

Coeficientes sísmicos estáticos de diseño para estudios de estabilidad de tranques de relaves para terremotos subductivos intraplaca chilenos

Static seismic design coefficients for tailings dam stability studies for Chilean subductive intraplate earthquakes

Fecha de entrega: 31 de enero 2022

Fecha de aceptación: 11 de abril 2022

Rodolfo Saragoni^{1,2} y Bastián Garrido

¹Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago, Chile, rsaragon@ing.uchile.cl

²S y S Ingenieros Consultores LTDA., rsaragoni@syingen.cl, bgarrido@syingen.cl

El progresivo avance de modelos numéricos sofisticados para representar el comportamiento de tranques ha desplazado los análisis estáticos simplificados y ha entregado más credibilidad a los análisis dinámicos. Sin embargo, la normativa actual en Chile DS248 de SERNAGEOMIN que define los análisis necesarios para garantizar la estabilidad de estas estructuras aún requiere de ambos análisis. Cuando la fuente del terremoto de diseño es interplaca, las expresiones para determinar los coeficientes sísmicos estáticos han entregado resultados consistentes al determinar los factores de seguridad y comparar con análisis dinámicos, a diferencia de lo visto para el caso intraplaca donde los factores de seguridad han resultado más conservadores. En este trabajo se propone una nueva expresión diferente para terremotos intraplaca chilenos derivada sobre un concepto de iso potencial destructivo, que permite mejor coherencia entre ambos análisis.

The progressive advance of sophisticated numerical models to represent the behaviour of dams has displaced simplified static analyses and has given more credibility to dynamic analyses. However, the current Chilean regulation DS248 of SERNAGEOMIN that defines the necessary analyses to guarantee the stability of these structures still requires both analyses. When the source of the design earthquake is interplate, the expressions to determine the static seismic coefficients have given consistent results when determining the safety factors and comparing with dynamic analysis, unlike what has been seen for the intraplate case where the safety factors have been more conservative. In this work, a new different expression is proposed for Chilean intraplate earthquakes derived on a concept of iso destructive potential, which allows better coherence between both analyses.

Palabras clave: coeficiente sísmico, subducción, intraplaca, depósitos de relave, potencial destructivo

Keywords: seismic coefficient, subduction, intraplate, tailings dams, destructive potential

Introducción

El progresivo avance de modelos numéricos sofisticados para representar el comportamiento de tranques ha desplazado los análisis estáticos simplificados y ha entregado más credibilidad a los análisis dinámicos. Sin embargo, la normativa actual en Chile DS248 (2007) de SERNAGEOMIN que define los análisis necesarios para garantizar la estabilidad de estas estructuras aún requiere de ambos análisis.

Una expresión ampliamente usada (Barrera y Campaña, 2004) para determinar el coeficiente sísmico estático

horizontal para terremotos subductivos chilenos en los análisis de estabilidad es la propuesta por Saragoni (1993):

$$K_h = \begin{cases} 0.30 \frac{a_{\max}}{g} & a_{\max} \leq 660 \text{ gal} \\ 0.22 \sqrt[3]{\frac{a_{\max}}{g}} & a_{\max} > 660 \text{ gal} \end{cases} \quad (1)$$

Esta expresión fue adoptada del trabajo de Noda y Uwabe (1976) y se ha verificado su seguridad en el comportamiento de tranques de relaves durante los terremotos de El Maule 2010, $M_w = 8.8$ (Campaña *et al.*, 2016) y de Illapel 2015, $M_w = 8.3$.

$$P_D = \frac{\pi}{2g} \cdot \frac{\int_0^{P_D} a^2(t) dt}{v_0^2}$$

Esta fórmula ha sido consistente al comparar los análisis estáticos y dinámicos de presas de relaves para sismos interplaca (Gutiérrez, 2017). Sin embargo, para el caso intraplaca el análisis estático ha resultado ser mucho más conservador.

En este trabajo se hace un estudio de la base más completa a la fecha de los acelerogramas registrados de terremotos subductivos intraplaca de profundidad intermedia en Chile. Una base de estas características es, en general, muy difícil de obtener para un país en particular, por lo que este estudio representa un importante avance a nivel nacional, con las limitaciones propias de este tipo de estudios.

Esta base de datos se emplea para derivar una nueva fórmula de coeficientes sísmicos estáticos K_H para terremotos intraplaca para el diseño de obras geotécnicas por el método de equilibrio límite y sus correspondientes coeficientes de seguridad. Los nuevos coeficientes estáticos están derivados sobre un concepto iso potencial destructivo entre terremotos interplaca e intraplaca, vale decir, igualdad de capacidad de daño (Saragoni, 2014).

Procesamiento de datos Intraplaca

Se ha considerado la base de datos presentada en el Anexo A de la tesis de Idini (2016) por ser la más completa sobre acelerogramas subductivos intraplaca de profundidad intermedia para Chile. Se analizaron 445 estaciones que corresponden a 1335 acelerogramas, de estas estaciones 345 corresponden a suelo duro y 100 a roca dura.

Para cada registro se indicó la magnitud del evento intraplaca de profundidad intermedia, la distancias epicentral e hipocentral de la estación acelerográfica, la dirección de la componente y los valores correspondientes de cada acelerograma de su aceleración máxima (PGA), intensidad de Arias (I_A), su duración de movimiento fuerte (Δt_s), intensidad de cruces por cero por segundo (v_0) y su potencial destructivo (P_D).

Para la duración de movimiento fuerte se determinó de acuerdo con el método $\alpha \beta \gamma$ de Caracterización de Movimientos Sísmicos y se comparó con los valores esperados de diferentes intervalos de la intensidad de Arias (Céspedes, 2017).

En general los valores de los potenciales destructivos P_D son muy inferiores a 4 cm-s que corresponde al inicio de daño de los acelerogramas (Saragoni *et al.*, 1989), con la excepción del registro obtenido en la estación Pica para el terremoto de Tarapacá 2005, $M_w = 7.8$, con $P_D = 13$ cm-s que corresponde a un terremoto fuerte con daño (Tabla 1).

Los valores promedio de v_0 son generalmente altos, del orden de $v_0 = 17.78$ cruces/s para roca dura y $v_0 = 16.41$ cruces/s para suelo duro, lo que es una diferencia menor. Sus duraciones de movimiento fuerte son 13.51 s para roca dura y 13.92 s para suelo duro. Sin embargo, la intensidad de cruces por cero de los registros de Pica para el terremoto de Tarapacá de máximo P_D son 12.21 cruces/s y 13.45 cruces/s, respectivamente.

Considerando que el registro de Pica 2005 corresponde a un terremoto intraplaca de magnitud $M_w = 7.8$, se considerarán sus valores de v_0 y duración de movimiento fuerte para obtener los valores de los coeficientes sísmicos estáticos para terremotos intraplaca chilenos.

Iso Potencial Destructivo Método Alfa, Beta, Gama de Caracterización de Movimientos Sísmicos

Considerando los registros de aceleraciones de un terremoto como muestras de un proceso estocástico no-estacionario, puede demostrarse que la función cuadrática de aceleraciones del proceso tiende a una función Chi-cuadrado (Saragoni y Hart, 1974; Saragoni, 1976a,b):

$$E\{a^2(t)\} = \beta e^{-\alpha t} \gamma \quad (2)$$

Tabla 1: Registros seleccionados Intraplaca de profundidad intermedia $P_D > 4$ cm-s.

Evento	Mag	Estación	Epicentro km	Hipocentro km	Componente	PGA cm/s/s	I_A cm/s	Δt_s s	v_0 cruces/s	P_D cm-s
050613244	7.8	PICA	56.42	119.64	Este-Oeste	725.75	2029.53	15.97	12.21	13.60
050613244	7.8	PICA	56.42	119.64	Norte-Sur	568.08	1422.81	14.88	13.44	7.87

$$P_D = \frac{\pi}{2g} \cdot \frac{\int_0^{t_0} a^2(t) dt}{v_0^2}$$

donde $E\{\cdot\}$ es el valor esperado, $a(t)$ es la aceleración del suelo, t es el tiempo, β es el parámetro de intensidad, α y γ son parámetros de forma.

La función Chi-cuadrado de la expresión (2), se caracteriza por tener dos puntos de inflexión que ocurren en los tiempos:

$$t_1^* = \frac{\gamma - \sqrt{\gamma}}{\alpha} ; \gamma \geq 1 \quad (3)$$

$$t_2^* = \frac{\gamma + \sqrt{\gamma}}{\alpha} \quad (4)$$

El intervalo que media entre estos dos puntos de inflexión corresponde aproximadamente a la duración de movimiento fuerte Δt_s del terremoto,

$$\Delta t_s = \frac{2\sqrt{\gamma}}{\alpha} ; \gamma \geq 1 \quad (5)$$

La determinación de los parámetros se puede despejar al considerar los momentos de orden 0, 1 y 2 de la ecuación (2), es decir:

$$m_0 = \int_0^\infty E\{a^2(t)\} dt = \beta \frac{\Gamma(\gamma+1)}{\alpha^{\gamma+1}} \quad (6)$$

$$m_1 = \int_0^\infty t E\{a^2(t)\} dt = \beta \frac{\Gamma(\gamma+2)}{\alpha^{\gamma+2}} \quad (7)$$

$$m_2 = \int_0^\infty t^2 E\{a^2(t)\} dt = \beta \frac{\Gamma(\gamma+3)}{\alpha^{\gamma+3}} \quad (8)$$

Al dividir las expresiones (7) y (8) por (6) se obtiene:

$$\frac{\gamma+1}{\alpha} = \frac{m_1}{m_0} \quad (9)$$

$$\frac{\gamma+2}{\alpha} \frac{\gamma+1}{\alpha} = \frac{m_2}{m_0} \quad (10)$$

Lo que permite determinar α y γ , y a su vez Δt_s .

Potencial destructivo

Es una medida instrumental de intensidad sísmica basada en la ductilidad esperada de un oscilador elastoplástico de un grado de libertad, definido por Araya y Saragoni (1984). Este método está basado en la acumulación de deformaciones no lineales sufrida por estructuras. El

potencial destructivo se define considerando un proceso no estacionario de aceleraciones y la intensidad de cruces por cero de este proceso según la expresión (11):

$$P_D = \frac{\pi}{2g} \cdot \frac{\int_0^{t_0} a^2(t) dt}{v_0^2} \quad (11)$$

donde t_0 es la duración total del acelerograma, v_0 es la intensidad de cruces por cero por segundo y g es la aceleración de gravedad.

En el trabajo de Saragoni (1981) se detalla la metodología que permite homologar aceleraciones efectivas entre terremotos de diferentes fuentes (en ese caso entre sismos superficiales y subductivos), bajo el concepto de iso potencial destructivo, en el trabajo se usa una versión genérica del potencial destructivo formalizada posteriormente.

En el presente trabajo se utiliza la misma metodología para efectuar la conversión entre sismos interplaca e intraplaca. La expresión (12) muestra los parámetros requeridos para la conversión.

$$a_{\max \text{ efect interplaca}} = a_{\max \text{ efect intraplaca}} \left(\frac{\Delta t_{S \text{ intraplaca}}}{\Delta t_{S \text{ interplaca}}} \right)^{0.5} \left(\frac{v_{0 \text{ interplaca}}}{v_{0 \text{ intraplaca}}} \right) \quad (12)$$

Donde $a_{\max \text{ efect}}$ corresponde al valor esperado de la aceleración máxima efectiva, Δt_s es la duración del movimiento fuerte y v_0 es la intensidad de cruces por cero por segundo. La expresión (12) se obtiene al igualar el potencial destructivo de sismos interplaca e intraplaca.

Análisis de resultados

Se determinó que el factor de conversión entre sismos intraplaca a interplaca es de 0.67, para tener el mismo potencial destructivo, con lo que se obtiene la expresión (13) para sismos intraplaca:

$$K_h = \left\{ \begin{array}{ll} 0.21 \frac{a_{\max}}{g} & a_{\max} \leq 980.6 \text{ gal} = 1g \\ 0.21 \sqrt[3]{\frac{a_{\max}}{g}} & a_{\max} > 1g \end{array} \right\} \quad (13)$$

Este resultado se obtiene al ajustar la expresión (1) de acuerdo con (12).

$$P_D = \frac{\pi}{2g} \cdot \frac{\int_0^{\dots} a^-(t) dt}{v_0^2}$$

Conclusiones

Se ha propuesto una nueva fórmula para estimar el coeficiente sísmico horizontal para terremotos chilenos subductivos intraplaca de profundidad intermedia, lo que permite separarla de la fórmula más tradicional derivada para terremotos interplaca. Con ello se logra obtener resultados más consistentes entre análisis de estabilidad estático y análisis tiempo historia, así como diseños sísmicos más económicos.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la División Andina de CODELCO por autorizar publicar estos resultados que forman parte de un estudio realizado para la Vicepresidencia de Proyectos.

Referencias

- Araya, R. and Saragoni, G.R. (1984). Earthquake accelerogram destructiveness potential factor. *Eight World Conference on Earthquake Engineering*, San Francisco, USA, vol. 2, 835-842
- Barrera, S. y Campaña, J. (2004). Análisis de estabilidad de presas de relaves. *Práctica Chilena. V Congreso Chileno de Ingeniería Geotécnica*, Universidad de Chile y SOCHIGE, Santiago, Chile
- Campaña, J., Bard, E., Cano, C. y Valenzuela, L. (2016). Registro sísmico en depósito de relaves. *IX Congreso Chileno de Ingeniería Geotécnica*, Universidad Austral y SOCHIGE, Valdivia, Chile, artículo A167
- Céspedes, M.S. (2017). *Curvas de atenuación de parámetros sísmicos de registros de movimiento fuerte en Chile*. Memoria de Ingeniera Civil, Universidad de Chile, Santiago, Chile
- DS248 (2007). Reglamento para la aprobación de proyectos de diseño, construcción, operación y cierre de los depósitos de relaves. Decreto Supremo, Ministerio de Minería, Servicio Nacional de Geología y Minería SERNAGEOMIN, Santiago, Chile
- Gutiérrez, F. (2017). *Evaluación de herramientas para el análisis de estabilidad física de una presa de relaves espesados*. Memoria de Ingeniero Civil de Minas, Universidad de Chile, Santiago, Chile
- Idini, B. (2016). *Curvas de atenuación para terremotos intraplaca e interplaca en la zona de subducción chilena*. Tesis de Magister Ingeniería Sísmica, Universidad de Chile, Santiago, Chile
- Noda, S. and Uwabe, T. (1976). Relation between seismic coefficient and ground acceleration for gravity quay wall. *6th World Conference on Earthquake Engineering*, New Delhi, India, vol. 2, 1963-1968
- Saragoni, G.R. (2014). Earthquake performance design of dams using destructiveness potential factor. In *Earthquake Geotechnical Engineering Design. Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering*, M. Maugeri, C. Soccodato (eds.), Springer, Cham, Switzerland, vol. 28, 181-192
- Saragoni, G.R. (1993). Análisis del riesgo sísmico para la reconstrucción del Puerto de Valparaíso. *6^{as} Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica*, Universidad de Chile y ACHISINA, Santiago, Chile, vol. 2, 165-178
- Saragoni, G.R. (1981). Influencia de la aceleración máxima, duración y contenido de frecuencia en los daños producidos por terremotos. *Boletín de Información del Laboratorio Carreteras y Geotecnia* **144**, 15-32
- Saragoni, G.R. (1976a). The $\alpha \beta \gamma$ method for the characterization of earthquake accelerograms. *6th World Conference on Earthquake Engineering*. New Delhi, India, vol. 1, 357-364
- Saragoni, G.R. (1976b). El método $\alpha \beta \gamma$ para la caracterización de movimientos sísmicos. *2^{as} Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica*, Santiago, Chile
- Saragoni, G.R. and Hart, G.C. (1974). Simulation of artificial earthquakes. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* **2**(3), 249 – 267
- Saragoni, G.R., Holmberg, A. y Sáez, A. (1989). Potencial destructivo y destructividad del terremoto de Chile de 1985. *5^{tas} Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica*, Santiago, Chile, vol. 1, 369-378