

Estado del arte de las presas argentinas, necesidad de evaluación de su seguridad sísmica y métodos de análisis

Capua, Daniel M.N.¹; Daziano, Alejandra¹; Jacinto, Abel C.¹

(1) *Facultad Ciencias Exactas y Tecnologías, Universidad Nacional de Tucumán.*
nicolascapua@gmail.com; madaziano@herrera.unt.edu.ar, ajacinto@herrera.unt.edu.ar

RESUMEN

Las presas son obras de gran importancia y sus condiciones de seguridad deben ser óptimas. El último registro de sismicidad del INPRES (31 de agosto, 2011 al 31 de enero, 2012) informa 4.066 sismos localizados en Argentina. Desde 01 de enero al 01 de abril de 2023 se registraron 1.448 sismos. Existen en Argentina más de 130 grandes presas, 36 de las cuales se encuentran emplazadas en el Noroeste Argentino (NOA). Dentro de las grandes presas, si se considera su tipología, existe un predominio de las presas de materiales sueltos, abarcando un 43% del total. El desempeño de estas bajo acción sísmica, se puede evaluar a través de los diferentes enfoques que incluyen métodos pseudoestáticos basados en la fuerza y fundados en el desplazamiento, métodos de bloques deslizantes y análisis dinámicos. Actualmente, se pueden realizar modelos numéricos mediante elementos finitos que reproducen un modelo virtual muy preciso de la estructura. La acción sísmica se puede representar mediante historias temporales de aceleración, correspondientes a sismos reales registrados, o mediante acelerogramas sintéticos, simulados o híbridos. En este trabajo se brinda un panorama de la situación de las presas en Argentina, el escenario sísmico general y los métodos disponibles para el análisis dinámico.

Palabras claves: presas – seguridad – sismos – análisis dinámico

ABSTRACT

Dams are critically important engineering works and the highest safety standards must be ensured. The latest INPRES seismicity record (August 31, 2011 to January 31, 2012) reports 4,066 localized earthquakes. From January 1 to April 1, 2023, 1,448 earthquakes were recorded in Argentina. There are more than 130 large dams in Argentina, 36 of which are located in the region of northwestern Argentina. Within the large dams, if their typology is considered, there is a predominance of earth dams, covering 43% of the total. Their performance under seismic action can be evaluated through different approaches that include force-based and displacement-based pseudostatic methods, sliding block methods, and dynamic analysis. Currently, numerical models can be made using finite elements that reproduce a very precise virtual model of the structure. Seismic action can be represented either by acceleration time histories, corresponding to real recorded earthquakes, or by synthetic, simulated or hybrid accelerograms. This paper provides an overview of the situation of dams in Argentina, the general seismic scenario and the available methods for dynamic analysis.

Keywords: dams – safety – earthquake – dynamic analysis

1. INTRODUCCIÓN

Las presas son infraestructuras estratégicas que contribuyen al bienestar de la sociedad y el desarrollo de los pueblos; cumplen diferentes propósitos tales como el control de crecidas, la provisión de agua para uso consuntivo, producción de energía, áreas de esparcimiento y otros. También suponen un riesgo por las

consecuencias derivadas de un eventual incidente/rotura.

La historia nos muestra numerosas fallas de presas que constituyeron verdaderas catástrofes, traducidas en fuertes pérdidas de vidas, daño económico, daño al ambiente y fuerte impacto social. Entre los casos más conocidos, se pueden mencionar: Austin, E.U., 1911 (80 muertos); St. Francis, E.U., 1928

(450); Vega de Tera, España, 1959 (144); Malpasset, Francia, 1959 (421); Vaiont, Italia, 1963 (2.600); Baldwin Hills, E.U., 1963 (5); Oros, Brasil, 1960 (1.000); Panshet, India, 1961 (4.000); Teton, E.U. 1976 (14); Machu, India, 1979 (2.000), entre otras. (Bereciartua y Dalmati, 2018).

El 4 enero de 1970, en la ciudad de Mendoza, Argentina, una precipitación intensa generó una avenida que destruyó al dique del arroyo Frías, dando lugar a la mayor catástrofe sufrida por la ciudad, después del terremoto del año 1861. Los daños materiales fueron cuantiosos y hubo 42 fallecidos. (Capitanelli, 1970).

Resulta clave lo expuesto por Juncal (2019), donde afirma que la prevención, mitigación y reparación de las catástrofes naturales y antrópicas se sustentan en una adecuada regulación, fiscalización y control de la infraestructura crítica de la sociedad.

En la República Argentina se ha construido más de un centenar de grandes presas y un importante número de presas de menor dimensión. Existen también diques de protección ante crecidas, terraplenes de recrecimiento de cuerpos lagunares, azudes y presas de relave minero o diques de cola.

Pero no existe un inventario preciso ni una ley o regulación nacional que garantice una explotación segura de los aprovechamientos.

Por lo tanto, es necesario contribuir al establecimiento de los mejores estándares de seguridad de todas las presas del país. Al hablar de seguridad, es común referirse al riesgo asociado a determinados escenarios, donde el riesgo hidrológico y el riesgo sísmico son, indudablemente, los primeros en plantearse.

En este trabajo se brindará un panorama de la situación de las presas en Argentina, el escenario sísmico general y los métodos disponibles para el análisis dinámico.

2. SISMICIDAD EN ARGENTINA

Se puede observar en el último mapa de sismicidad del Instituto Nacional de Prevención Sísmica - INPRES (Fig. 1) la distribución de los epicentros sísmicos. En los últimos 400 años se han producido terremotos destructivos, pero éstos no han afectado a las zonas más densamente pobladas y, por lo tanto, se ha subestimado la verdadera importancia del elevado nivel de peligro sísmico potencial. (INPRES, 2012).

En el período comprendido desde el 01/01 al 01/04 de 2023 se registraron en Argentina un total de 1448 sismos, de diferentes magnitudes en la escala de Richter (INPRES, 2023).

Su distribución se presenta en la Tabla 1. El Noroeste Argentino (NOA) es la segunda zona con mayor actividad sísmica del país, luego de la región Centro - Oeste. La probabilidad de que ocurra una determinada amplitud de movimiento del suelo en un intervalo de tiempo fijado, depende del nivel de sismicidad de cada zona. En la Fig. 2 se presenta el Mapa de Zonificación Sísmica del Reglamento INPRES-CIRSOC 103 donde se identifican 5 zonas de distinta peligrosidad sísmica. Se observa la concordancia entre los registros por región y el peligro sísmico de cada una de ellas (INPRES, 2018).

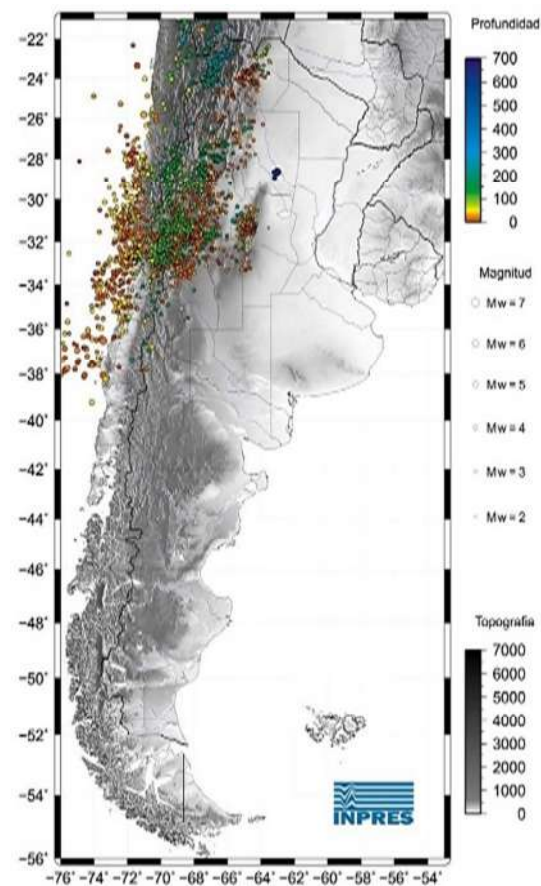


Figura 1. Último registro de sismicidad del INPRES, desde el 31 de agosto de 2011 al 31 de enero de 2012 (total de sismos localizados 4.066).

Tabla 1. Distribución de los registros sísmicos en Argentina por Región y Provincia (enero-abril 2023).

Región	Provincia	Cantidad	Total	[%]
N.O.A.	Jujuy	150	580	40
	Salta	180		
	Tucumán	7		
	Catamarca	79		
	Santiago del Estero	15		
	La Rioja	149		
Cuyo	Mendoza	88	835	58
	San Juan	732		
	San Luis	15		
Centro	Córdoba	22	22	2
Patagonia	Neuquén	9	11	1
	Santa Cruz	2		

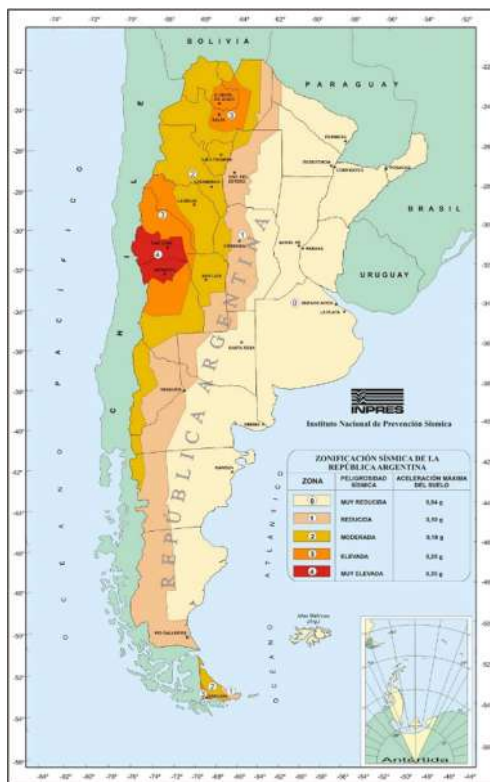


Figura 2. Zonificación Sísmica de la República Argentina. INPRES 2018.

3. PRESAS EN ARGENTINA Y EN EL NOA

Existen en Argentina más de 130 grandes presas, 36 de las cuales se encuentran emplazadas en el NOA (Fig. 3). En la Tabla 2 se observa la distribución de aprovechamientos en el territorio nacional. Puede contemplarse la existencia de gran cantidad de aprovechamientos en ciertas provincias con escasez de agua superficial y zonas áridas (ORSEP, 2020).

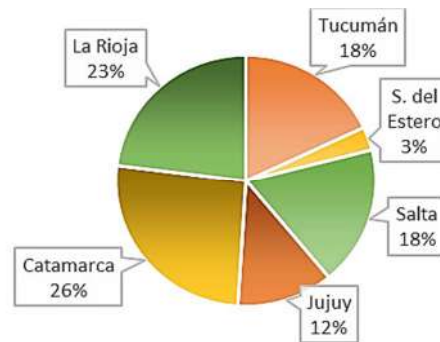


Figura 3. Distribución de presas en el NOA.

Tabla 2. Distribución de las presas por jurisdicción.

Jurisdicción	Cantidad	Jurisdicción	Cantidad
Buenos Aires	8	Neuquén	5
Catamarca	10	Neuquén/R. Negro	6
Chaco	3	Río Negro	2
Chubut	2	R. Negro/La Pampa	3
Córdoba	26	Salta	14
Binacionales	2	San Juan	7
Formosa	3	San Luis	18
Jujuy	6	Santa Fe	1
La Rioja	13	Santiago del Estero	5
Mendoza	16	Tucumán	20
Misiones	2	Total	172

La Comisión Internacional de Grandes Presas a nivel mundial (ICOLD) define a las grandes presas como aquellas cuya altura supere los 15 metros o esté entre 10 y 15 metros y satisfaga al menos uno de los siguientes criterios:

- Más de 500 m de longitud de coronación;
- Capacidad de embalse superior a 1 hm³;
- Capacidad de vertedero superior a 2000 m³/s;
- Presas con problemas especiales en la fundación;
- Presas provenientes de proyectos no usuales.

Dentro de las grandes presas, si se considera su tipología, existe un predominio de las presas de materiales sueltos, abarcando un 43% del total

(ORSEP, 2020). En cuanto a la altura, el 65% es inferior a 50 m, pero existen 13 presas con alturas superiores a 100 m. En la Tabla 3 y Fig. 4 se muestra la distribución de las presas en el país, de acuerdo a su tipología. (ORSEP, 2020)

Tabla 3. Distribución de las presas por tipología.

	Cantidad	Porcentaje (%)
Gravedad	40	26,4
Arco	14	9,2
Contrafuertes	15	9,8
HCR*	3	1,8
Escollera	11	7,4
Materiales sueltos	65	42,9
CFRD**	4	2,5
TOTAL	152	

* H° Comp. Rodillo, ** Materiales Suelos c/pantalla

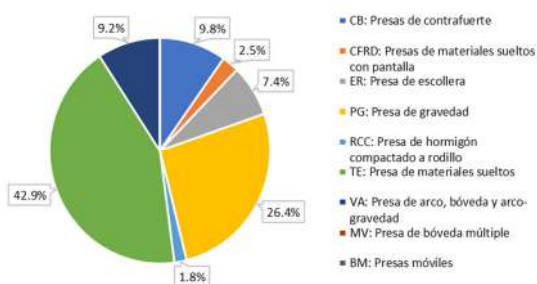


Figura 4. Distribución de presas según tipología.

Las presas de materiales sueltos predominan en alrededor del 65 % de todas las presas registradas en el mundo. Este es el tipo más arcaico y se han encontrado evidencias en las civilizaciones más antiguas. Además, este tipo de presa resulta muy versátil, ya que puede construirse con materiales locales y se adaptan a una amplia gama de condiciones del terreno de cimentación. Con un propósito comparativo se muestra el siguiente gráfico (Fig. 5) de tipologías de presas sobre 60.000 relevadas por ICOLD. (ICOLD, 2020)

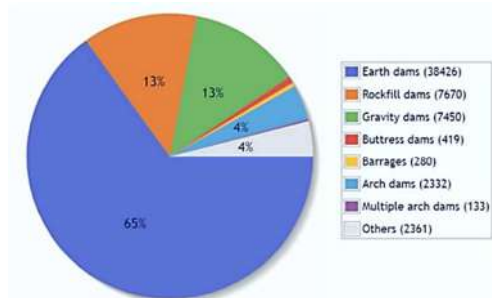


Figura 5. Tipología de presas a nivel mundial, ICOLD (2020).

En Argentina, existe un proyecto de legislación en el ámbito del Congreso Nacional y una urgente necesidad de aprobación y puesta en vigencia. El Comité Argentino de Presas reconoce la necesidad de que exista una Ley Federal de Seguridad de Presas, que establezca las pautas que toda presa de embalse deba respetar, dotando a la entidad administradora de recursos suficientes para la ejecución de las tareas necesarias, a los efectos de garantizar la seguridad de las personas y bienes ubicados abajo. En 2019 el proyecto de Ley, recibió media sanción de la Cámara de Senadores.

La ley diferenciará los distintos niveles de riesgo de acuerdo con la clasificación de daño potencial. Este se define en base a sus características, tales como altura, volumen de embalse y longitud de coronamiento. A la fecha, sólo existen inventarios realizados por distintos organismos nacionales y provinciales. Esta clasificación tendrá en cuenta la población total en núcleos afectados en caso de un daño potencial. El ORSEP (Dalmati, 2018) estima que más de 4.000.000 de personas están en riesgo de inundación por crecidas ordinarias e incidentes en presas.

La seguridad de las presas no sólo radica en el tratamiento de los aspectos técnicos, sino que depende de muchos otros factores, como son la planificación, el factor humano, la organización y los sistemas de gestión, todos fundamentales para alcanzar un nivel de riesgo aceptable. (Giuliani y Baylac, 2007). Resulta importante estimar la probabilidad de falla de las presas, para lo que se requiere de un análisis sistemático, donde se tengan en cuenta las distintas amenazas que podrían dar lugar al colapso de la obra, los modos de falla vinculados a estas amenazas y los procesos correspondientes a cada caso, a fin de evaluar partes vitales del sistema (presa, estribos, vertedero, etc.) (Giuliani, 2006). Las causas más comunes son el sobrepaso y la erosión interna, le siguen, la inestabilidad en la fundación y las excesivas deformaciones en la presa (Giuliani y Baylac, 2007).

4. EVALUACIÓN DE LA SEGURIDAD SÍSMICA DE LAS PRESAS EXISTENTES

Hay muchas presas que se han construido sin tener en cuenta las solicitaciones sísmicas o fueron diseñadas empleando métodos hoy obsoletos. Por lo tanto, no se sabe si estas presas cumplen con los criterios de seguridad y diseño

sísmico actuales. Además, existe la necesidad de controles de seguridad sísmica en los siguientes casos (Wieland, 2009):

- Se dispone de nueva información sobre peligrosidad sísmica (amenazas múltiples) y/o sismotectónica.
- Una presa ha sido objeto de fuertes excitaciones sísmicas.
- Se introducen nuevos criterios de diseño sísmico.
- Se introducen nuevos criterios referidos a la seguridad sísmica y al comportamiento.
- Se introducen nuevos métodos dinámicos de análisis, como el análisis dinámico no lineal.
- La vulnerabilidad sísmica de una presa ha aumentado debido a las modificaciones de la presa, el envejecimiento, etc.
- Cambios en la clasificación de riesgo de las represas.
- El riesgo sísmico ha aumentado, por ejemplo, debido al mayor número de personas que viven aguas abajo de una presa y/o debido al desarrollo económico, etc.

Frente a una legislación inexistente, en un país donde no se dispone de un inventario, se desconoce la vulnerabilidad sísmica de las presas. El primer paso es categorizar, en una escala global, la situación de cada estructura, es decir, generar un ordenamiento para asignar prioridades a la hora de realizar estudios más complejos. Es posible asignar a cada presa una categoría de riesgo sísmico, mediante la metodología del Índice de Vulnerabilidad Sísmica (Daziano, 2018). Este método utiliza una escala de valores para calificar diferentes características estructurales y constructivas de una presa, a las que se les asigna un valor numérico y cuya suma total representa la vulnerabilidad sísmica.

El desempeño de las presas de materiales sueltos, sometidas a acción sísmica, se puede evaluar a través de diferentes enfoques que incluyen métodos pseudoestáticos basados en la fuerza, basados en el desplazamiento métodos de bloques deslizantes y análisis dinámicos (Sherard, 1967; Seed et al., 1975).

4.1 *Análisis pseudoestático*

Los métodos de análisis sísmico pseudoestático para presas se introdujeron a mediados de la década de 1930. Si bien, desde el terremoto de San Fernando del 9 de febrero de 1971 en E.U, quedó en evidencia que el método pseudoestático

simple no era un método seguro para analizar presas con un gran potencial de daño, a pesar de eso, aún es de uso frecuente en la actualidad. (Wieland, 2009)

Este método consiste en realizar análisis estáticos equivalentes en los que el efecto de la acción sísmica se representa por fuerzas virtuales de inercia proporcionales a las aceleraciones actuantes (Terzaghi, 1950; Kramer, 1996). Se busca el bloque de deslizamiento más crítico (habitualmente limitado por superficies planas o circulares) y se determina el coeficiente de seguridad al deslizamiento como el cociente entre la fuerza resistente y la suma de sollicitaciones estáticas y pseudo-estáticas. (Shan et al., 2019).

La respuesta de la presa a un sismo está relacionada con varios factores, como la geometría de la presa, las propiedades mecánicas de los materiales de construcción, distribuciones de tensiones presísmicas y presiones intersticiales dentro del cuerpo de la presa y las características intrínsecas del movimiento sísmico. La mayoría de estos factores son parcial o totalmente desatendidos por los enfoques tradicionalmente adoptados para evaluar la seguridad sísmica de presas de tierra. Por ejemplo, algunos parámetros de intensidad sísmica como el contenido de frecuencia y duración que afectan significativamente la respuesta del suelo, se desprecian en el enfoque pseudoestático (Ambraseys, 1960). Al emplear un análisis pseudoestático, se asume que la aceleración del movimiento del terreno se aplica en un periodo de tiempo suficientemente largo como para que los esfuerzos inducidos se puedan considerar constantes. La fuerza se aplica sobre el centro de gravedad de la superficie de falla potencialmente deslizante, el cual se asumió como un criterio razonable y conservador (Terzaghi, 1950), pero la superficie se determinó bajo acciones estáticas, y puede diferir notablemente en condiciones dinámicas. El aspecto más importante en un análisis de estabilidad de taludes pseudoestático es la selección apropiada del coeficiente sísmico ya que los resultados son fuertemente dependientes de su magnitud. Éste controla la fuerza actuando sobre el talud. Si el material del talud fuese rígido, la fuerza inercial inducida podría ser igual al producto de la aceleración real horizontal y la masa del material inestable. Esta fuerza inercial podría alcanzar su valor máximo cuando la aceleración sea máxima. Considerando que los taludes reales no son rígidos y que la

aceleración máxima se presenta en un tiempo infinitesimal, los coeficientes pseudoestáticos usados en la práctica corresponden a aceleraciones diferentes a la aceleración máxima en la base del talud.

La representación a través de una aceleración pseudoestática constante unidireccional de los efectos dinámicos de los movimientos sísmicos es evidentemente limitada y alejada de la física real del problema.

Algunas de estas limitaciones son las siguientes:

1. No es confiable en aquellos suelos en los que se generan presiones de poros altas durante el evento sísmico.
2. No tiene en cuenta que algunos suelos presentan degradación de la resistencia, hasta en un 15%, debido a carga sísmica. (García Aguilar, 2016)

4.2 Método de Newmark (*Método de bloques deslizantes*)

Nathan Newmark (1965) propuso su método para la determinar el deslizamiento permanente de un terraplén producido por la acción de un sismo. Para ello simuló el terraplén que se mueve como un bloque rígido-plástico deslizando sobre un plano inclinado, como se ilustra en la Fig. 6.

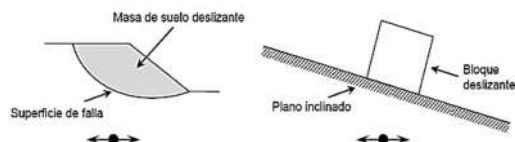


Figura 6. Analogía de Newmark, método del bloque deslizante, García Aguilar (2016).

Se define como aceleración de falla, aquella aceleración límite, que una vez superada producirá el deslizamiento del bloque; en otras palabras, la mínima aceleración del suelo requerida para superar la máxima resistencia del bloque deslizante.

En el método de Newmark, se calcula la aceleración de falla en función de un factor de seguridad estático y la geometría del talud. Cuando las aceleraciones debidas la onda sísmica exceden el valor, el bloque se mueve; el resto del tiempo el bloque permanece en reposo. De esta forma, se calcula la deformación acumulada durante el sismo.

Mediante la integración de las aceleraciones que sobrepasan la aceleración crítica se determinan en primer lugar las velocidades, y con la doble integración, los desplazamientos.

Las consideraciones generales del método son:

1. En el talud existen planos de debilidad bien definidos y el movimiento ocurrirá a lo largo de superficies específicas o planos, de manera similar a los supuestos en el análisis estático usual de estabilidad de taludes.
2. Existirán deformaciones permanentes sólo si el esfuerzo dinámico supera la resistencia al corte del talud.
3. Los deslizamientos ocurren “pendiente abajo”. La resistencia “pendiente arriba” se considera infinita y el bloque no se moverá en ese sentido, aunque se exceda la aceleración crítica.
4. La aceleración crítica se calcula mediante el método de equilibrio límite.

Resistencia al deslizamiento de un bloque de suelo o roca es función de su resistencia al corte bajo condiciones aplicables en un sismo. La magnitud de dicha resistencia depende del grado de desplazamiento que se produzca; sin embargo, para movilizar la resistencia al corte media en un talud no es necesario un gran desplazamiento. (García Aguilar, 2016).

Los métodos de bloques deslizantes se dividen en dos grupos principales, en función de los parámetros característicos del sismo a los que se hace referencia. Un grupo usa la máxima aceleración y velocidad horizontal del suelo, y el otro usa la máxima aceleración horizontal del suelo y el período predominante del espectro de aceleración. (Cai y Bathurst, 1996).

El desplazamiento sísmico calculado a partir de los procedimientos de tipo Newmark, ya sea que el procedimiento sea simplificado o avanzado, se considera apropiado como un índice del desempeño sísmico. Las estimaciones de desplazamiento sísmico siempre serán de naturaleza aproximada debido a las complejidades de la respuesta dinámica del suelo y la variabilidad del movimiento sísmico. Sin embargo, cuando se los considera como un índice de desempeño sísmico potencial, el desplazamiento sísmico calculado puede y ha sido usado efectivamente en la práctica para evaluar diseños de estructuras de tierra. (Ebrahimián, 2012).

4.3 Análisis Dinámico

Para llevar a cabo el análisis dinámico se utilizan actualmente diversos programas computacionales que incorporan técnicas numéricas.

El análisis de presas por elementos finitos inicia con la ingeniera soviética Faadeva, quien en 1958 propuso dividir la presa y el cimiento en elementos rectangulares. Dos años antes, el grupo de Turner en el MIT, habían desarrollado otro método aplicado a estructuras aeronáuticas, posteriormente adaptado a las presas por el grupo de Zienkiwicz y Cheung, en el año 1964. Todos estos métodos se fundamentan en la solución del problema de equilibrio de un elemento diferencial de volumen o sólido deformable, sobre el cual se examinan las fuerzas que actúan (Florez, 2011). En este método, se considera el medio continuo como un conjunto de elementos discretos cuyas fronteras están definidas por puntos nodales, y supone que la respuesta del continuo puede ser descrita como una combinación de la respuesta de dichos puntos nodales. Los movimientos de estos nodos se pueden calcular mediante la ecuación de movimiento (1):

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = -[M]\{\ddot{u}_g\} \quad (1)$$

donde $[M]$ es la matriz global de masa, $[C]$ es la matriz global de amortiguamiento, $[K]$ es la matriz global de rigidez, $\{u\}$ es el vector global de desplazamiento de los puntos nodales y $\{\ddot{u}_g\}$ es la historia de aceleración en la base. Para sistemas lineales esta ecuación puede resolverse por superposición modal, entre otros. Para realizar este tipo de análisis con mayor facilidad, debido al gran volumen de información que puede llegar a manejarse, se han desarrollado diversos programas de cálculo de uso comercial.

En general, los análisis dinámicos en el caso de las presas se realizan en dos etapas. El primer paso consiste en un análisis estático para determinar el campo de tensiones asociado a la configuración de geometría inicial, donde generalmente se simula la construcción por etapas, el proceso de consolidación y las redes de flujo para diferentes niveles de embalse. El segundo paso es el análisis dinámico propiamente dicho, esto es, la integración temporal paso a paso.

La solución en el tiempo del sistema de ecuaciones se puede plantear de dos maneras:

- Esquema de integración implícita: En cada paso de integración se debe resolver un sistema acoplado de ecuaciones que involucra los valores actuales y futuros de las variables. Esto es difícil de programar y costoso debido a las numerosas ecuaciones acopladas, generalmente hay que

invertir matrices o iterar para converger a la solución. A cambio, esta integración temporal puede ser incondicionalmente estable, lo que permite avanzar con incrementos más grandes de tiempo.

- Esquema de integración explícita: Expresa los valores futuros de las variables como una función explícita de los actuales. Esto es más fácil de programar y resulta muy rápido avanzar un incremento de tiempo, pero requiere que ese incremento sea suficientemente pequeño para que la integración sea estable. Se dice que la integración es condicionalmente estable; cuando el incremento cumple la condición de Courant–Friedrichs–Lewy (CFL), que esencialmente limita el incremento de tiempo al período propio más pequeño del sistema. (Martí, 2021). Esta es una condición necesaria para la convergencia al resolver ciertas ecuaciones diferenciales parciales numéricamente; de lo contrario, la simulación produce resultados incorrectos. (Courant, et al., 1956).

El análisis dinámico explícito es computacionalmente eficiente para analizar la respuesta de modelos grandes en periodos cortos de tiempo. El procedimiento dinámico explícito permite procesar un gran número de pequeños incrementos de tiempo, usando la regla de la diferencia central. (Hibbit y Hibbit, 1996).

En este marco, el empleo de modelos numéricos y de técnicas de integración tiempo-historia permiten una detallada caracterización del comportamiento de estructuras geotécnicas frente a la sollicitación sísmica, a la altura de los requisitos de seguridad exigidos actualmente por estándares internacionales. Sin embargo, el considerable tiempo de cálculo o costo computacional asociado a esta estrategia limitó el avance en esta dirección. Se debe tener presente que la simulación abarca no sólo el cuerpo de la presa propiamente dicho, sino que debe analizarse considerando la interacción con el suelo circundante (fundación) y en un entorno acoplado, que considere el desarrollo y la disipación del exceso de presiones intersticiales, utilizando formulaciones en términos de tensiones efectivas. A la complejidad del problema, se suma la necesidad de análisis no lineales para abarcar la pérdida de resistencia del suelo durante el sismo.

Por otra parte, los análisis dinámicos de tiempo-historia confiables, a menudo requieren de una importante cantidad de registros, que permitan

considerar la variabilidad observada en la respuesta. Para una determinada presa, no basta con analizar un único sismo, porque la propia selección del Sismo de Verificación trae aparejada una fuente importante de incertidumbre.

En las últimas décadas, se han desarrollado técnicas que permiten modificar los intervalos de tiempo de los registros de la excitación sísmica, los cuales se han aplicado con éxito al análisis de edificios de hormigón, puentes y silos (Soroushian et al., 2013). El método desarrollado por el Soroushian (2008), permite realizar la integración en el tiempo empleando pasos más grandes que los pasos de tiempo del registro de la excitación sísmica. Esta técnica, que permite reducir el tiempo de cálculo en el análisis sísmico de presas de materiales sueltos, fue probada para evaluar un sistema estructural de puente y un silo convencional de acero. Los resultados numéricos mostraron que se logra una reducción considerable del costo computacional sin pérdida significativa de precisión.

5. CONCLUSIONES

Mundialmente, la evaluación de la seguridad de presas está migrando de un enfoque que tradicionalmente fue determinístico, a una concepción probabilista del riesgo, dirigido tanto a la amenaza como al estado de las estructuras y a las posibles consecuencias de una falla asociadas a un determinado escenario. Sin embargo, en Argentina, si bien se avanzó en materia de seguridad al crear organismos reguladores y redactar legislación específica, hay importantes carencias en el desarrollo de métodos de evaluación sísmica, inspección y mantenimiento de presas, y no existen hasta el presente procedimientos confiables, estandarizados y eficientes que permitan definir el estado actual de vulnerabilidad de presas, esenciales para el desarrollo económico de las regiones y cuyo impacto en caso de rotura tendría consecuencias catastróficas.

Los métodos más antiguos para evaluar la respuesta sísmica de presas de materiales sueltos, no permitían reproducir ni explicar los efectos observados en el estudio de numerosos casos, como ser la aparición de fisuras y los importantes asentamientos registrados. La aparición del método de elementos finitos y su evolución, junto

con el desarrollo de modelos constitutivos complejos, pueden resolver esas falencias.

El empleo de modelos numéricos y de análisis dinámicos con técnicas de integración tiempo-historia permite una detallada caracterización del comportamiento de estructuras geotécnicas frente a sollicitaciones sísmicas. Sin embargo, el considerable tiempo de cálculo o costo computacional asociado a un enfoque probabilístico del riesgo, es todavía un aspecto a resolver.

En análisis de la seguridad de presas deberá dirigirse a las posibles consecuencias de una falla, así como a las características y estado de las estructuras. (Giuliani, 2006). Es un tema de constante preocupación y desarrollo, en función de exigencias cada vez mayores de la sociedad. Con los años mejoraron fuertemente los criterios de seguridad aplicados al proyecto y la construcción, así como a los sistemas operativos, la auscultación y el control de las obras, a la vez que se incorporaron previsiones para situaciones de emergencias. Por otra parte, se avanzó con legislación específica y se crearon organismos reguladores y de fiscalización. La aprobación y puesta en vigencia de esta Ley es de fundamental importancia para conocer la situación de cada aprovechamiento y proceder, si fuera necesario, con la actualización de las condiciones de seguridad. Se debe garantizar, además, la revisión periódica y permanente del estado de todas las presas.

Actualmente, se dispone de herramientas que permiten hacer modelos numéricos representativos de las infraestructuras. Por otra parte, la acción sísmica puede representarse mediante historias temporales de aceleración, correspondientes a sismos reales registrados, o mediante acelerogramas sintéticos, simulados o híbridos (Pujades, et al., 2021). Sofisticados programas de análisis dinámico no lineal permiten seguir y analizar, paso a paso, la respuesta dinámica de las estructuras. Debemos resaltar que a pesar del progreso de la capacidad de los ordenadores modernos es sumamente costoso abordar un análisis probabilístico de riesgo sísmico.

6. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue desarrollado por el primer autor en el marco de una Beca Estudiantil CIUNT financiada por la Secretaría de Arte, Ciencia e

Innovación Productiva de la Universidad Nacional de Tucumán.

7. REFERENCIAS

- Ambraseys, N.N. (1960). The Seismic Stability of Earth Dams, Proceedings of the Second World Conference on Earthquake Engineering, pp. 1345–1363, Tokyo, Japan
- Cai, Z., Bathurst, R.J. (1996). Deterministic sliding block methods for estimating seismic displacements of earth structures. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 15(4), 255-268.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0267726195000488>
- Capitanelli, R. G. (1970). Causas de la destrucción del Dique Frías y bases para nuevos sistemas de defensas. *Boletín de Estudios Geográficos*, 17(67). pp 69.
<http://bdigital.uncu.edu.ar/11083>
- Dalmati, R. (2018) El Proyecto de Ley de Seguridad de Presas. ORSEP. https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/02_-_rodolfo_dalmati_-_proyecto_ley_de_seguridad_de_presas.pdf
- Ebrahimian, B. (2012). *Non-Linear Numerical Analysis of Earthquake- Induced Deformation of Earth-Fill Dams*. University of Tehran – Iran. ResearchGate. Recuperado el 12 de abril de 2023 de <https://www.researchgate.net/publication/221924482>
- Florez G. (2011). Análisis contra el tiempo para presas mediante implementación numérica usando elementos finitos. *Revista Ecomatemática, UFPS*, 2 (1), 4-10. <https://1library.co/document/z31r6w9y-analisis-tiempo-presas-mediante-implementacion-numerica-elementos-finitos.html>
- García Aguilar, G. (2016). Análisis sísmico de presas de tierra y enrocamiento. [Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México UNAM]. Repositorio Facultad de Ingeniería.
- Giuliani, F. (25 de septiembre de 2006). *Enfoque sistémico de la seguridad de presas*. Universidad Nacional de Colombia. Recuperado el día 27 de abril de 2023 de <http://www.disi.unal.edu.co/~lctorress/PSist/PenSis37.pdf>
- Giuliani, F., Baylac, M. (2007). *Gestión de Riesgo en Presas y Emergencias Hídricas*. Biblioteca Digital de Agrimensura. Recuperado el día 19 de abril de 2023 de <http://www.bibliotecacpa.org.ar/greenstone/collect/otragr/index/assoc/hash01c4.dir/doc.pdf>
- Hibbit, K., Hibbit, S. (1996). *Abaqus Estándar User's Manual Ver.5.6*. HKS. index.php/EA/article/view/86
- Instituto Nacional de Prevención Sísmica – INPRES (2012). *Sismicidad en Argentina*. Contenidos INPRES. Recuperado el 04 de abril de 2023 de <http://contenidos.inpres.gob.ar/sismologia/sismicidad>
- Instituto Nacional de Prevención Sísmica – INPRES.(2018). *Reglamento Argentino para construcciones Sismorresistentes. Parte I. Construcciones en General*. INTI.
- Instituto Nacional de Prevención Sísmica – INPRES. (2023). *Últimos sismos determinados por el INPRES*. Contenidos INPRES. Recuperado el 07 de abril de 2023 de <http://contenidos.inpres.gob.ar/sismologia/xultimos>.
- International Commission on Large Dams. (02 de abril de 2020). *Síntesis General del Registro Mundial de Presas. Tipología de presas*. ICOLD-CIGB. Recuperado el 02 de abril de 2023 de https://www.icold-cigb.org/GB/world_register/general_synthesis.asp
- Juncal, S. (2019). La regulación y el control de la seguridad de presas en la Argentina. *Estado Abierto. Revista Sobre El Estado, La Administración Y Las Políticas Públicas*, 3(2), pp. 117-151. <https://publicaciones.inap.gob.ar/>
- Martí, J. (11 de agosto de 2021). *Análisis de elementos finitos: esquemas implícito y explícito*. Principia. Recuperado el 12 de abril de 2023 de <https://principia.es/analisis-de-elementos-finitos-esquemas-implicito-y-explicito/>
- Organismo Regulador de Presas (20 de octubre de 2020). *Inventario de Presas Argentinas*. ORSEP. Recuperado el 02 de abril de 2023 de <https://drive.google.com/file/d/1Pi0AIAiBjFMTXD9SmtZfOXhPwQX30RD2/view>.
- Organismo Regulador de Seguridad de Presas – ORSEP (20 de marzo de 2018). *Lineamientos de Seguridad de Presas*. Argentina. Recuperado el 07 de abril de 2023 de: https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/orseplineamientos_de_seguridad_de_presas.pdf
- Pujades LG, Lantada N, González-Drigo R, Blázquez A, Meza K. (2021). Guía para la

- evaluación de la vulnerabilidad sísmica. *Por una cultura común del riesgo sísmico*. 4 (1). 2-3. https://pocrisc.eu/sites/default/files/documents/e4_2_1_guia_eval_vuln_2022_03_24.pdf
- R. Courant, K.Friedrichs, H. Lewy. (1956). *On the partial difference equations of mathematical physics*. AEC Computing and Applied Mathematics Centre.
- Shan D., López-Almansa F., Ledesma, A. (2019). *Calibración con cálculos dinámicos no lineales del método de Newmark para análisis de estabilidad sísmica de laderas*. UPCommons. Recuperado el 12 de abril de 2023 de [https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/189553/Shan%20\(3\).pdf](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/189553/Shan%20(3).pdf)
- Soroushian, A., Vasseghi, A., Hosseini, M. (2013). On Practical Performance of a Technique for More Efficient Dynamic Analysis in View of Real Seismic Analysis of Bridge Structures. *In Computational Methods in Earthquake Engineering*. 2, 613-634. https://www.researchgate.net/publication/286567811_Computational_Methods_in_Earthquake_Engineering_-_Vol_2
- Soroushian, A. (2008). *A technique for time integration analysis with steps larger than the excitation steps*. *Communications in Numerical Methods in Engineering*, 24, 2087–2111. DOI: 10.1002/cnm.1097
- Wieland M. (2009). *The many features of the seismic hazard in large dam projects and strong motion monitoring of large dams*, *Proc. 2nd Int. Conf. on Long-term Behaviour of Dams*, Graz, Austria. Link Springer. Recuperado el 12 de abril de 2023 de <https://link.springer.com/article/10.1007/s11709-010-0005-6>