
Análisis de la licuefacción estática en las presas de Edenville y Sanford

Analysis of static liquefaction at the Edenville and Sanford dams

Ronald Luis Rangel-Reyes ¹.

Resumen:

El artículo sintetiza el fenómeno de licuefacción estática presentado en las presas de Edenville y Sanford, ubicadas en el Estado de Michigan en U.S.A., con el propósito de analizar las realizaciones causales y las manifestaciones externas del evento a través de la metodología de Árbol de Fallos y a la aplicación de los métodos histórico-lógico y analítico-sintético. El proceso evidenció la multicausalidad del evento categorizando los elementos causales como estructurales y no estructurales, asimismo, se destaca la importancia de la gradación del material arenoso utilizado para la conformación del cuerpo de las represas, el impacto de la disposición de los drenajes en relación a con la saturación del material arenoso del cuerpo de las represas, y la relevancia de la capacidad de regulación del sistema de represas en eventos extraordinarios.

Palabras clave: licuefacción estática, presas hídricas, árbol de fallos, caso Edenville y Sanford.

Abstract:

The article synthesizes the phenomenon of static liquefaction presented in the Edenville and Sanford dams, located in the State of Michigan in the U.S.A., to analyze the causal realizations and the external manifestations of the event through the Fault Tree methodology and the application of historical-logical and analytical-synthetic methods. The process evidenced the multicausality of the event, categorizing the causal elements as structural and non-structural; likewise, the importance of the gradation of the sandy material used for the conformation of the body of the dams, the impact of the disposition of the drainages about the saturation of the sandy material of the body of the barriers, and the relevance of the regulation capacity of the dam system in extraordinary events.

Keywords: static liquefaction, dams, fault tree, Edenville, and Sanford case.

Historial del artículo

Recibido para evaluación: 17 octubre 2022.

Aprobado para publicación: 21 noviembre 2022

¹ Metro Engineering Solutions, LLC., Ingeniero Civil, <https://orcid.org/0000-0001-8680-3696>
Autor de correspondencia: rrangelreyes52@gmail.com

Introducción

El fenómeno de licuefacción estática en presas es un evento asociado a múltiples factores que desencadenan un relave, caracterizada por la degradación de materiales granulados de baja densidad con un alto grado de saturación de agua, generando un espacio susceptible a la licuación que aumenta progresivamente con el paso del tiempo (Eyyub Karakan et al. , 2018).

La geotécnica, considera que la frecuencia de ocurrencia de este fenómeno se debe a suelos sin cohesión y con alta permeabilidad, que, ante la carga monotónicas, desarrolla una poro-presión aunado a un sobre empuje del agua, lo que resulta en el deslizamiento triaxial de los materiales del suelo (Vopilovsky et al., 2022). Es común que existan cambios de presión en la presa, pero el resultado se asocia directamente a la geometría de la presa, a las características de abatimiento y las condiciones de los materiales que la constituyen (Tapia, 2019).

En este sentido, el diseño de la presa constituye una evidencia de análisis y la existencia de drenajes con la ruta de conducción y salida, estableciendo el cuerpo de la presa compactada o de acuerdo con su denominación en inglés *embankment*. Adicionalmente, la selección del material y la capacidad de desagüe de la obra de regulación de la presa. Esto destaca la relevancia de la presión del agua capilar sobre eventos adicionales que determinan la ocurrencia del fenómeno de licuefacción.

De acuerdo con las estadísticas citadas, cerca del 40% de las fallas en las presas ocurren por desbordamiento o falta de capacidad en el vertedor; la pregunta es si esto se debe a qué se eligió mal el periodo de retorno o a que a pesar de que éste fue seleccionado adecuadamente, se realizó una mala estimación del evento de diseño. En el primero de los casos resulta evidente que es imposible dimensionar una estructura infalible, pero se acepta que el riesgo de excedencia de la avenida de diseño debe minimizarse hasta donde sea posible (Ramírez, 2011).

De acuerdo con la investigación realizada por Rodríguez-Pacheco et al. (2021), sobra fallas en 14 presas de lodos mineros por licuefacción estática, arrojo que la mayoría de las presas han sido construidos por el método de llenado hidráulico; los lodos estaban saturados en el momento de la licuefacción y desarrollo de la falla, y, que el nivel de agua en las presas fue más alto que el de proyecto en diferentes momentos de la construcción, llenado y en el momento de la falla. Existe la posibilidad, de analizar a través de la herramienta informática el pre y post proceso de variación de desplazamientos, aceleraciones, esfuerzos axiales, deformación y presión de poro de la masa del suelo, a través de la carga de información geométrica y geotécnica (Collahuazo & Cruz, 2017).

En otro nivel de intervención, el empleo de un modelo de gestión de presas de depósito de relaves mejorados se enfoca a optimizar continuamente el desempeño de las prácticas de ingeniería incluyendo criterios medioambientales y de seguridad, bajo la adecuación al ciclo de planificar, hacer, verificar y actuar, propuesto por Edwards Deming (Arias Quispe, 2021). Es de interés mencionar que, existe un factor

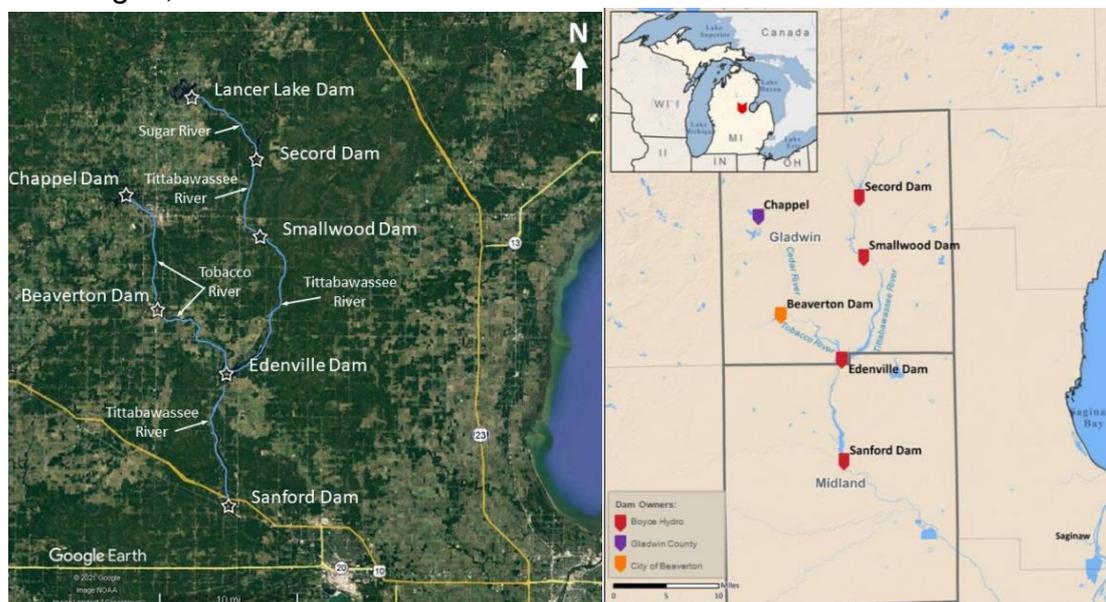
de seguridad con alto valor en la ocurrencia del fenómeno de licuefacción estática (Pastor, Tomás, Cano, & Riquelme, 2018).

Ahora bien, el estallido por baja presión sobre el los Grandes Lagos de Michigan, en el periodo de mayo del 2020, generó una falla de la presa Sanford y Edenville ubicadas en el condado de Midland y en la una inundación y daños severos que afecto construcciones, hogares, carreteras, infraestructuras útiles y en recursos naturales, afectando aproximadamente a 11mil residentes y 4 mil estructuras, que representan perdidas, en la evaluación preliminar, mayores a 250 millones de dólares (FEMA, 2022).

Las represas de Edenville y Sanford eran dos represas en Michigan ubicadas en serie a lo largo del mismo río; construidas en la década de 1920, que, en el momento del fallo, solo la de Sanford se encontraba activa. La combinación de precipitaciones excesivas y problemas de mantenimiento, desencadeno una serie de daños generalizados que afectaron las adyacencias de las presas, como se puede visualizar en la figura 1.

Figura 1

Ubicación de las presas involucradas en la falla del condado de Midland, Michigan, Estados Unidos.



Fuente: Federal Emergency Management Agency (2021).

Los principales mecanismos se asocian por los que se desarrolla este fenómeno de licuefacción estática, en el caso de fallos en presas, se deben al sistema de drenaje, sobrepaso del nivel de agua, colapso de la fundación y erosión interna, así también, es importante considerar los elementos ambientales propios del lugar en donde se encuentre la presa. En tal efecto, el presente artículo, tiene el propósito de analizar el fenómeno de licuefacción estática, empleando el método de árbol de fallas, en las presas de Edenville y Sanford, ubicadas en el condado de Midland, Michigan.

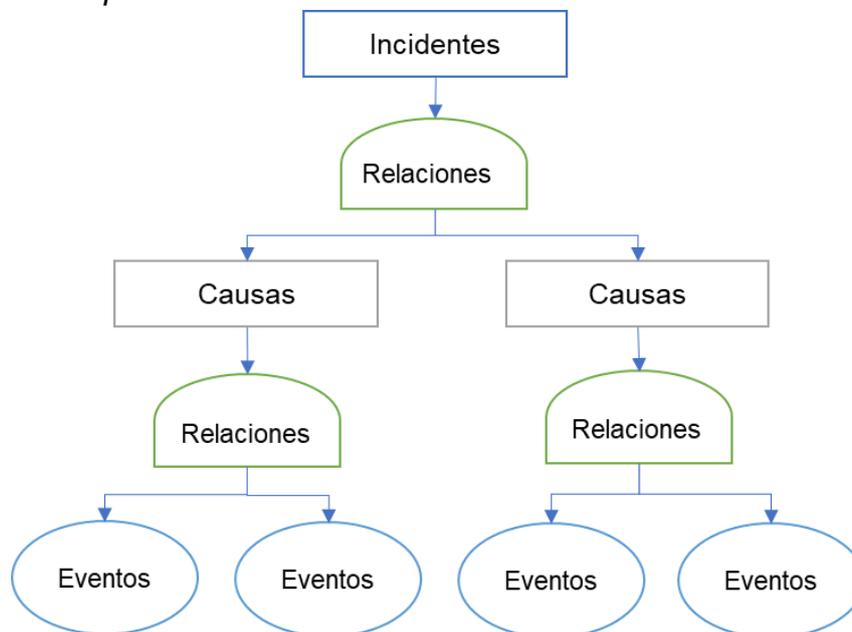
Metodología

Es estudio corresponde investigación observacional, documental, con un nivel analítico deductivo, empleando la metodología de árbol de fallo (Ver Figura 2), conocido por sus siglas en inglés FTA (Fault Tree Analysis) como medio para establecer una relación causal bajo una representación gráfica de “caminos” dentro de un sistema (López Calvajar, Alonso Hernández, Mazaira Rodríguez, & Ricardo Cabrera, 2018), lo que permite distinguir los siguientes elementos del evento:

- Probabilidad del fallo del sistema.
- Vulnerabilidad del sistema.
- Consumo de recursos para el control de la vulnerabilidad.
- Reconfiguración del sistema a fin de reducir la vulnerabilidad.
- Caminos principales hacia el desastre.
- Puntos de fallos potenciales.

Figura 2

Representación del modelo árbol de fallos



Fuente: Elaboración propia del autor (2022).

La revisión teórica tuvo lugar por medio de una búsqueda científica en las bases de datos Google Académico, Scielo, Springer, Elsevier y ResearchGate. Adicionalmente, se consultaron fuentes gubernamentales asociadas al evento, como el Programa Nacional de Seguridad de Represas (NDSP) de la Agencia para el Manejo de Emergencias (FEMA), con el apoyo de la Agencia del Centro Nacional de Integración (NIC). La interpretación del caso consideró los métodos histórico-lógico y analítico-sintético.

Resultados y Discusión

El fenómeno de licuefacción estática en las presas de Sanford y Edenville ocurrió el 20 de mayo del 2020 y fue asociado a múltiples causas. Surgieron registros gubernamentales e independientes que coincidieron en esta determinación que afectó las arenas saturadas en la sección de aguas abajo de la presa que condujo a la inestabilidad del terraplén. Este fenómeno, afecta los suelos granulares, haciéndoles perder su resistencia significativamente hasta afectar su nivel freático (Henríquez, 2007). El diseño de una presa cuenta con especificaciones que garantizan su funcionamiento tal como se detallan en la tabla 1.

Tabla 1
Criterios en el diseño de presas de relave

Criterio	Definición	Elemento descriptivo	Condición en la Presa
Composición del material	Capacidad de la granulometría de los suelos finos	Plasticidad	Fracción de finos 5% Límite de liquidez % Humedad 2%
Índice de vacíos críticos	Estado final de volumen constante	Presión de poros	Frontera entre exceso de presión de poros positiva y de presión de poros negativa
Índice de vacíos: estado de deformación	El estado en el cual el suelo fluye continuamente bajo tensión cizallante constante, volumen constante y velocidad constante	SSL - línea de estado permanente	El análisis del suelo por debajo de la SSL
Índice de vacíos: Parámetro de estado	Es el índice de vacíos en la línea de estado permanente bajo la tensión efectiva confinante de interés	$\Psi = e_0 - e_{ss}$ Parámetro de estado = índice de vacíos inicial – índice de vacíos bajo tensión efectiva	valores negativos de ψ

Fuente: López-Acosta et al. (2019).

Las presas de Sanford y Edenville no cuentan con los registros del diseño debido a la antigüedad, lo que dificulta en manejo de la información técnica sobre las patologías que pudieron originarse a partir de los materiales empleados o las especificaciones de las estructuras. No obstante, existe un registro detallado de los hechos, de acuerdo con el informe presentado por la Agencia Federal para el Manejo de Emergencias (2021), el 17/05/2020, tres días antes de la falla, los lagos adyacentes a las presas presentaron una disminución en su nivel de agua debido al aumento en las presas y se pronosticó lluvias significativas en los días siguientes. El 18/05/2020, dos días antes, se registraron lluvias 2,79 pulgadas en el caso de Sanford (82 %) y 3,8 pulgadas en Edenville (95 %).

Informes indican que se realizaron algunos ajustes en las puertas, pero en el caso de Sanford la electricidad no se pudo generar y tampoco fue posible liberar agua, las esclusas no funcionaron, en Edenville la licencia hidroeléctrica había sido revocada. La tabla a continuación resume los niveles del lago al final del día 18 y 19 de mayo, el aumento del nivel del agua:

Tabla 2
Niveles de agua de los lagos

Presas	18/05/2020 (11:59pm)	19/05/2020 (6:00am)	19/05/2020 (tarde)
Edenville	El. 206,65 metros; 67,05 centímetros arriba nivel normal de la taza	El. 207,08 metros; 109,72 centímetros arriba nivel normal de la taza	No disponible
Sanford	El. 192,29 metros, 3,04 centímetros arriba nivel normal de la taza	El. 192,54 metros; 27,43 centímetros arriba nivel normal de la taza	El. 192,72 metros; 45,72 centímetros arriba del nivel normal de la taza

Fuente: Federal Emergency Management Agency (2021).

Particularmente, en la presa Edenville, las seis puertas de aliviaderos operaron hasta el momento en que se manifestó la falla, el día 20 de mayo del 2020. Dos días antes, el lago Wixon adyacente a ambas presas, alcanzo el nivel normal de la taza, correspondiente a 205,98 metros, el día previo llegó a 206,74 metros, y el día de la falla a pesar que no se cuenta con las mediciones se estima que alcanzó 207,66 metros. En el caso de Sanford, por su ubicación recibió el flujo de salida de la presa Edenville, ya el 19 de mayo presentaba un nivel de 193,48 metros, luego el tapón fusible comenzó a erosionarse combinando su capacidad con las compuertas del aliviadero, pero estos mecanismos no fueron suficientes, ante la inundación en Edenville se desbordo la Presa Sanford como se visualiza en la figura 3 (Federal Emergency Management Agency, 2021).

Figura 3
 Fotografías del desborde del agua por la falla presentada en las Presas Sanford y Edenville ubicadas en el Estado de Michigan el 20/05/2020



Presa Sanford



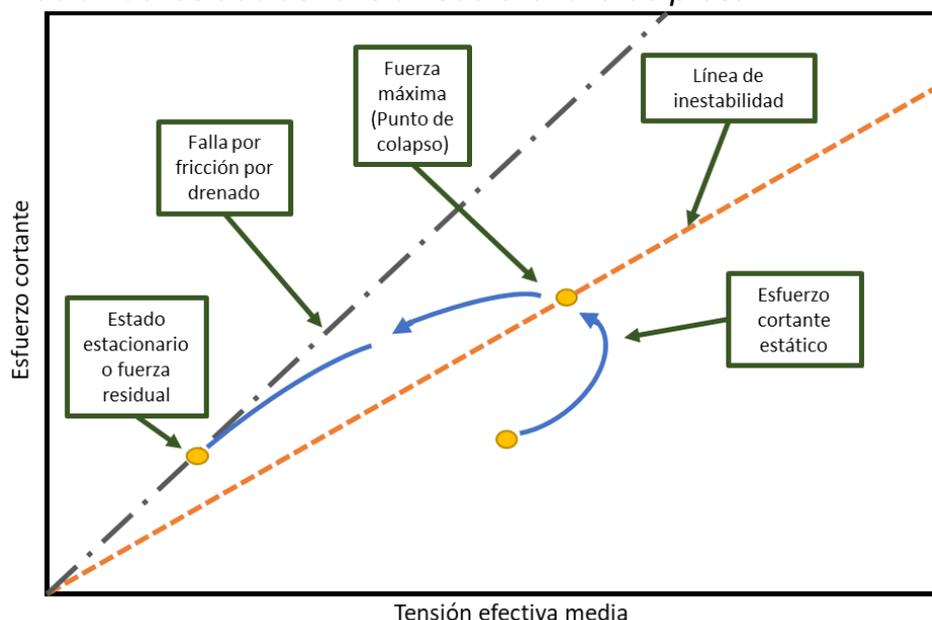
Presa Edenville

Fuente: Imágenes capturadas de Saginaw News (2020) y en Detroit Free Press (2021).

Es importante destacar, que los terraplenes de las presas evidenciaron erosión y desmoronamiento, las entrevistas al personal de ingeniería indican que se implementaron medidas de control de erosión con barreras de turbidez, sacos de arena y geotela (Federal Emergency Management Agency, 2021). No obstante, estas medidas son insuficientes ante la erosión por corriente de descarga, pues, la falla generada por licuefacción estática de las arenas saturadas bajo el agua, generan un colapso ante la carga de corte sostenida, originando una alta presión intersticial que resulta en una pérdida de fuerza y estabilidad (France et al., 2022), como se representa en la figura 4.

Figura 4

Representación del estado de tensión sobre la falla de presa.



Fuente: Elaboración del autor a partir de la publicación del Equipo Forense (France et al., 2022)

Este comportamiento de tensión versus deformación ubica en una posición frágil a la presa debido a su edad. En este momento, la resistencia residual es muy baja para el esfuerzo y este desequilibrio de fuerzas actúa en la masa del suelo, aunado a los eventos previos y posteriores, las causas y manifestaciones de esta falla.

En este contexto, el desarrollo de una falla en presas como las descritas, corresponde a un acontecimiento multifactorial, que, en concordancia con la representación en el análisis a través del árbol de fallos, puede involucrar causas estructurales correspondientes a la construcción de la presa y elementos no estructurales que se asocian a los procesos subsecuentes a la gestión de la presa y áreas adyacentes, las cuales se representan a continuación según relaciones y probabilidades de ocurrencia en la figura 5.

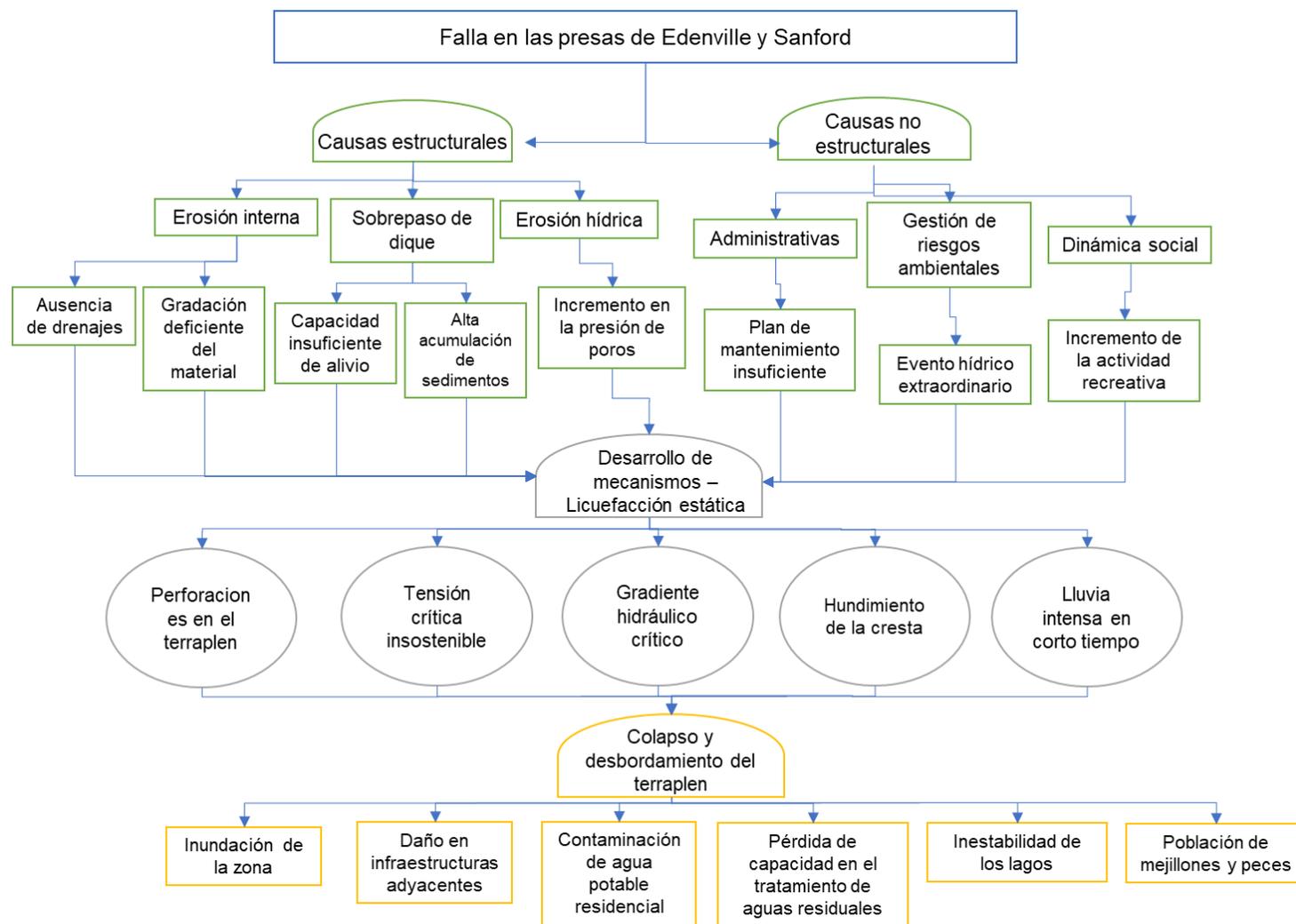


Figura 5. Árbol de fallos del evento. Fuente: Elaboración propia del autor (2022).

En relación con los mecanismos que se van desencadenando progresivamente en este fenómeno de licuefacción, los informes de Sanford y Edenville cuentan con la ocurrencia de un desbordamiento del nivel de agua que simultáneamente impulso un desprendimiento de materia y depresión de la cresta de la presa. A medida que el agua del embalse iba aumentando, se consideró la brecha controlada, pero fue aplazada, lo que generó el hundimiento de la cresta del lado izquierdo del terraplén. Es evidente como el desbordamiento del terraplén ocurre en simultáneo ante la erosión interna haciéndolo inestable. En tal efecto, a continuación, se discuten tres sucesos determinantes que son considerados como nudos críticos en los casos estudiados:

1. Gradación del material arenoso utilizado para la conformación del cuerpo de las represas

Las condiciones geomorfológicas y geológicas de las presas requieren valles amplios con macizos de cimentación muy deformables o de baja resistencia. Es importante contar con la mayor impermeabilidad posible, con un nivel de resistencia en el suelo que permita establecer una fundación y una capacidad de almacenamiento (Gómez, 2019). En estas obras geotécnicas se requieren de tres elementos principales, como lo es el suelo de la cimentación, el material de préstamo que compone al dique de arranque y el relave almacenado, secundariamente, se consideran los materiales del terraplén, el cimiento de la presa y las condiciones de estabilidad del talud (Tuco-Huarahuara & Gonzáles-Haramboure, 2019).

De acuerdo con la Sociedad de Presas de los Estados Unidos (2011), las propiedades del enrocado están determinadas en gran medida por la gradación y la resistencia de la roca. Los materiales de escollera para las zonas de caparazón compactado de las represas modernas son generalmente compuestos de fragmentos de roca gruesa o cantos rodados y grava, que varían ampliamente en gradación de tamaño de partícula, pero generalmente con un tamaño máximo de 18 a 48 pulgadas, clasificación hasta finos con 20 a 40 por ciento pasando un tamiz de 1 pulgada y 5 a 15 por ciento pasando un Tamiz nº 4. La determinación del rango de gradación potencial de los materiales de escollera de la cantera los sitios para grandes represas se deben estimar mediante voladuras de prueba y rellenos de prueba, así, la gradación de escollera materiales para presas medianas y pequeñas pueden estimarse a partir de la experiencia con el formación geológica y perforación de testigos. Los terraplenes de material bien graduado tienen altos módulos de deformación y como resultado hay menos asentamiento, así como menos trituración de las partículas de roca.

Particularmente, las presas de Edenville y Sanford, cuentan con informes que presumen como mecanismos potenciales de la falla a la erosión interna en el momento en que el nivel de agua sobrepasa los niveles de la presa. Las especificaciones de construcción indican que, con suelo relativamente impermeable de grano fino colocado aguas arriba de la línea central del terraplén y un relleno más

permeable colocado aguas abajo de la línea central puede crear un terraplén de dos zonas. Este análisis de gradación del suelo solo está disponible como una exploración histórica en investigaciones posteriores a la falla, que indica el material y cimentación de la presa, que en los casos estudiados no se encontraron bolsas de grava o cantidades significativas de partículas de grava, que, de acuerdo con los análisis de gradación, las arenas funcionarían como filtros para los suelos más finos, sin la presencia de esta grava gruesa, la cara libre del terraplén y la cimentación o un tubo de desagüe de la cimentación sin filtrar, fueron las salidas de filtración más probables que permitieron la eliminación de la erosión interna (France et al., 2022).

En este contexto, la conductibilidad hidráulica del material en función a la carga de succión del suelo debe ser cercana a nula, para evitar el flujo transitorio, y, en consecuencia, garantizar un grado de saturación o contenido volumétrico de agua cero (Macías, Vargas, & Arellano, 2018).

2. Impacto de la disposición inadecuada de los drenajes contribuyo a la saturación del material arenoso del cuerpo de las represas

La falla en la funcionalidad de los drenajes está íntimamente ligada a la falla de erosión interna de la presa, que, en los casos estudiados, los informes históricos registraron el fluido de cimientos en las tuberías de drenajes aunado a la inexistencia de reporte de construcción de filtros en el terraplén permitiendo la salida de la arena erosionada de forma continua (Federal Emergency Management Agency, 2021).

En este contexto, la posición del conducto de flujo libre en las condiciones de drenaje modeladas es la segunda característica más importante que influyen en la estabilidad y seguridad de los taludes de una presa. La disposición de un drenaje superficial basado en un modelo de análisis de acuerdo con las condiciones de cargas propuestas se asegura un factor de seguridad superior a 1,9 y disminuye la posibilidad de infiltración, lo que a su vez contribuye a mejorar la estabilidad y seguridad de los taludes de la presa tras su etapa de cierre (Tuco-Huarahuara & González-Haramboure, 2019).

Bajo otra perspectiva, la capacidad de drenes basales diseñados conservadoramente, cubriendo un porcentaje importante del área de cimentación, permitiendo la posible ruptura de partículas y compresibilidad de acuerdo con los niveles de tensión podría hacer viable para el manejo de la presa (Valenzuela, 2016).

3. Importancia de la capacidad de regulación del sistema de represas en eventos extraordinarios

El concepto del periodo de retorno conjunto, fundamental en el denominado análisis de frecuencias conjunto, es muy flexible y se puede aplicar en la solución de muchos problemas que involucren la caracterización probabilística de varias variables. Este método evita la arbitrariedad en la asignación del volumen de la avenida, permitiendo obtener la solución con los efectos más desfavorables para la obra en particular, la cual se ve involucrada en el proceso de estimación de la avenida de diseño (Ramírez,

2011). En tal efecto, el cálculo de este valor es parte de seguridad hidrológica en la revisión de presas.

En Estados Unidos se cuenta con periodos de retorno de hasta 100 años, las precipitaciones de diseño se toman como la suma de la P100 más una fracción de la diferencia entre el P100 y la PMP. No obstante, ante los cambios locales y regionales que genera el calentamiento global, este registro puede ser obsoleto. Es probable que un diseño existente o planeado, basado en el registro disponible, se convierta en menos conservador bajo un cambio de húmedo a árido debido a un aumento en la intensidad de lluvia, o bajo un cambio de árido a húmedo debido a un aumento en la profundidad de lluvia (Ponce, 2008). En el caso de las presas abordadas, se desconoce la tasa de retorno, pero de acuerdo con el autor mencionado, el periodo de retorno en años de presas como aliviadero principal oscila entre 25 a 100 años y en caso de presas como aliviadero de emergencias oscila de 100 a 10.000 años de precipitación máxima probable.

La importancia del periodo de retorno y determinar la probabilidad de que ocurra, constituyen un punto esencial en garantizar la vida útil de la presa, que tenga una duración que permita satisfacer las necesidades por la que se diseña la presa de tierra. Al seleccionar el periodo de retorno para el cálculo de capacidades y otros elementos de la obra, este criterio se da al revisar los historiales de lluvia en la zona, de modo que la selección del valor toma en consideración un evento de lluvia cuantioso. En el caso estudio, este factor pudo activar una gestión proactiva de riesgos, más en este caso donde la presa se ve bordeada por un área residencial con actividad económica.

Conclusiones

Las tres dimensiones abordadas en la discusión del caso constituyen los elementos más relevantes a considerar en el diseño e implementación de presas bajo del modelo de tierra. La falla por licuefacción estática evidenció la insuficiencia de los mecanismos que contrarrestan este tipo de eventos, y acentúa la importancia de la información sobre el diseño y mediciones aplicadas a la gestión de los procesos en la presa.

Las presas no cuentan con una estimación acorde al cambio climático que se ha experimentado, pues en el momento en que fue diseñado para el alcance de 100 años, pero los últimos 30 años han presentado eventos extraordinarios en cuanto a lluvias torrenciales. Esto fue mermando la calidad y la vida útil de la presa, a pesar de la selección de un periodo de retorno prolongado, no se consideró otros eventos.

No existen los diseños y cálculos de las presas, pero los eventos hídricos del año 2020 sobrepasaron la estimación preexistente. La edad de las presas evidentemente ubica en desventaja a la presa ante eventos extraordinarios, pues no permite que los mecanismos de compensación sean suficientes.

La rehabilitación de una presa conlleva a enfrentar una inversión económica cuantiosa, en muchos casos no se considera factible ante la demanda de satisfacer

las necesidades que originaron la existencia de la presa y la urgencia de atender los daños generados por la falla.

Referencias

- Arias Quispe, C. F. (2021). *Mejoramiento de la gestión de una presa de relaves para disminuir los riesgos ambientales y de seguridad. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa (Tesis de Postgrado)*. Obtenido de <http://hdl.handle.net/20.500.12773/13521>
- Collahuazo, A., & Cruz, D. (2017). *Generación de una herramienta informática en el software OpenSees que permita modelar el efecto de licuefacción de suelos en zonas sísmicas. Universidad Técnica Particular de Loja (Tesis de grado)*. . Obtenido de <http://dspace.utpl.edu.ec/jspui/handle/20.500.11962/21496>
- Detroit Free Press. (2021). *Report: Loss of soil strength likely led to Edenville, Sanford dam collapses*. Obtenido de <https://www.freep.com/story/news/local/michigan/2021/09/14/soil-loss-edenville-sanford-dam-collapses-mid-michigan/5696511001/>
- Eyyub Karakan et al. . (2018). *The Liquefaction Behavior of Poorly Graded Sands Reinforced with Fibers. Hindawi. Advances in Civil Engineering. Research Article. Volume 2018, Article ID 4738628, 14 pages*. Obtenido de <https://doi.org/10.1155/2018/4738628>
- Federal Emergency Management Agency. (2021). *Michigan Dam Incident. Response Review. An Analysis of the 2020 Edenville and Sanford Dam Failure Response*. Obtenido de https://damsafety-prod.s3.amazonaws.com/s3fs-public/files/Edenville-Sanford_Interim%20Report_Sept2021_Final.pdf
- France et al. (2022). *Investigation of Failures of Edenville and Sanford Dams. Independent Forensic Team*. Obtenido de https://damsafety-prod.s3.amazonaws.com/s3fs-public/files/Edenville-Sanford_Final%20Report_Main%20Report%20and%20Appendices.pdf
- Gómez, C. (2019). *Comportamiento geotécnico de suelos arcillosos compactados, respuesta a cargas estáticas y dinámicas. Universidad Complutense de Madrid (Tesis Doctoral)*. Obtenido de <https://eprints.ucm.es/id/eprint/55931/1/T41185.pdf>
- Henríquez, C. (2007). *Mejora de terrenos potencialmente licuables con inyecciones de compactación. Universidad Politécnica de Madrid (Tesis Doctoral)*. Obtenido de https://oa.upm.es/379/1/CARLOS_HENRIQUEZ_PANTALEON.pdf
- López-Acosta et al. (2019). *Potencial de Licuefacción Estática en el Recrecimiento de una Represa de Relaves. Geotechnical Engineering in the XXI Century: Lessons learned and future challenges*. . Obtenido de doi:10.3233/STAL190238
- López Calvajar, G. A., Alonso Hernández, I., Mazaira Rodríguez, Z., & Ricardo Cabrera, H. (2018). *Árbol de fallo como herramienta para la mejora de*

- procesos. Estudio de caso cementera XPZ. *Revista Espacios*. Vol. 39 (Nº 06).
Pág. 19. Obtenido de
<https://www.revistaespacios.com/a18v39n06/a18v39n06p19.pdf>
- Macías, J., Vargas, A., & Arellano, F. (2018). *Conductividad hidráulica en dos sitios del valle central de costa rica: análisis comparativo de tres metodologías de ensayo en la zona no saturada*. *Revista Geológica de América Central*, núm. 59, pp. 71-96. Obtenido de
<https://www.redalyc.org/journal/454/45458111006/html/>
- MLive. (2020). *Pilot captures rushing water flowing through failed Edenville Dam*. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=RQh7kIDvNLw>
- Pastor, J. L., Tomás, R., Cano, M., & Riquelme, A. J. (2018). *Estudio comparativo del potencial de licuación de suelos usando las normas españolas y el Eurocódigo*. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 70(3), 761-778. . Obtenido de
<https://doi.org/10.18268/bsgm2018v70n3a9>
- Ponce, V. (2008). *Preguntas y respuestas sobre el periodo de retorno a ser usado para el diseño*. Obtenido de http://ponce.sdsu.edu/periodo_de_retorno.html
- Ramírez, A. I. (2011). *La seguridad de presas desde la perspectiva hidrológica*. *Conferencia Enzo Levi 2010. Tecnología y Ciencias del Agua*, II(2), 157-173. . Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/3535/353531973010.pdf>
- Rodríguez-Pacheco, R., Brime, Á., Muñoz-Moreno, A., & García-García, C. (2021). *Fallas de flujo en presas de lodos mineros por licuefacción estática*. *Geotemas (Madrid)*, ISSN 1576-5172, Nº. 18 (Ejemplar dedicado a: X Congreso Geológico de España), págs. 496-499. Obtenido de
https://www.researchgate.net/profile/Roberto-Lorenzo-Pacheco/publication/353211322_Flow_failure_of_tailings_dams_due_to_static_liquefaction_14_cases/links/60ed42ad9541032c6d36e12b/Flow-failure-of-tailings-dams-due-to-static-liquefaction-14-cases.pdf
- Tapia, G. (2019). *Estudio del comportamiento de una presa de tierra en condiciones de desembalse rápido mediante modelación numérica en 3D Caso: presa Mancilla - Municipio de Facatativá*. *Universidad Nacional de Colombia (Tesis de Maestría)*, 75-82.
- Tuco-Huarahuara, Y. R., & Gonzáles-Haramboure, Y. (2019). *Estabilidad de taludes en la presa de colas Agua Dulce en Potosí, Bolivia*. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 40(1), 110-121. Obtenido de
http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382019000100110&lng=es&tlng=es.
- United States Society on Dams. (2011). *Materials for Embankment Dams*. ISBN 978-1-884575-49-5. Library of Congress Control Number 2009942447. Obtenido de
<https://www.usdams.org/wp-content/uploads/2016/05/materials.pdf>
- Valenzuela, L. (2016). *Design, construction, operation and the effect of fines content and permeability on the seismic performance of tailings sand dams in Chile*. *Obras y proyectos*, (19), 6-22. . Obtenido de <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-28132016000100001>

Vopilovsky et al. (2022). *Análisis de licuación dinámica de una presa de relaves recrecida aguas arriba. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (Tesis de grado)*. Obtenido de <http://hdl.handle.net/10757/620532>