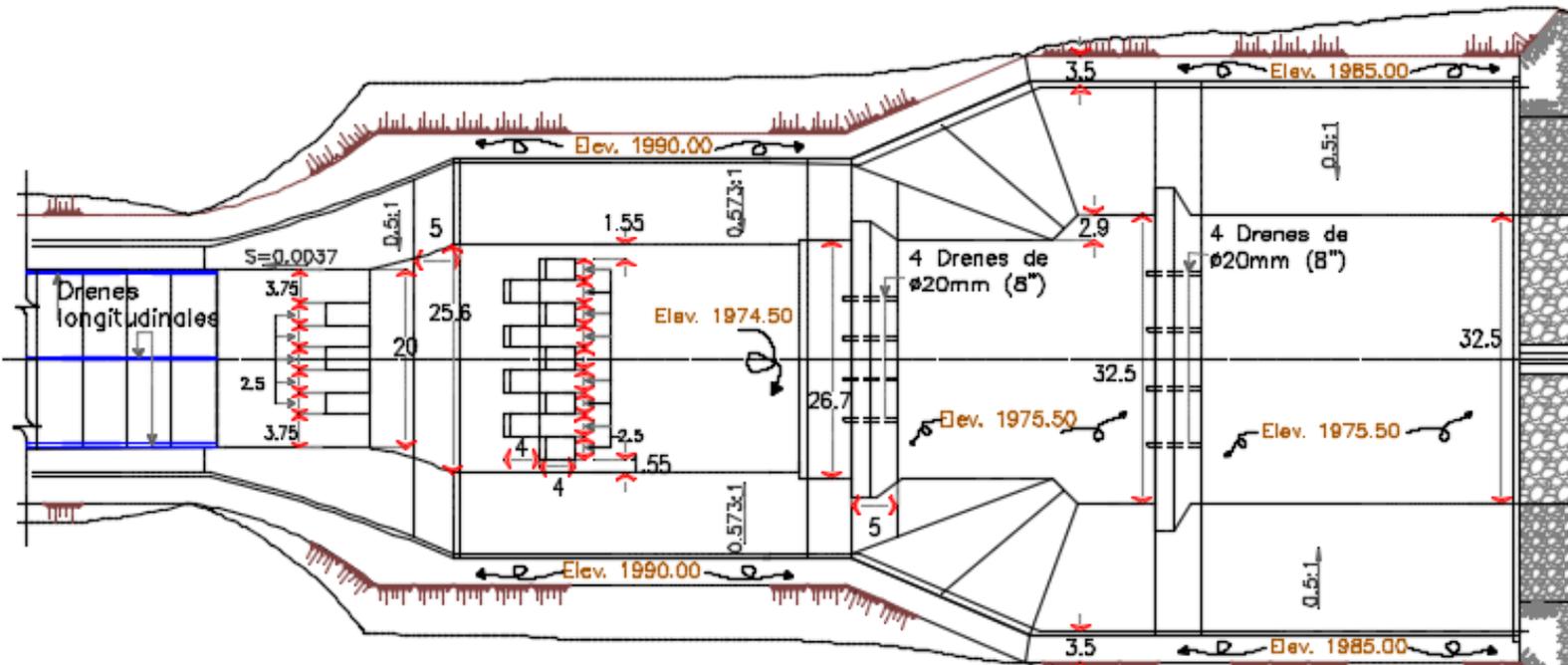


Figura 1. Planta de la rápida de perfil parabólico y los estanques amortiguadores.

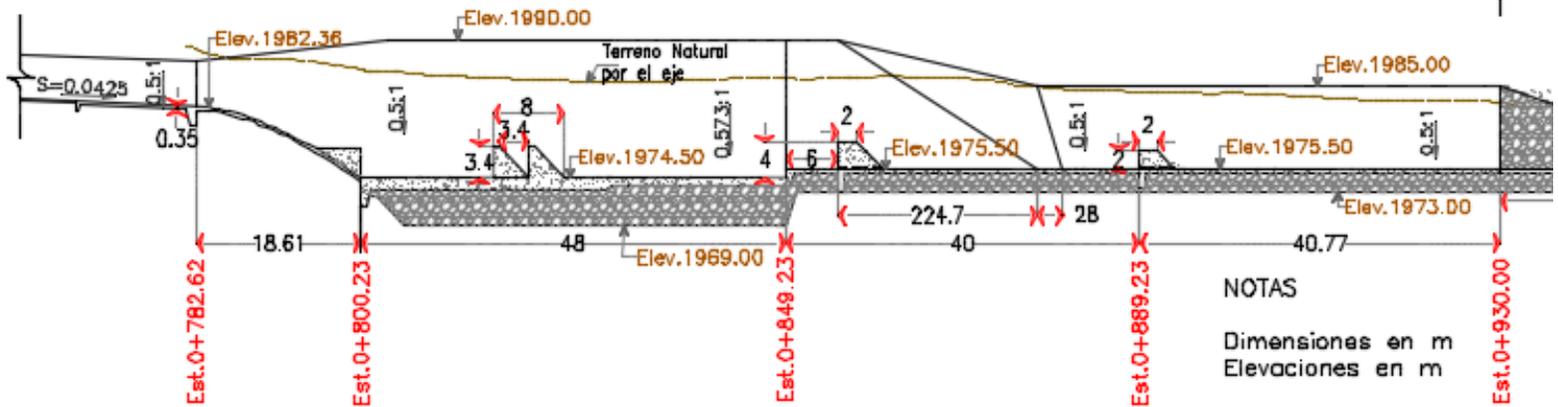


Figura 2. Perfil de la rápida de perfil parabólico y los estanques amortiguadores.

Descripción del modelo

El modelo físico se construyó en el anexo del laboratorio de hidráulica, en la Universidad Autónoma Chapingo. Mide 12 m de largo y de ancho variable, 2.5 m al inicio hasta llegar a 0.8 m en la parte final. Se hizo fluir agua durante 240 h sobre la obra de excedencias, con un gasto de 11 l/s, sin interrupción. El abastecimiento de agua fue con dos depósitos: uno de carga constante que provee al segundo, de éste pasa al vaso a través de una pantalla reductora de velocidad; posteriormente, el agua circula sobre el cimacio, recorriendo la obra de excedencias. En la parte final se

encuentra un vertedor triangular de pared delgada de 90° , que permite aforar los gastos que circulan y que desfoga hacia el sistema de canales de recirculación del laboratorio (Figura 3).



Figura 3. A) Modelo físico, vista completa de la obra de excedencias; B) pantalla reductora de velocidad, vaso, cimacio, parte inicial del canal de

descarga; C) líneas de corriente en el perfil del suelo compactado; D) drenes transversales y longitudinales, colocados en la parte inferior del canal de descarga; E) vertedor triangular de 90°.

Se seleccionó una escala de longitudes $l_e = 100$. La forma de la obra de excedencias se logró con el uso de más de 100 escantillones de fibropanel de densidad media cortados con láser.

Es necesario resaltar que no se tomaron en cuenta las juntas, ya que la obra se construyó en una sola pieza; no obstante, como mencionan González y Posada (2016), es importante tomar en cuenta dichas divisiones. El modelo se rellenó con 18 m³ de toba pumítica, proveniente de la zona de estudio (Hidalgo); a este suelo se le realizaron pruebas de compactación y granulometría.

La red de drenaje se colocó en la parte inferior de las losas de revestimiento, con manguera porosa de 8 mm de diámetro, con un arreglo de 14 × 8 cm. También se colocaron los sensores sobre el eje del canal de descarga en la rápida parabólica y en el primer estanque amortiguador.

Similitud y semejanza

La base teórica de la modelación física son las leyes de similitud y semejanza. La ley de similitud utilizada en el modelo es la de Froude, que relaciona las fuerzas de inercia y las fuerzas gravitatorias (JiJian & JinDe, 2008) (Ecuación (1)). Las escalas utilizadas para el modelo se presentan en la Ecuación (2):

$$Fr = v (g L)^{-1/2} \quad (1)$$

$$A_e = l_e^2; v_e = l_e^3; Q_e = l_e^{5/2}; t_e = l_e^{1/2}; F_e = \gamma_e l_e^3 P_e = \gamma_e l_e \quad (2)$$

donde v : velocidad; L : longitud característica; g : gravedad; A_e : escala de área; v_e : escala de volumen; Q_e : escala de gasto; t_e : escala de tiempo; F_e : escala de fuerza; γ_e : escala de peso específico, y P_e : escala de presión.

Las leyes de semejanza que se cumplieron son la geométrica, dinámica y cinemática; en la semejanza geométrica, las longitudes; en la cinemática, las magnitudes de velocidad; en la dinámica, las fuerzas ejercidas por el fluido son homólogas entre el prototipo y el modelo.

Instrumentos de medición

De manera volumétrica se obtuvo la ecuación que describe la cantidad de gasto (m^3/s) que transita sobre el vertedor triangular (Ecuación (3)); con un limnómetro de gancho se midió la carga sobre el vertedor (m):

$$Q = 1.37 H^{2.48} \quad (3)$$

donde Q : gasto y H : carga sobre el vertedor.

Se instalaron piezómetros en la rasante de la plantilla de la obra de excedencias (sobre el eje), para registrar los tirantes de agua. La velocidad se estimó con el tubo de Prandtl; en este equipo se visualizó la diferencia entre presión total y estática.

En el modelo físico se midió la subpresión con siete sensores piezorresistivos (MPX5100DP) distribuidos bajo el eje del canal de descarga, de la rápida parabólica y el primer estanque amortiguador (Figura 4).

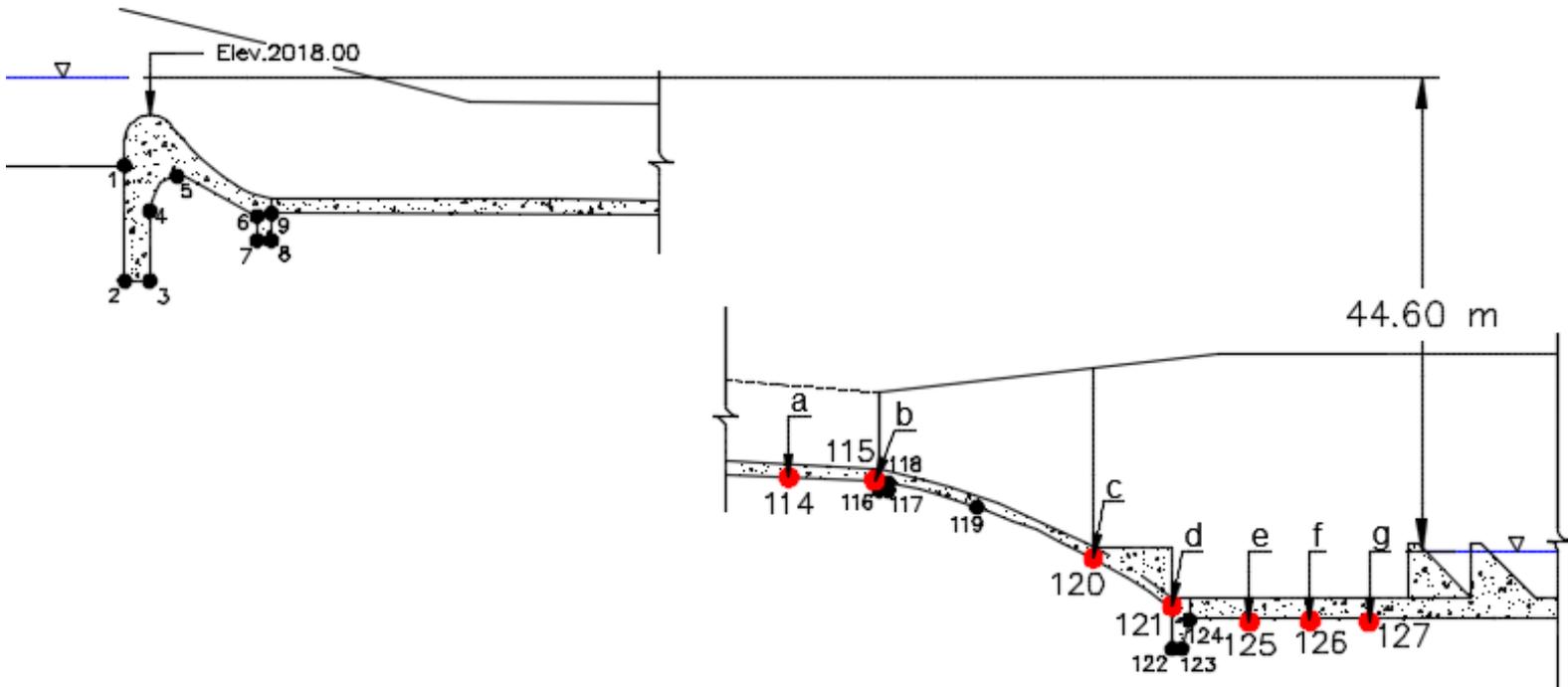


Figura 4. Ubicación de los sensores en el modelo (letras) y numeración para la metodología de Lane.

El microcontrolador del sistema de adquisición de datos se programó para registrar los valores de subpresión a cada medio minuto; estos valores son el promedio de las mediciones obtenidas con una frecuencia de un segundo, en un lenguaje que forma parte de la plataforma Arduino (*hardware* libre). Cada uno de los sensores se calibró verificando la exactitud con piezómetros antes de colocarlos en la parte inferior de las losas de revestimiento; las ecuaciones resultantes de la calibración se integraron al código de programación. Los valores

registrados se obtuvieron en centímetros de columna de agua, que posteriormente se convirtieron a kgf/m^2 , unidad que corresponde a la subpresión en prototipo.

Método de Lane

Determinar los valores de subpresión por el método de Lane (Ecuación (4)) implica utilizar el criterio de la trayectoria de filtración, donde la longitud total de filtración compensada de la estructura es igual a la suma de las longitudes verticales de filtración más un tercio de la suma de las longitudes de filtración horizontales. Las distancias que presentaron una inclinación mayor de 45° se consideran como verticales y las que tenían una inclinación menor de 45° se consideraron como distancias horizontales (Arteaga, 2012):

$$Sp_x = \omega_a B' c' [\varphi_x - (\varphi L^{-1}) L_x] \quad (4)$$

donde Sp_x : subpresión en el punto "x" cualquiera; ω_a : peso volumétrico del agua; B' : ancho de la base de la sección donde actúa la subpresión; c' : factor de subpresión; φ : carga hidráulica efectiva; φ_x : carga o

potencial hidráulico en el punto "x"; L_x : longitud de filtración compensada hasta el punto "x", y L = longitud total compensada.

En cada quiebre de la estructura (parte inferior) se asignó un número consecutivo, como punto de control, para aplicar la metodología en cada uno de ellos, iniciando en el cimacio y finalizando en el límite del revestimiento del segundo estanque amortiguador (Figura 4).

Análisis estructural

Para el análisis se consideró el peso propio de la estructura, el peso del prisma del agua, el empuje del agua, la subpresión y el impacto del manto en el piso. En la Figura 5 se presenta una sección característica de la zona de estudio. Para estimar la reacción del suelo en el desplante del piso se aplicó la Ecuación (5) (Arteaga, 2011).

$$R_T = \frac{W_a p + W_c p + 2 V - S p_x}{B'} \quad (5)$$

donde R_T : reacción del suelo en el desplante del piso; $W_a p$: peso del prisma de agua en la losa de piso; $W_c p$: peso propio de la losa de piso; V : componente vertical de la resultante de las fuerzas tangenciales en los

muros laterales; Sp_x : subpresión en el punto de estudio, y B' : longitud transversal de la losa del piso del paño inferior.

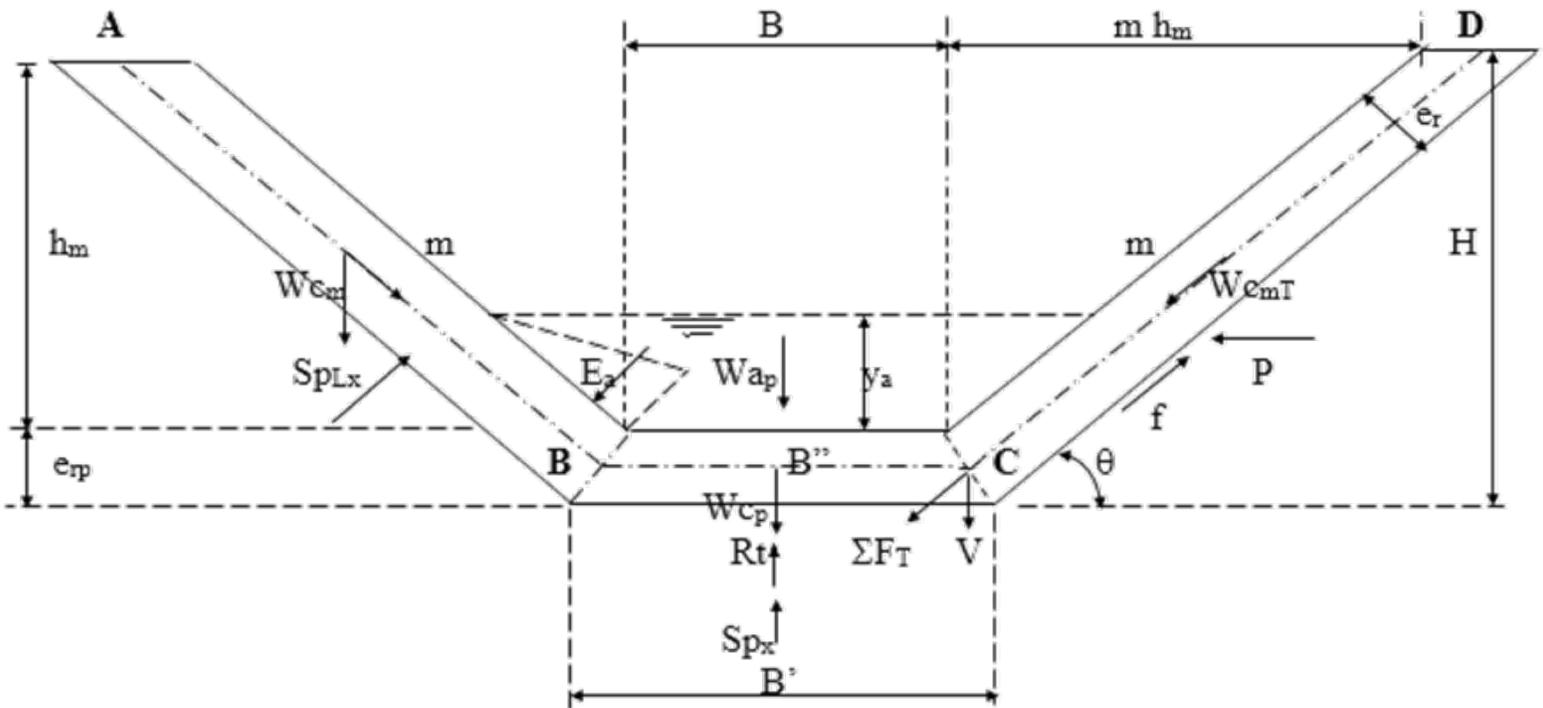


Figura 5. Corte transversal al punto "x" para el análisis de fuerzas.

Fuente: Arteaga (2011).

Se analizó la sección para el punto crítico, determinando los momentos y cortantes al eje; mediante el método de Cross se revisó la estructura por flexión, adherencia, longitud de desarrollo, peralte necesario, y por contracción y temperatura.

Resultados y discusión

Después de 60 h de funcionamiento continuo se obtuvo el primer registro de subpresión en los sensores, sin embargo estos valores corresponden a la presión que ejerce el agua que circuló de la parte final hacia los estanques amortiguadores. Pasadas 135 h de registro se estabilizaron todos los sensores, con un valor promedio de 1 350 kgf/m²; este valor corresponde en prototipo a la subpresión que ejerce el agua del río hacia la estructura.

A partir de 140 h se notó un aumento acelerado en los valores; las filtraciones en dirección al flujo llegaron al área de interés. El sensor ubicado en la posición "a" ascendió a 4 350 kgf/m², subpresión máxima para esta posición; mientras que el sensor situado en "d" alcanzó 9 220 kgf/m², máxima presión de todos los sensores (Figura 6).

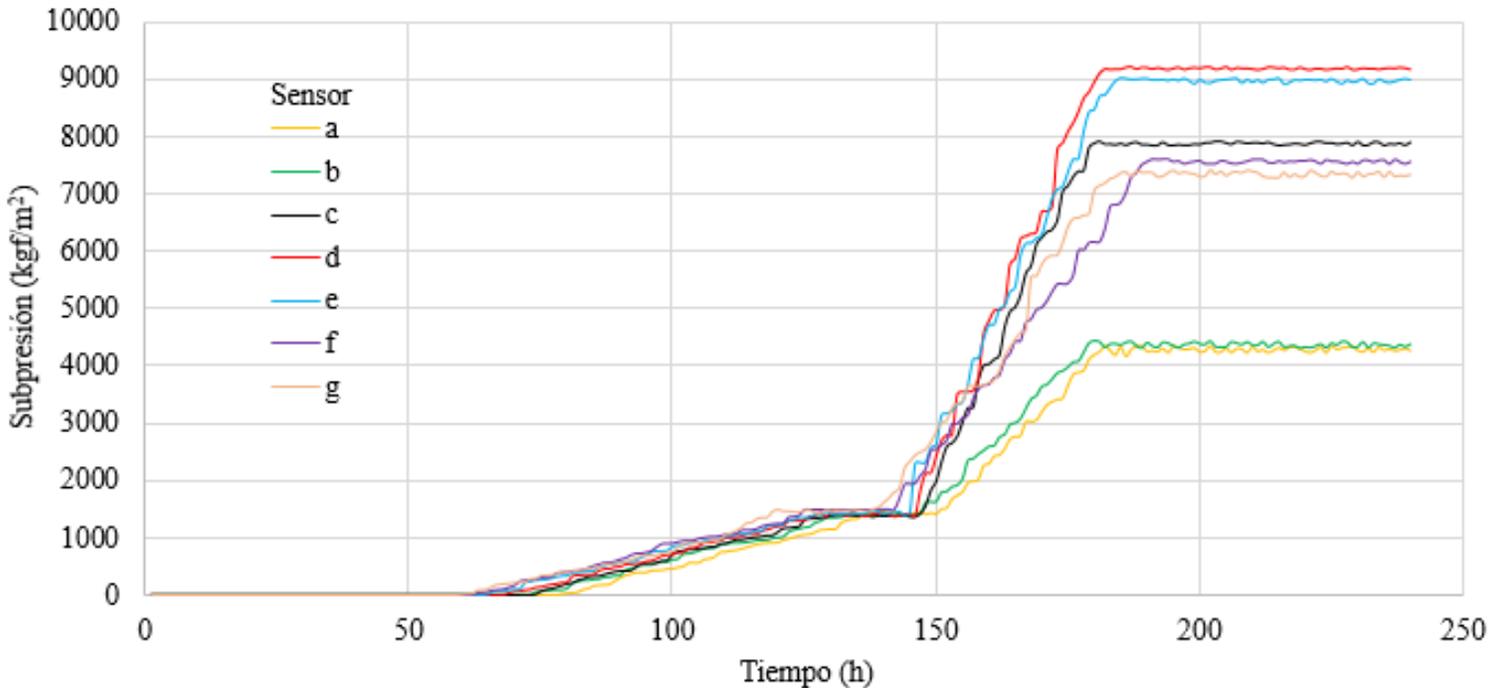


Figura 6. Subpresiones registradas con los sensores MPX5100DP en el modelo físico.

Al aplicar la metodología de Lane (Arteaga, 2012) se obtuvo una pérdida por metro de recorrido de 0.1183 m, una reacción de carga de filtración de 8.19 m y una longitud de trayectoria de infiltración necesaria de 379 m, por lo que se considera incorrecta la proporción de elementos propuestos para la estructura. El valor máximo de subpresión (considerando la existencia de drenes) se ubica en el punto 121, cuyo valor es 7 343.47 kgf/m²; en comparación con el punto homólogo "d" representa 20.35 % de error. Sin embargo, para el punto 114, cuyo valor

es negativo y homólogo con el punto "a", presenta un error hasta de 140 % (Figura 7).

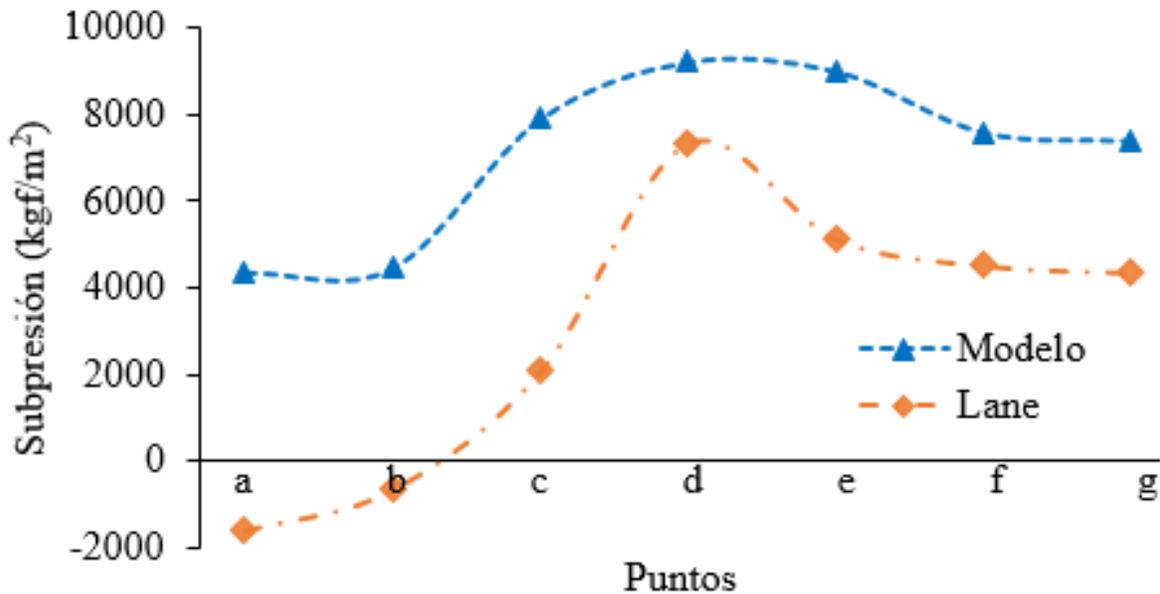


Figura 7. Subpresión registrada por los sensores y la obtenida por la metodología de Lane para los puntos homólogos de la estructura.

La reacción del suelo con valores negativos indica que predominan las fuerzas de subpresión, aun considerando todas las variantes que actúan en cada una de las secciones. El punto "d" o 121 es el más crítico, con valores de $-8\ 085\ \text{kgf/m}^2$, obtenido de manera experimental, y $-6\ 209\ \text{kgf/m}^2$ generado por el método de Lane (Tabla 1).

Tabla 1. Reacción del suelo.

Puntos	Rt _{LANE}	Rt _{MODELO}
	kgf/m ²	kgf/m ²
a	2 439	-3 655
b	1 359	-3 747
c	-1 09	-6 926
d	-6 209	-8 085
e	-1 222	-3 132
f	-608	-2 026
g	-443	-1 878

Para la sección del punto "d" se obtuvo que el momento al eje (isostático) de las barras BA y CD es de -79.13 kg-m. En la revisión de peralte necesario se tomó un recubrimiento de 7 cm; dado que el lecho se encuentra en contacto con el terreno (American Concrete Institute, 1977), se encontró deficiente con 7.3 cm, por lo que es necesario aumentar este peralte mínimo a 81 cm. El esfuerzo cortante admisible para esta estructura es de 3.55 kg/cm² (American Concrete Institute, 1977); de acuerdo con los cálculos, la sección es superior (4.38 kg/cm²), por lo tanto, no es aceptable. En cuanto a la revisión por adherencia, longitud de desarrollo, y contracción y temperatura, se encuentran dentro de los valores permisibles.

Conclusiones

Con base en las mediciones de presión, cuando el vertedor no se encuentra en funcionamiento se presentan valores de subpresión que ponen en riesgo la estabilidad de la estructura. Estas mediciones confirman que se trata de una presión capaz de levantar los dientes deflectores y las losas de revestimiento, estructuras de varias toneladas de peso, mismas que se colocaron para disipar la energía y proteger las losas de revestimiento.

Al realizar el análisis estructural y obtener la distribución de las fuerzas, momentos, esfuerzos, desplazamientos y deformaciones de la estructura, se ratificó que con las características presentes en la obra de excedencias no es posible que ésta soporte tal magnitud de subpresión. Asimismo, la reacción del suelo en el desplante del piso (medida en el modelo y calculada por el método de Lane) presenta valores negativos, lo cual confirma la inestabilidad de la estructura y, por lo tanto, el desprendimiento de los dientes deflectores y las losas de revestimiento, observadas en la obra de excedencias de la presa Endhó, Hidalgo.

Al comparar la presión ascendente obtenida experimentalmente y la calculada por el método de Lane, se concluye que el punto más crítico coincide en ambos métodos, presentándose al final de la trayectoria que une la rápida del canal de descarga con el estanque amortiguador, lo que provocó el deterioro y desprendimiento de los dientes deflectores y las

losas de revestimiento de la plantilla, haciendo que este efecto se propagara por la debilidad que existía en este punto.

Sin embargo, es importante estudiar y analizar la obra bajo diferentes situaciones y no solo a presa vacía, para determinar en qué escenario se presenta la condición más desfavorable para la obra, pues un resultado que se encuentre dentro de los rangos aceptables (bajo ciertas condiciones) no garantiza un funcionamiento seguro y estable, dados los diferentes fenómenos que se pueden presentar a lo largo de la vida útil de la estructura hidráulica.

Referencias

- American Concrete Institute. (1977). *Reglamento de las construcciones de concreto reforzado: ACI 318-77*. Indianápolis, EUA: American Concrete Institute.
- Arteaga, T. R. E. (2012). *Estructuras de conducción o unión en canales de riego*. España: Editorial Académica Española.
- Arteaga, T. R. E. (2011). *Obras hidráulicas. Notas de clase*. Chapingo, México: Departamento de Irrigación, Universidad Autónoma Chapingo.
- Chanson, H. (2009). Turbulent air-water flows in hydraulic structures: dynamic similarity and scale effects. *Environmental Fluid Mechanics*, (9), 125-142. DOI: 10.1007/s10652-008-9078-3.

- Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2009). *Memoria descriptiva de la presa Endhó*. Ciudad de México, México: Comisión Nacional del Agua.
- Del-Risco, E. M., Hurtado, O. E., & González, B. M. (2010). Estudio experimental de las presiones de levantamiento bajo una losa con juntas transversales al flujo. *Tecnología y ciencias del agua*, 1(1), 47-57.
- González, B. M., & Giraldo, S. (2014). Caracterización dinámica de sensores de presión utilizando el principio de la botella de Mariotte. *Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, (71), 202-212.
- González, B. M. (2016). Uplift force and momenta on a slab subjected to hydraulic jump. *DYNA*, 83 (199), 124-133. DOI: <http://dx.doi.org/10.15446/dyna.v83n199.52252>
- González, B. M., & Posada, G. L. (2016). Effects of joints and their waterstops on pressures spread over a slab subject to turbulent flow on a horizontal apron. *DYNA*, 83(197), 94-103. DOI: <https://dx.doi.org/10.15446/dyna.v83n197.47579>
- Hurtado, O. E., Del-Risco, M. E., & González, B. M. (2009). Presiones medidas en la base de una losa de fondo con juntas paralelas al flujo en un canal. *Revista de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia*, (47), 39-52.

- Iñiguez-Covarrubias M., Ojeda-Bustamante, W., & Díaz-Delgado, C. (2015). Mejoras de eficiencia hidráulica en vertedores con canal de descarga libre en presas: propuesta metodológica. *Tecnología y ciencias del agua*, 1(6), 69-79.
- JiJian, L. J. W., & JinDe, G. (2008). Similarity law of fluctuating pressure spectrum beneath hydraulic jump. *Chinese Science Bulletin*, 53(14), 2230-2238. DOI: 10.1007/s11434-008-0300-y
- Jiménez-Castañeda, A. A., Berezowsky-Verduzco, M., Hernández-López, E., & Caballero-Coranguez, C. A. (2020). Calibración y verificación de fórmulas para calcular el caudal en compuertas radiales con descarga sumergida. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 21(2), 1-14. Recuperado de <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2020.21n2.012>
- Khatsuria, R. M. (2013). *Hydraulics of spillways and energy dissipators*. Boca Raton, USA: CRC Press.
- Lopardo, R. (2010). Prototype measurements of pressure fluctuations in The Dalles Dam stilling basin. *Journal of Hydraulic Research*, 48(6), 822-823.
- Ochoa, R., & Camilo, J. (2006). Diseño de planes de emergencia de obras hidráulicas ante su riesgo de fallo-teoría y caso de estudio. *DYNA*, 73(148), 51-67.

Ramírez, A. I. (2011). La seguridad de presas desde la perspectiva hidrológica: Conferencia Enzo Levi 2010. *Tecnología y ciencias del agua*, 2(2), 157-173.

Sahuquillo, H. A. (2010). Filtraciones y subpresiones en presas. La influencia de los flujos perpendiculares al cauce. *Revista de Obras Públicas*, (3515), 19-36.