

Evolución de una brecha debido al aumento del nivel de aguas dentro del embalse de una presa de materiales graduados. Caso experimental

Tristhan Andrés Cervantes Yañez¹, César Augusto Navarro Rubio², Arturo Mendoza Estrada³, José Emmanuel Reséndiz Velázquez⁴, Brenda Daniela Mata Martínez⁵, Juan Pablo García Abraján⁶, Martín Alfonso Gutiérrez López⁷

Resumen

El efecto abanico que se genera en la ruptura de presa conforme a diferentes variables a las que puede estar sujeta es el principal objetivo dentro de esta investigación. Las presas con cortina de material graduado suelen ser susceptibles a un tipo de falla, lo que provoca inundaciones aguas abajo. Éste se presenta en la brecha generada sobre la corona de la cortina al tener contacto con el nivel de aguas arriba, lo que causa un transporte de sedimentos, erosión y un efecto en forma de abanico en esa zona

¹tristhan.cervya@gmail.com

⁴jresendiz24@alumnos.uaq.mx

⁵bmata20@alumnos.uaq.mx

⁶juanpgaab@gmail.com

^{1,2,3,4,5,6 y 7}Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro, México

Fecha de recepción:
28 de septiembre de 2018

Fecha de aceptación:
05 de diciembre de 2018

simultáneamente. Mediante pruebas de laboratorio con diversos materiales e instrumentos que nos ayudaron a simular un evento real a escala, se ha desarrollado todo un seguimiento a este efecto. En la captura de datos se utilizaron dispositivos de medición de niveles de agua con sensores ultrasónicos, capturas de video en la zona de interés referenciada a un mallado escalado y flujo de agua controlado por un canal de fondo móvil. Obtenida la información, el proceso de ordenamiento consistió en la relación que existe entre los parámetros mediante el *software Statistica_7.0.61.0*, dichos parámetros son: el tirante aguas arriba y abajo; amplitud de la brecha, arco y radio del abanico; otras variables se obtuvieron con apoyo de fórmulas técnicas. Al analizar los resultados, se obtuvo la relación entre el ancho del arco y el tirante aguas arriba, la amplitud del arco y la amplitud de la brecha. Con ello, se proporcionó un mejor panorama del fenómeno, además de relacionar los efectos que son posibles de cuantificar con aquellos que no lo son ante situaciones reales.

Abstract

The fan effect that is generated in the rupture of dam, according to different variables to which it may be subject, is the main objective within this investigation. Dams with curtain of graduated material are usually susceptible to a type of failure, causing flooding downstream. This occurs in the gap generated on the crown of the curtain to have contact with the level of upstream causing a transport of sediments, erosion and a fan-shaped effect in that area simultaneously. Through laboratory tests with various materials and instruments that helped us simulate a real event at scale, a whole follow-up has been developed to this effect. In the data capture, water level measurement devices were used with ultrasonic sensors, video captures in the area of interest referenced to a scaled mesh and water flow

controlled by a mobile bottom channel. Obtained the information, the ordering process consisted of the relationship that exists between the parameters using the *software Statistica_7.0.61.0*, said parameters are the upstream and downstream level; amplitude of gap, arc and radius of the fan; other variables were obtained with the support of technical formulas. Analyzing the results, the relationship between the width of the arch and the upstream stringer, the amplitude of the arch and the amplitude of the gap were obtained. With that, it was provided a better panorama of the phenomenon, as well as relating the effects that can be quantified with those that can not in real situations.

Palabras clave: Ruptura, flujo, presa, brecha, evolución, falla, transporte de sedimentos, inundación, desastre, flujo de ruptura, erosión.

Problemática

Se pretende determinar a partir de las dimensiones geométricas el efecto de desalojo de aguas arriba del embalse que se generan en el agua al provocarse la ruptura de la brecha, debido a que, mientras aumenta el radio del abanico, más material socava.

Y es que los efectos provocados aguas abajo, por rompimiento de brecha de una presa, llegan a ser catastróficos; el agua que sale bruscamente forma una avenida que se traslada aguas abajo con una fuerte velocidad, por lo que el flujo posee una gran capacidad de transporte de sólidos y desarrolla una fuerza potencial de arrastre sobre objetos que se encuentren a su paso.

Introducción.

Al pasar de los años, es cada vez más difícil ignorar los acontecimientos relacionados con las rupturas de presas, como es el caso de la falla de la presa de Malpasset, en Francia, en mayo de 1968, pues es la

principal falla que ha sido ampliamente expuesta en foros, documentos científicos y técnicos. Ésta desempeña un papel importante en todo estudio referente a rupturas de presas debido ya que ha sido el parteaguas para estudiar y documentar los tipos de fallas que se pueden presentar, como es el caso de la implementación del modelo de alta resolución 2-D (Hervouet, 2000).

En todo el mundo, las inundaciones son cada vez más graves y más frecuentes debido al cambio climático, al crecimiento de la población, uso de la tierra, el riego, la deforestación y al desarrollo urbano en las llanuras de inundación.

Los distintos modos de falla de una presa han sido objeto de investigación a lo largo de los años, como el caso de la falla de cascada provocado por un deslizamiento de tierra. Se conoce también que los flujos de ruptura de presas son ocasionados por el transporte de sedimentos en camas inclinadas. Por lo que recientemente, diversos investigadores han examinado los efectos y causas de las rupturas de presas realizando diversos análisis y modelos en 1D y en 2D, basados en las ecuaciones de aguas someras para la ruptura de presas con propagación de ondas; como muestra la evidencia reciente sobre la materia, se sugiere que se debe tener un mejoramiento de la preparación ante inundaciones causadas por el rompimiento de presas mediante el uso de modelos de ruptura, o el estudio realizado con flujo de ruptura en el que se muestra la evolución de la interfaz agua-agua en su etapa inicial (Ye & Zhao, 2017).

Debido a lo anterior, la investigación sobre la evolución de la brecha de una presa es una preocupación constante dentro de la ingeniería hidráulica, ya que partir de conocer cómo es que ésta cambia a lo largo del tiempo, el caudal o tirante de agua se pueden prevenir y evitar posibles desastres catastróficos que producirían considerables pérdidas

materiales y humanas. Por ello, se han planteado cuestiones acerca de la predicción del potencial de ruptura de una presa debido a la evolución de la brecha con el fin de evaluar impactos potenciales o proporcionar información para ayudar a la planificación de emergencia y evacuación. A partir de lo anterior, se evitarían desastres como los que sucedieron el 5 de noviembre de 2015 en SE Brasil, donde se muestran las asociaciones espaciotemporales entre los eventos sísmicos y la respectiva falla de la presa (Agurto-Detzel et al., 2016).

Adentrándonos más en la evolución de la brecha, prolifera la preocupación sobre cómo es que ésta afecta en la falla y ruptura de la presa. Debido a que la mayoría de los estudios en este campo sólo han llevado a cabo investigaciones y experimentos aguas abajo, se han realizado experimentos de laboratorio a pequeña escala para evaluar los efectos del desbordamiento de la presa, así como investigaciones de fenómenos simultáneos que aparecen en un río (Serazul Islam, 2015), otras investigaciones solo se han centrado en los efectos del alto flujo del río en el lugar de inundación, de los materiales que conforman la brecha y la presa. Para el caso del material de lecho grueso, el proceso de erosión comienza en un inicio en la cresta del dique y la brecha progresa con el lavado del material de este último con el tiempo; mientras que en el caso del material de lecho fino, las características de los fenómenos de ruptura son diferentes con una gran erosión vertical en la sección del dique y una clara deformación del lecho del río que conlleva un alto riesgo de desastres en la llanura aluvial. (Islam & Tsujimoto, 2015).

A pesar de las posibles repercusiones de un rompimiento de brecha, aparentemente no se ha informado de ningún estudio sobre la simulación de la destrucción, ocasionado por la erosión de una

presa de morrena mediante su rebasamiento (Begam, S., Dhrubajyoti, S, & Subhasish, D. 2018).

El estudio de las fallas que pueden ocurrir en una presa de materiales graduados constituye una primera aproximación en los estudios de seguridad de presas o embalses, encaminados a definir los planes de emergencia y las estrategias de mitigación de riesgo en las áreas localizadas aguas abajo de éstas.

Los estudios publicados hasta el presente no han tenido en cuenta los fenómenos que se generan aguas arriba del embalse; por lo tanto, surge la necesidad de comprender el efecto del desalojo de aguas en esa sección y de determinar las dimensiones geométricas producidas por este, al provocarse la ruptura de la brecha, ya que se ha prestado escasa atención a estos diferentes procesos. Esta investigación pretende determinar la relación que existe entre la evolución de la brecha y la ruptura del embalse en el tiempo, debido a que conociendo cómo avanza una con respecto a la otra, se pueden realizar obras para mitigar el efecto que ocasiona la evolución de la brecha con la falla de la presa; con ello, se disminuirían los peligros que pueden ocasionar una catástrofe, las que ocasionan pérdidas materiales y humanas.

Metodología.

Hasta la fecha se han desarrollado e introducido varios métodos para cuantificar el rompimiento de una brecha aguas abajo del talud. En este estudio se pretende dar a conocer el análisis del rompimiento de brecha aguas arriba con la formación de un abanico que socaba el talud y genera grandes afectaciones en la parte de aguas abajo.

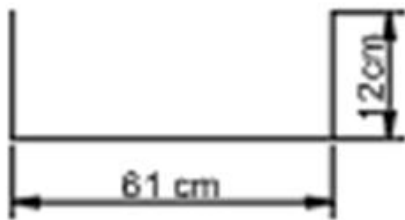


Fig. 1. Corte transversal del canal de fondo móvil.

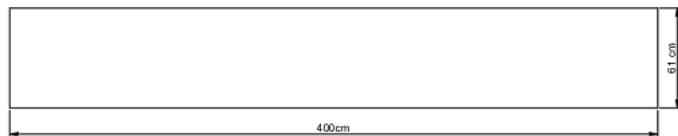


Fig. 2. Corte longitudinal del canal de fondo móvil.



Fig. 3. Canal de fondo móvil.

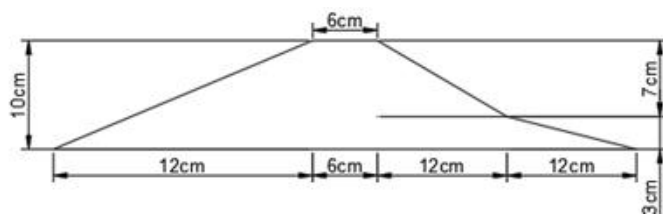


Fig. 4. Corte longitudinal de la presa a simular.

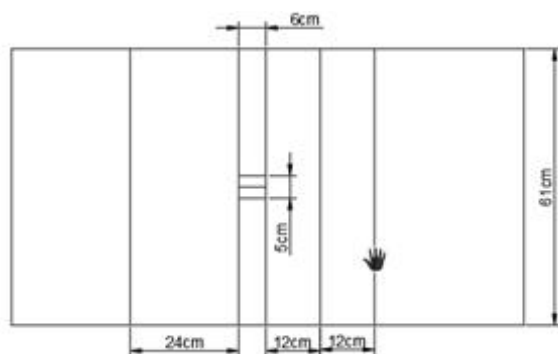


Fig. 5. Vista de planta de la presa a simular.

Los datos fueron obtenidos, para este análisis, por medio de las diversas modelaciones realizadas en el Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería del Centro Universitario de la Universidad Autónoma de Querétaro, mediante el empleo del canal de fondo móvil (escala 1cm-100cm) ilustrado en la Figura 1, 2 y 3, cuyas dimensiones están señaladas en la Figura 2. Para representar las dimensiones de todas las secciones se utiliza el software AutoCAD 2017.

Se llevaron a cabo 2 modelaciones de distintos casos de rompimiento de brecha, ambos con las mismas dimensiones (ver Figura 4 y 5). Estas se realizaron con un corazón impermeable (madera con recubrimiento de plástico), con los cuales se trató de evidenciar cómo el tirante que se genera en la cortina de la presa afectaba el tamaño del abanico aguas arriba.

Se decidió que el mejor método a adoptar para la realización de esta investigación sería el trazado de una cuadrícula en la sección del talud con 20 cm aguas abajo y 20 cm aguas arriba (ver Figura 6), con ayuda de estambre pues es muy sencillo de emplear. Para examinar el fenómeno del abanico en detalle, se utiliza una video-cámara apoyada sobre el canal, ubicada exactamente encima de la cuadrícula; para efectos de la medición del tirante, se tomaron en cuenta los tirantes finales (efecto de socavación en el talud debido al abanico).



Fig. 6. Mallado de la sección del canal a estudiar.

La muestra empleada para el caso 1 de esta investigación es arena (material menor a la malla #4, ver Figura 7) y para el caso 2 arena con grava (ver Figura 8), las cuales se utilizan para la construcción del talud. Estas pequeñas muestras se seleccionaron aleatoriamente dado que en las presas hay materiales de diferentes agregados gruesos. Dichas muestras son cuarteadas y se selecciona un muestra representativa y con una brecha en la corona (ver Figura 9) de dimensiones ilustradas en la Figura 10 y 11.



Fig. 7. Arena a utilizar para la presa



Fig. 8. Arena con grava a utilizar para la presa.



Fig. 9. Brecha en la corona de la presa.

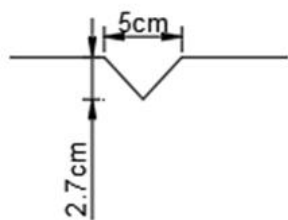


Fig. 10. Corte transversal de la brecha.

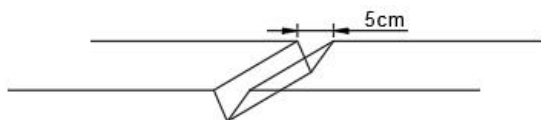


Fig. 11. Modelación de la brecha en corona de la presa.

Para reducir el sesgo en los niveles aguas arriba y aguas abajo, las mediciones se llevaron a cabo con sensores ultrasónicos de proximidad que mandan la base de datos registrada a una plataforma llamado “Código Arduino Emisor” y “Código Arduino Registro” (ver Figura 12) que se abren mediante el software de Arduino.



Fig. 12. Ubicación y colocación de sensores ultrasónicos en el canal de fondo móvil.

Por medio de la utilización del canal, se bombea agua (bomba marca *ARMFIELD LIMITED RINGWOOD HAMPSHIRE ENGLAND* que se observa en la Figura 13 para la modelación. Con el empleo de la videocámara, se aprecia la evolución de la brecha en el tiempo; así como con ayuda de la cuadrícula (malla a cada 5 cm), se ve el incremento del radio al pasar el tiempo, todo ello con el fin de entender cómo se comporta la brecha al ir incrementando tanto el tirante como los efectos de socavación por las velocidades de descarga que se producen.



Fig. 13. Bomba Armfield Limited Ringwood Hampshire England.

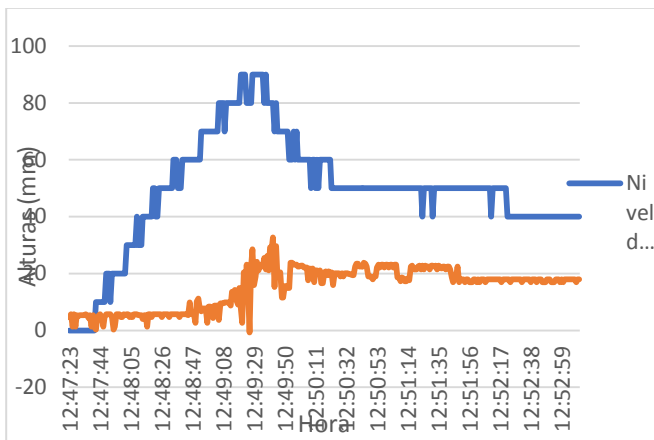
Resultados.

Los resultados obtenidos están representados por las siguientes tablas y gráficas:

Caso 1:

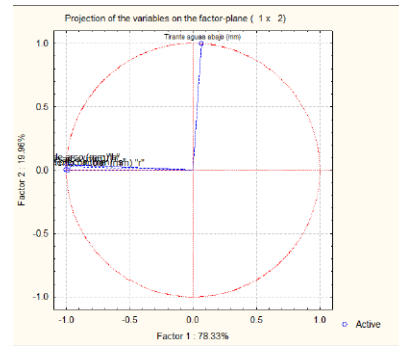
Tiempo	Tirante aguas arriba (mm)	Tirante aguas abajo (mm)	Amplitud de brecha (mm) "s"	Amplitud de arco (mm) "b"	Ancho de arco (mm) "h"	Radio de segmento circular (mm) "r"
00:00:00	50	20.05	0	0	0	0
00:00:05	50	19.02	17.96	26.65	8.17	9.02
00:00:10	50	19.71	30.97	37.35	8.86	17.95
00:00:15	50	23.46	33.58	51.3	16.05	16.81
00:00:20	50	23.46	37.23	56.31	17.51	18.65
00:00:25	50	18.00	220.02	257.41	56.81	135.09
00:00:30	50	22.10	285.73	310	51.7	223.23
00:00:35	50	23.12	349.15	378	62.22	276
00:00:40	50	23.12	355.22	381.05	59.3	295.63
00:00:45	50	18.68	372.05	389.53	52.36	353.08
00:00:50	50	17.66	369.26	358.98	64.46	296.62
00:00:55	50	21.41	365.42	395.61	66.32	283.15
			450	500	53	

Tabla 1. Evolución de la brecha a lo largo del tiempo, caso 1.

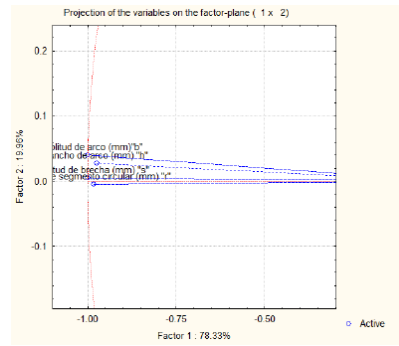


Gráfica 1. Tirantes de la cortina con material de diámetro medio = 1.68 mm.

Análisis de componentes principales:

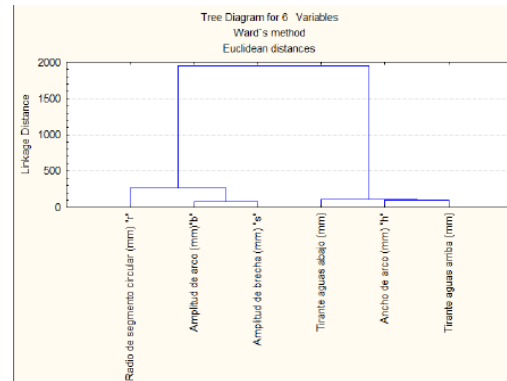


Gráfica 2. Análisis de componentes principales caso 1.

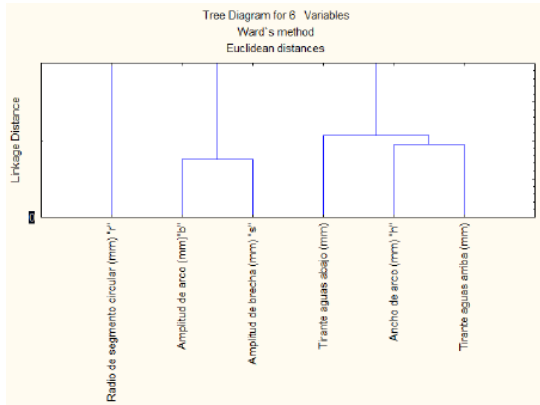


Gráfica 3. Análisis de componentes principales detallando las variables con mayor relación caso 1.

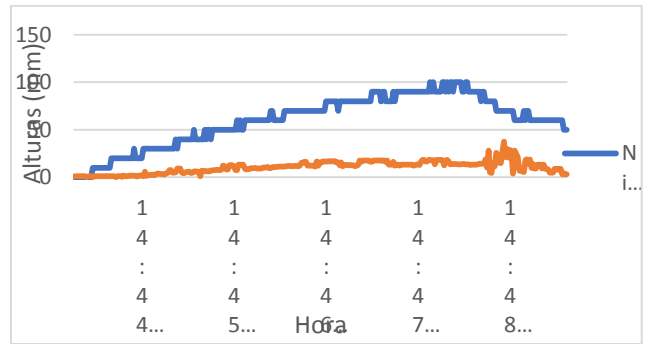
Dendrogramas:



Gráfica 4. Análisis de jerarquización de variables caso 1.



Gráfica 5. Análisis de jerarquización de variables detallado caso 1.



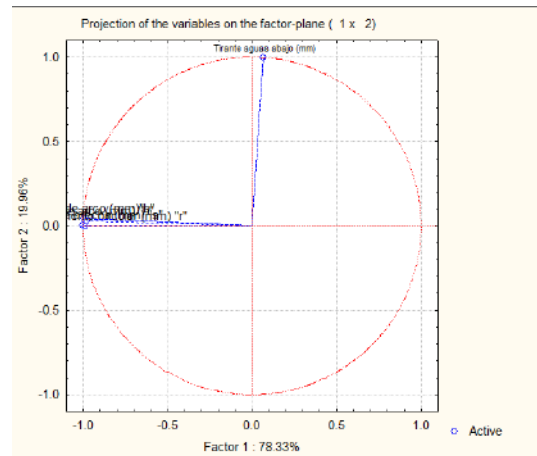
Gráfica 6. Tirantes de la prueba de la cortina de arena con grava.

Caso 2:

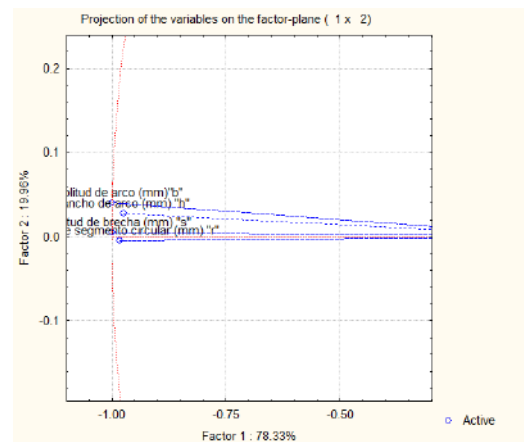
Tabla 2. Evolución de la brecha a lo largo del tiempo para el caso 2.

Tiempo	Tirante aguas arriba (mm)	Tirante aguas abajo (mm)	Amplitud de brecha (mm) "s"	Amplitud de arco (mm) "b"	Ancho de arco (mm) "h"	Radio de segmento circular (mm) "r"
00:00:00	100	14.05	0	0	0	0
00:00:05	90	14.05	0	0	0	0
00:00:10	90	13.37	0	0	0	0
00:00:15	90	14.39	0	0	0	0
00:00:20	80	10.29	0	0	0	0
00:00:25	80	11.66	0	0	0	0
00:00:30	70	26.68	0	0	0	0
00:00:35	70	28.73	0	0	0	0
00:00:40	60	21.22	0	0	0	0
00:00:45	60	17.80	0	0	0	0
00:00:50	60	14.05	70.045	74.13	10.45	63.87
00:00:55	60	13.37	96.83	113.36	25.1	59.23
00:01:00	60	7.90	163.19	182.65	35.11	112.35
00:01:05	60	8.93	259.54	329.52	85.74	141.05
00:01:10	50	4.15	337.28	374.18	69.42	239.55

Análisis de componentes principales:

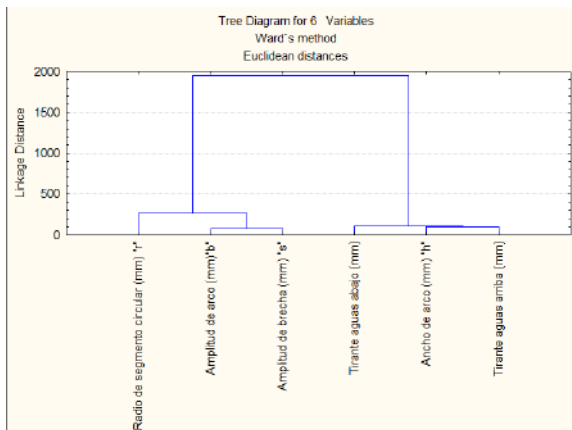


Gráfica 7. Análisis de componentes principales caso 2.

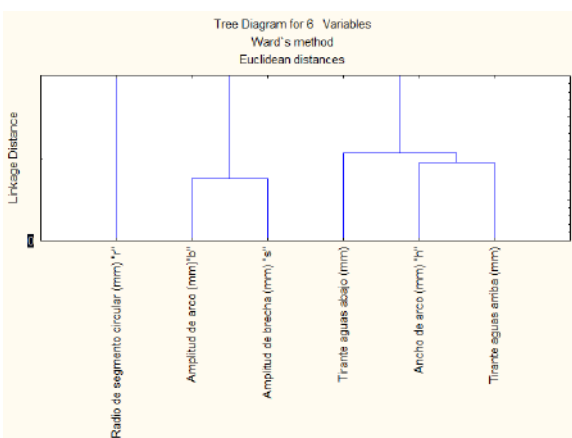


Gráfica 8. Análisis de componentes principales detallando las variables con mayor relación caso 2.

Dendrogramas:



Gráfica 9. Análisis de jerarquización de variables caso 2.



Gráfica 10. Análisis de jerarquización de variables detallado caso 2.

Durante el proceso experimental de las obras de alternativas de hidráulica, se observó que se presenta una formación de arco alrededor de la apertura, lo que genera así la forma geométrica de segmento circular. Ahí, la apariencia fue variando debido a los distintos elementos estructurales colocados (Figura 14).



Figura 14. Comportamiento del abanico.

Algunas variables, a simple vista, no son posibles de obtener, por lo que se optó por calcular, apoyados en el manual de fórmulas técnicas que posee la solución este tipo de fracción, datos como área, radio y el ángulo (Figura 15).

$$\alpha = 2\text{sen}^{-1}\left(\frac{s}{2r}\right)$$

$$A_1 = \frac{\hat{\alpha}}{2} r^2$$

$$r = \frac{h}{2} + \frac{s^2}{8h}$$

$$A = \frac{h}{6s} (3h^2 + 4s)$$

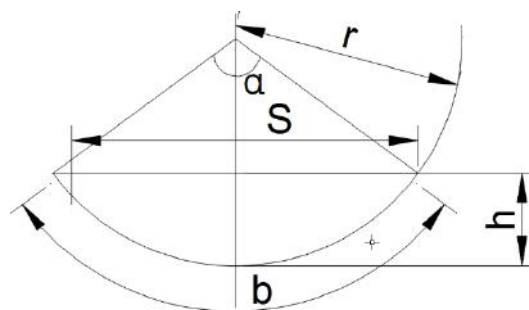


Figura 15. Características de sección circular.

Discusión.

Mediante el empleo de un análisis multivariable por medio del *software Statistica_7.0.61.0* (ver Gráfica 5), se puede apreciar que la mayor relación se da entre el ancho del arco y el tirante aguas arriba; mientras que el radio de segmento circular no tiene relación con ambos tirantes. No obstante, también se muestra una fuerte relación entre la amplitud del arco y la amplitud de la brecha.

Conclusión.

Podemos concluir a partir de los datos obtenidos, que en ambos casos y considerando el tipo de material para las pruebas realizadas, no existe una relación entre el fenómeno formado por el rompimiento de presa “abanico”, que mantiene las condiciones geométricas de un segmento de círculo, y el

incremento del tirante aguas arriba en el embalse. Además, la interpretación de los datos muestra una relación fuerte entre la amplitud del arco y la amplitud de la brecha, por lo que estos resultados pueden ayudar a comprender el comportamiento del rompimiento de una presa de materiales graduados, provocado por la erosión debido al paso del agua a través de la brecha.

Agradecimientos

M.C. Juan Pablo Molina Aguilar
Lic. Mario Alexis Jurado Hernández

Referencias.

- Hervouet, J. (2000). A high resolution 2-D dam-break model using parallelization. *Hydrological Processes*, 14(13), 2211-2230. doi: 10.1002/1099-1085(200009)14:13<2211::aid-hyp24>3.0.co;2-8
- Ye, Z., & Zhao, X. (2017). Investigation of water-water interface in dam break flow with a wet bed. *Journal Of Hydrology*, 548, 104-120. doi: 10.1016/j.jhydrol.2017.02.055
- Serazul Islam, M. (2015). Experimental and Numerical Approaches to Overtopping Levee Breach Effects in a River and Floodplain. *American Journal Of Civil Engineering*, 3(2), 31. doi: 10.11648/j.ajce.20150302.12
- Agurto-Detzel, H., Ciardelli, C. et al., Bianchi, M., Assumpção, M., Schimmel, M. & Collaço, B. (2016). The tailings dam failure of 5 November 2015 in SE Brazil and its preceding seismic sequence. *Geophysical Research Letters*, 43(10), 4929-4936. doi: 10.1002/2016gl069257
- Begam, S., Dhruvajyoti, S., & Subhasish, D. (2018). Moraine dam breach and glacial lake outburst flood generation by physical and numerical models. *Journal of hidrology*, 563, 694-710. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.06.038>
- Islam, M., & Tsujimoto, T. (2015). Levee Breaching Process of a River and Disasters in Floodplain. *American Journal of Civil Engineering and Architecture*, 2015, Vol 3, No. 2, 39-44. doi: 10.12691/ajcea-3-2-1.