

Aplicación de un modelo elástico y lineal al estudio de estabilidad de fisuras en presas de hormigón

Application of a linear elastic model to the study of crack stability in concrete dams

Matías Braun^{1a}, María Paula Zappitelli^{1b}, Edgardo Ignacio Villa^{1c}, Claudio Guillermo Rocco^{1d}

¹Departamento de Construcciones, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata. Buenos Aires, República Argentina.
Correos electrónicos: ^a matias.braun@ing.unlp.edu.ar, ^b paula.zappitelli@ing.unlp.edu.ar, ^c eivilla @ing.unlp.edu.ar, ^d claudiogrocco@gmail.com

Recibido: 30 abril, 2018. Aceptado: 6 junio, 2018. Versión final: 4 septiembre, 2018.

Resumen

En este trabajo se presentan los resultados de un análisis numérico llevado a cabo para la determinación del Factor de Intensidad de Tensiones en Modo Mixto, KI y KII, correspondiente al caso típico de una presa de hormigón fisurada sometida a una acción sísmica. El modelo numérico se ha implementado en el código comercial de elementos finitos Abaqus/Standard. La geometría adoptada se corresponde a la presa de Koyna, con la salvedad de que se ha incorporado una fisura paralela al plano horizontal. Con la finalidad de evaluar la importancia de garantizar un buen sellado de la fisura, mediante la inyección de resinas epoxis, se ha realizado un segundo estudio paramétrico en el que se ha considerado el sellado parcial de la fisura. Los resultados del estudio permiten establecer cuáles son las fisuras que más comprometen la integridad estructural de la presa frente a acciones sísmicas.

Palabras clave: método de elementos finitos; factor de intensidad de tensiones; presas de gravedad de hormigón; análisis sísmico.

Abstract

In this paper, the results of a numerical analysis to obtain the stress intensity factor in mixed mode, KI and KII, in a cracked concrete dam submitted to seismic loads are presented. The numerical model was implemented in the commercial finite element code Abaqus/Standard. Koyna dam geometry was used, including a crack parallel to the horizontal plane. In order to evaluate the importance of guaranteeing an adequate crack sealing using epoxy resin, a second parametric study was done considering partial crack sealing. The study results allow determining the cracks that endangered the dam structural integrity under seismic loads.

Keywords: finite element method; stress intensity factor; concrete gravity dams; seismic analysis.

1. Introducción

Es común que en presas de gravedad de hormigón se produzcan fisuras horizontales generadas durante una acción sísmica [1,2]. A este tipo de grietas se las puede clasificar como fisuras cerradas, y se trata de aquellas que se forman bajo acciones de corta duración y se cierran (en

sentido mecánico, no hidráulico) bajo cargas permanentes (normalmente el peso propio [1]).

Ante la presencia de este tipo de fisuras, es habitual reparar la presa mediante la inyección de resinas [3-6]. Esta técnica consiste en realizar inyecciones de resina a presiones elevadas y secuencialmente en varios puntos.

La inyección puede llevarse a cabo, ya sea desde las galerías de inspección, ya sea desde la superficie (véase figura 1).

Una de las principales limitaciones de esta metodología es la alta viscosidad de la resina, que obliga a emplear elevadas presiones de inyección que pueden amenazar la estabilidad de la estructura, si no se lleva a cabo un correcto diseño [7, 8].

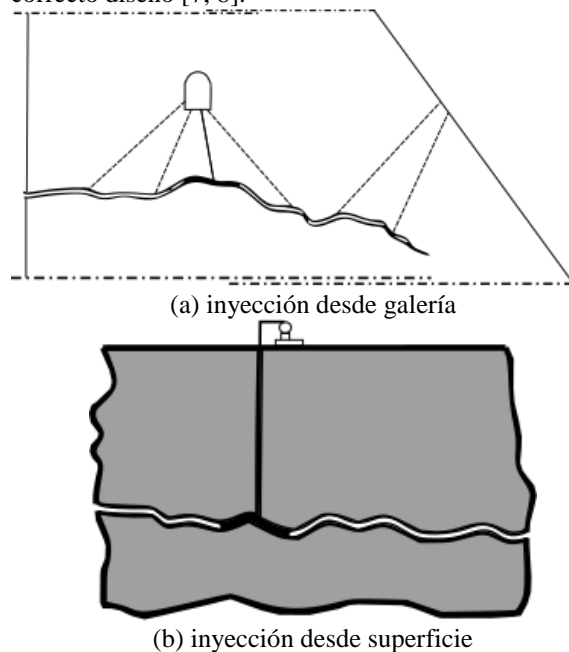


Figura 1. Esquemas de los posibles puntos de inyección.

En el presente trabajo se ha estudiado el caso de una presa fisurada a causa de una acción sísmica. Con la finalidad de evaluar la estabilidad de las fisuras, se ha calculado el Factor de Intensidad de Tensiones (FIT) en modo mixto considerando distintas posiciones y longitudes de grieta. El uso de esta teoría en presas de hormigón se justifica, en la medida que las dimensiones de la estructura son lo suficientemente grandes en comparación con la longitud característica del material [9].

Los resultados del estudio permiten establecer importantes conclusiones con respecto a la sensibilidad de las variables analizadas. Y así se define un criterio que permite establecer cuáles son las fisuras que más comprometen la integridad estructural de la presa frente a acciones sísmicas. Además, se pone en evidencia la importancia de realizar un correcto sellado de las fisuras durante los trabajos de reparación.

2. Generalidades

2.1. Descripción del problema

En este estudio se ha evaluado la integridad estructural del perfil de la presa de Koyna [10-12], con la salvedad de que se ha incorporado una fisura paralela al plano horizontal que se inicia en el paramento de aguas arriba del embalse. Para llevar a cabo el cálculo del FIT, se ha empleado el Método de los Elementos Finitos (MEF), mediante el código comercial Abaqus/Standard [13].

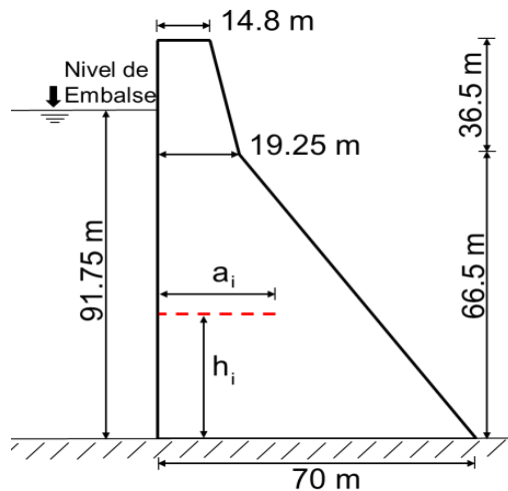


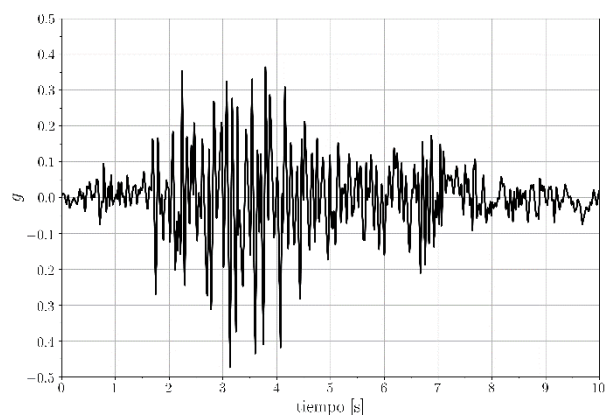
Figura 2. Geometría de la presa de Koyna.

En la figura 2 se representa la geometría de la presa simulada y los parámetros geométricos que definen la morfología de las fisuras contempladas.

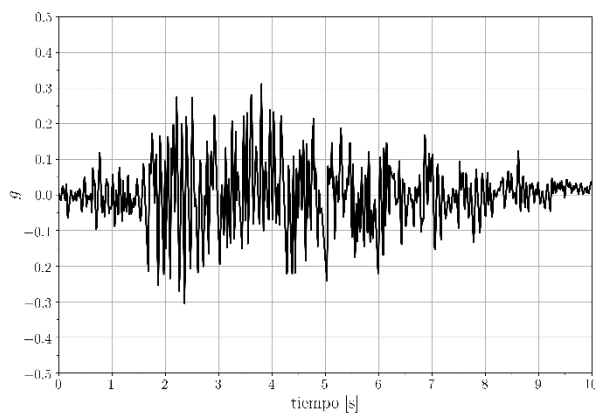
La acción sísmica a la que se somete la presa se corresponde a los acelerogramas registrados en 1968 durante el sismo que afectó a la presa de Koyna [9].

En la figura 3 se muestran los acelerogramas horizontal y vertical. La aceleración se expresa en g, es decir, se encuentra normalizada con respecto a la aceleración de la gravedad ($9,81 \text{ m/s}^2$). Las componentes de la aceleración sísmica se han incorporado en el modelo de manera simultánea.

Con el objetivo de simplificar el análisis del problema se ha considerado la presión hidrostática del embalse, y se ha despreciado el efecto hidrodinámico.



Acelerograma horizontal



Acelerograma vertical

Figura 3. Acelerogramas expresados en función de la aceleración de la gravedad.

En la tabla 1 se indican las propiedades mecánicas del material [9] utilizado en el estudio.

Tabla 1. Propiedades mecánicas del hormigón.

Densidad del hormigón [ρ]	2.643 kg/m ³
Energía de fractura [G_f]	250 N/m
Coefficiente de Poisson [ν]	0,15
Módulo de Young [E]	31.027 MPa

2.2. Modelo numérico

Para la discretización de la presa se han utilizado elementos CPE4R, disponibles en la galería del código utilizado. Se trata de elementos bidimensionales de

cuatro nodos, que permiten realizar el análisis bajo la hipótesis de deformaciones planas.

En la figura 4 se muestra la malla de elementos finitos utilizada, con una composición de 2.310 nodos y 2.176 elementos. Para definir el tamaño de dicha malla se ha llevado a cabo su correspondiente análisis de sensibilidad.

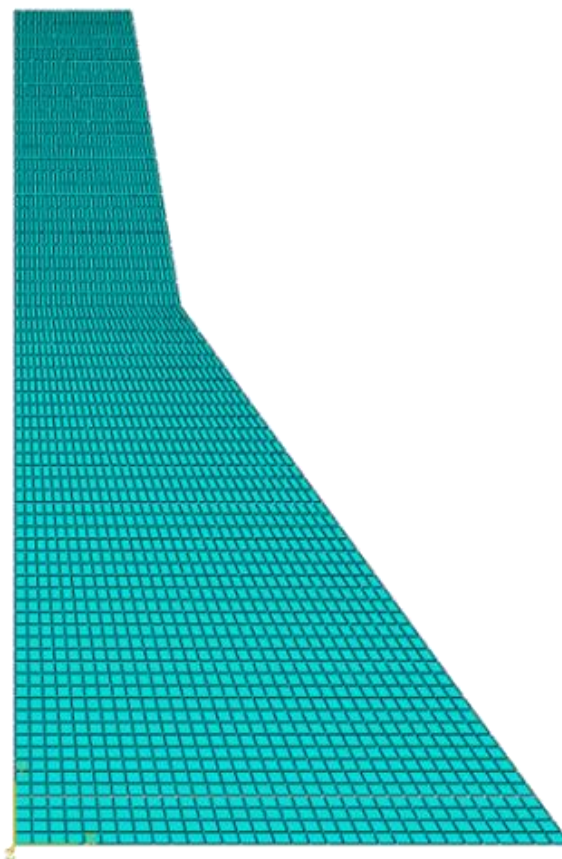


Figura 4. Vista general de la malla utilizada.

Las fisuras han sido modeladas de espesor nulo, y se ha definido la interacción entre las caras, mediante un contacto mecánico normal. Esto ha permitido que ambas superficies puedan separarse y juntarse, pero se impide su interpenetración.

Se ha asumido que el frente de fisura es perpendicular al plano de la presa, y, por tanto, el Modo III del FIT se desprecia.

El FIT en modo mixto se calcula a partir de la integral de interacción propuesta por Nakamura y Parks [14]. Esta integral, implementada en el *software* comercial Abaqus/Standard, es válida para casos de deformaciones planas.

2.3. Casos analizados

Se ha llevado a cabo un análisis paramétrico asignando dos variables distintas a la fisura: la longitud de la fisura y la altura a la que se encuentra ubicada. Para ello, se han considerado 10 cotas distintas, separadas 6 metros una de otra.

Para cada altura, se han propuesto cuatro longitudes de grieta, correspondientes al 12,5, 25, 50 y 75 % del espesor de la presa en la cota correspondiente.

Tabla 2. Características geométricas de las fisuras estudiadas.

h _i (m)	a ₁ (m)	a ₂ (m)	a ₃ (m)	a ₄ (m)
6	8,03	16,06	32,13	48,19
12	7,49	14,98	29,95	44,93
18	6,95	13,89	27,78	41,67
24	6,4	12,8	25,61	38,41
30	5,86	11,72	23,43	35,15
36	5,31	10,63	21,26	31,88
42	4,77	9,54	19,08	28,62
48	4,23	8,45	16,91	25,36
54	3,68	7,37	14,73	22,1
60	3,14	6,28	12,56	18,84

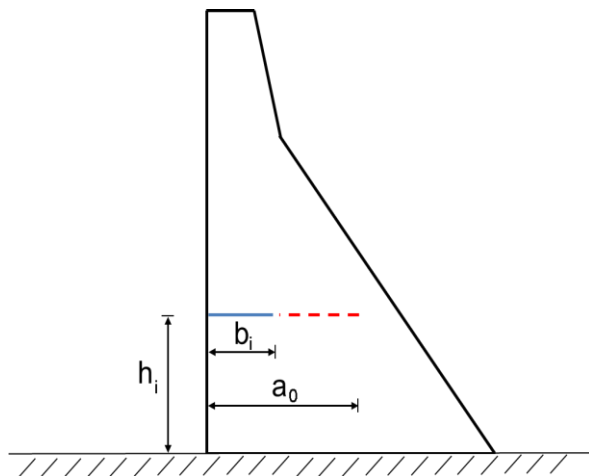


Figura 5. Esquema de las dimensiones de las fisuras con sellado parcial.

En la tabla 2 se muestra un resumen de las características geométricas de las fisuras estudiadas.

También se ha llevado a cabo un segundo análisis paramétrico, en el que se ha considerado la reparación parcial de las fisuras. Para este estudio, se han escogido las configuraciones correspondientes a las fisuras de mayor longitud, del análisis anterior. Para cada una de estas configuraciones se han simulado tres profundidades de sellado parcial, correspondientes al 16,6, 33,3 y 50 % de la longitud inicial de la fisura (a₀).

Tabla 3. Características geométricas de las fisuras con sellado parcial.

h _i (m)	a ₀ (m)	b ₁ (m)	b ₂ (m)	b ₃ (m)
6	48,19	8,03	16,06	32,13
12	44,93	7,49	14,98	29,95
18	41,67	6,95	13,89	27,78
24	38,41	6,4	12,8	25,61
30	35,15	5,86	11,72	23,43
36	31,88	5,31	10,63	21,26
42	28,62	4,77	9,54	19,08
48	25,36	4,23	8,45	16,91
54	22,1	3,68	7,37	14,73
60	18,84	3,14	6,28	12,56

El sellado de la fisura ha sido modelado considerando adherencia perfecta, empleando un contacto tipo *tie* disponible en la librería de Abaqus/Standard [13].

En la figura 5 se representa un esquema de las variables geométricas, mientras que en la Tabla 3 se muestra un resumen de los valores empleados para dicho análisis.

3. Resultados y análisis

En esta sección se presentan los resultados obtenidos con las morfologías de fisura descritas en el apartado anterior. Los resultados del trabajo se presentan en función del FIT equivalente, K_{eq} , calculado a partir de la teoría de William [15], mediante la siguiente expresión:

$$K_{eq} = \frac{K_I}{K_{IC}} \cos^3 \frac{\theta_0}{2} - \frac{3 K_{II}}{2 K_{IC}} \cos \frac{\theta_0}{2} \sin \theta_0$$

Donde K_I y K_{II} se corresponden al FIT en modo I y II, respectivamente. Mientras que θ_0 representa el ángulo de inclinación de la fisura calculado a partir de la expresión analítica propuesta por Erdogan y Sih, en 1963 [16]:

$$\tan \theta_0 = \frac{-3K_{II} \left(\sqrt{8K_{II}^2 + K_I^2} + K_I \right)}{3K_{II}^2 + K_I \sqrt{8K_{II}^2 + K_I^2}}$$

El parámetro $K_{IC} = 2,82 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ corresponde a la tenacidad de fractura calculada a partir de la siguiente expresión [15], válida para la hipótesis de deformaciones planas:

$$K_{IC} = \sqrt{G_f \cdot E(1 - \nu^2)}$$

De acuerdo con este criterio, siempre que K_{eq} supere la unidad la fisura, se propagará.

En las figuras 6 y 7 se presentan los valores para modo I y modo II, respectivamente. Se muestran los resultados correspondientes a fisura de longitud a_1 , para las dos alturas más extremas, h_1 y h_{10} . Dichos valores se encuentran normalizados con respecto a K_{IC} .

De acuerdo con los resultados presentados en la figura 6, se puede apreciar que cuanto más se aumente la cota de la fisura, tanto mayor será el valor del FIT en modo I. Esto se debe a que las fisuras que se localizan más cerca de la base poseen un esfuerzo de compresión mayor, debido al peso propio de la presa. Es importante destacar que los valores negativos del FIT en modo I indican que la fisura tiende a cerrarse y, por tanto, no se propaga. Por este motivo, dichos valores negativos del FIT en modo I no se tuvieron en cuenta a la hora de calcular el FIT equivalente.

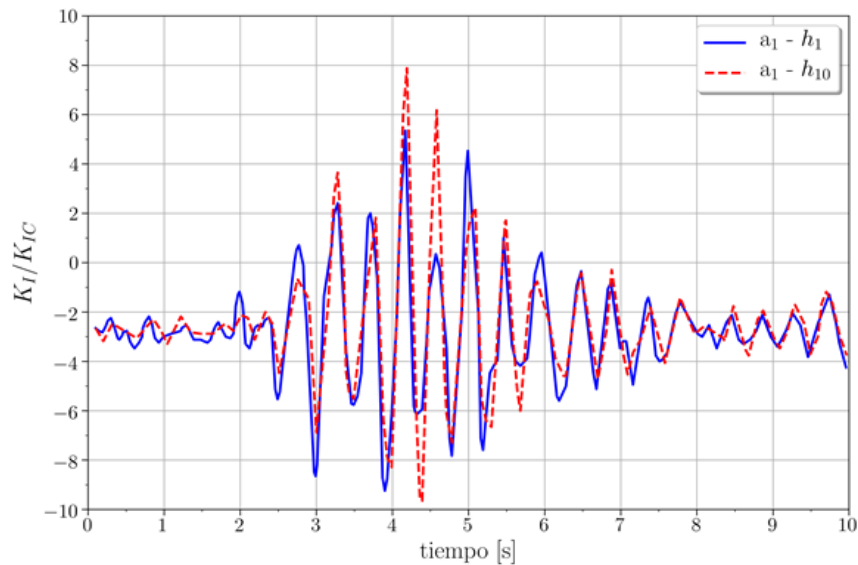


Figura 6. FIT en modo I en función del tiempo.

Los valores del FIT en modo II están asociados a los esfuerzos tangenciales paralelos al plano de la fisura. Si se analiza la geometría del problema, se comprueba que los esfuerzos que existen de este tipo vienen dados principalmente por la fuerza hidrostática y la acción sísmica en la dirección horizontal.

De acuerdo con los resultados de la figura 7, se puede observar que al contrario de lo que ocurría en el modo I, la grieta que se encuentra a mayor altura posee un FIT más bajo. El motivo de este comportamiento es el tipo de distribución de tensiones para una carga hidrostática. Por

tanto, a medida que nos alejamos de la base de la presa, el esfuerzo es menor.

Para cada morfología de fisura se ha calculado la evolución temporal del K_{eq} durante la acción sísmica, y así se ha obtenido de cada histograma un valor máximo de K_{eq} para cada configuración. En la figura 8, se presentan dos casos representativos, correspondientes a los casos analizados en las figuras 6 y 7. Estos resultados muestran que los valores picos del K_{eq} se hallan bien localizados.

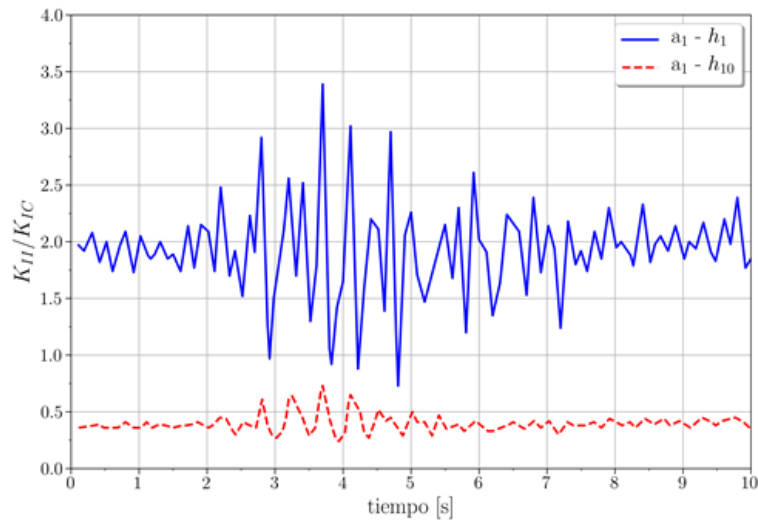


Figura 7. FIT en modo II en función del tiempo.

En la figura 9 se han graficado estos valores máximos en función de la relación entre la cota de la fisura (h_i) y la altura de la presa (H), para cada longitud de fisura. Se puede observar que la inestabilidad de las fisuras aumenta al incrementar su distancia a la base de la presa. Esto puede deberse a que el peso propio actúa como fuerza estabilizante, de forma que colabora en la reducción del FIT equivalente en fisuras que se localizan en cotas inferiores.

También es posible notar que para fisuras localizadas por debajo de los 24,0 m ($h_i/H=0,23$) el K_{eq} es inversamente proporcional a la longitud de la fisura, con lo que es de esperarse que se propaguen hasta estabilizarse. En fisuras ubicadas en cotas superiores, esta tendencia se rompe, con lo que el comportamiento

resulta ser menos predecible. Esto se debe a que en las fisuras largas el peso propio de la presa contribuye en mayor proporción al cerrado de la fisura.

Por último, se ha podido establecer que en fisuras situadas en cotas superiores a 48,0 m ($h_i/H=0,46$) es sumamente importante su reparación, dado que se comportan de forma inestable para todo el rango de longitudes.

En la figura 10 se han graficado los valores del K_{eq} máximo de fisuras selladas parcialmente, en función de la relación h_i/H . Además, se han incluido los valores del FIT equivalente, para el caso de la fisura sin reparar (a_0).

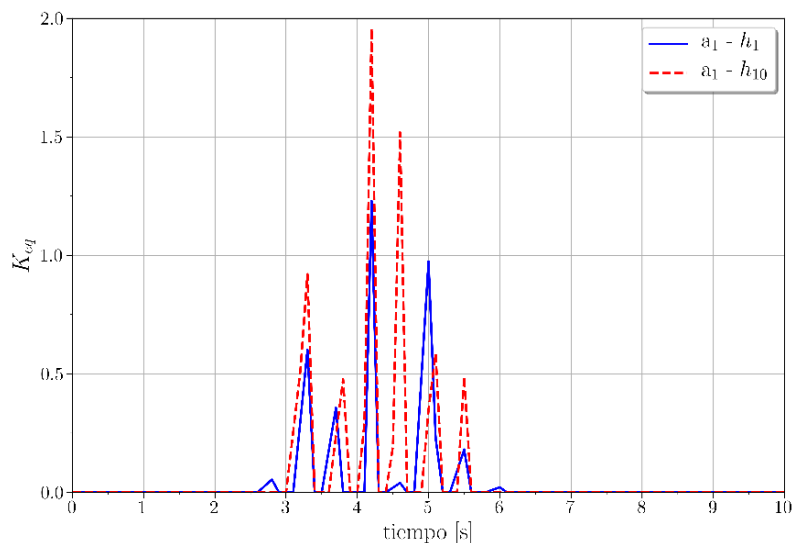


Figura 8. Evolución temporal del FIT equivalente para dos fisuras situadas en cotas distintas.

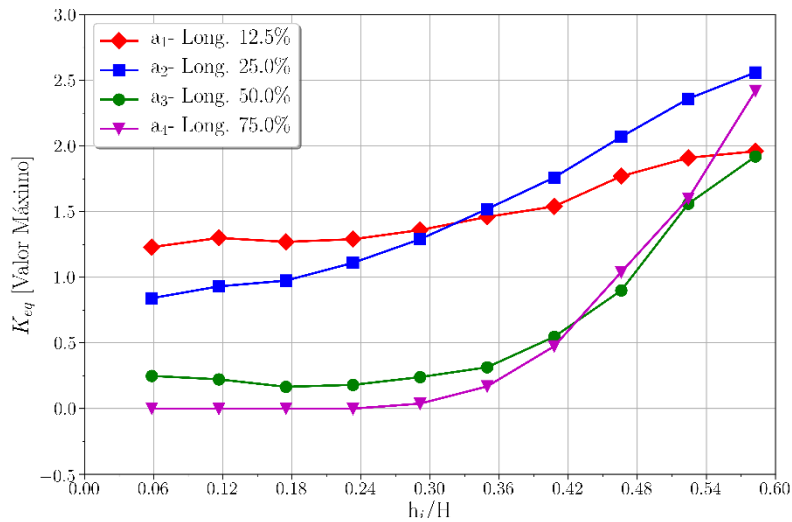


Figura 9. FIT equivalente máximo para distintas morfologías de fisuras.

De este análisis es posible concluir que un sellado parcial en fisuras localizadas en cotas superiores a 48,0 m ($h_i/H=0,46$) ayuda a reducir la inestabilidad de las fisuras. Sin embargo, continúan siendo inestables, de

modo que el sellado total de estas fisuras es de suma importancia para garantizar la estabilidad estructural de la presa. Para fisuras localizadas en cotas inferiores, el sellado parcial no genera una mejora en la estabilidad.

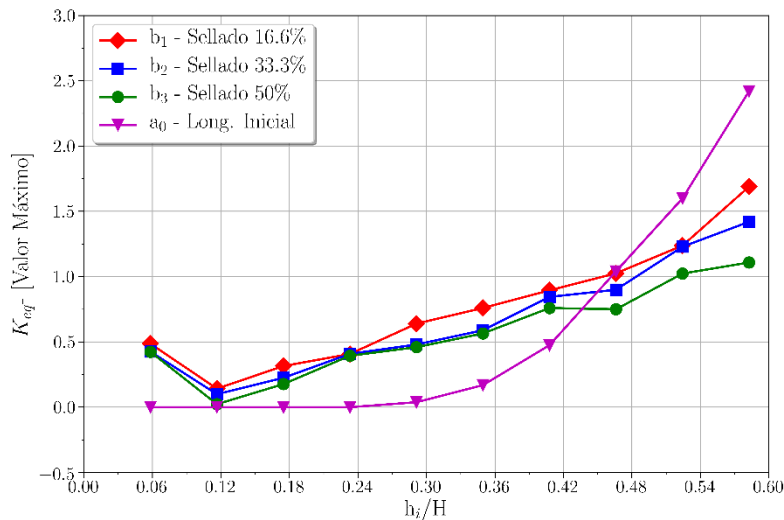


Figura 10. FIT equivalente máximo para distintas morfologías de fisuras selladas parcialmente.

4. Conclusiones

En este trabajo se han presentado los resultados del cálculo del FIT en Modo Mixto, correspondiente al caso típico de una presa de hormigón fisurada sometida a una acción sísmica.

Se ha realizado un estudio paramétrico del problema, mediante el análisis de 40 casos, correspondientes a 10

cotas de fisura, considerando para cada una 4 longitudes distintas.

Con la finalidad de evaluar la importancia de garantizar un buen sellado de la fisura, mediante la inyección de resinas, se ha realizado un segundo estudio paramétrico considerando el sellado parcial de fisuras sometidas a acciones sísmicas. Para ello, se han realizado 30 simulaciones, en las que se ha variado el porcentaje de

sellado de las fisuras de mayor longitud, del estudio anterior.

Del primer análisis paramétrico se han podido obtener las siguientes conclusiones:

- La inestabilidad de las fisuras se incrementa con la altura, y esto puede deberse a que en cotas inferiores el peso propio de la estructura colabora con el cierre de las fisuras.
- En fisuras cercanas a la base de la presa, cotas inferiores a 24,0 m ($h_i/H=0,23$), la inestabilidad de las fisuras disminuye al aumentar la longitud de las fisuras. De manera que es de esperarse que estas fisuras se propaguen hasta alcanzar una longitud dada y luego se estabilicen.
- Fisuras localizadas en cotas superiores a 24,0 m ($h_i/H=0,23$) se comportan de forma inestable para todo el rango de longitudes analizado.
- Para fisuras situadas en cotas superiores a los 48 m ($h_i/H=0,46$) es sumamente importante su reparación, dado que son altamente inestables, mientras que en fisuras localizadas en cotas cercanas a la base de la presa comprometen en menor medida la integridad global de la estructura.

Del segundo estudio paramétrico se han obtenido las siguientes conclusiones:

- En fisuras localizadas en cotas superiores, el sellado parcial puede asegurar una mejora en la integridad estructural de la presa. Sin embargo, esta mejora no evita que las fisuras dejen de ser inestables.
- En el caso de fisuras de cotas inferiores, se requiere un sellado completo, y es necesario asegurarse que se realiza de forma adecuada, ya que fisuras internas de longitudes medias y cortas son particularmente inestables.

Por último, vale la pena mencionar que el estudio realizado en este trabajo deja en evidencia la importancia de llevar a cabo este tipo de análisis, antes de proceder a la reparación con resinas epoxis de fisuras en presas de gravedad de hormigón. Asimismo, este estudio permite establecer, en función de la localización y dimensión de las fisuras, la importancia de su reparación, así como la mejora real que su sellado parcial representa en la estructura.

Referencias

- [1] A.M. Fathy Abdelaziz, "Inyección de grandes grietas con resina epoxi", Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, 1996.
- [2] ACI Committee 224, "Control of Cracking in Concrete Structures," American Concrete Institute, ACI 224R-01, 2002.
- [3] O.C. Guedelhoefer and A.T. Krauklis, "To bond or not to bond," *Concrete International: Design & Construction*, Detroit, USA: 1986, pp. 10-15.
- [4] P.D. Krauss, J.M. Scanlon and M.A. Hanson, "Evaluation of Injection Materials for the Repair of Deep Cracks in Concrete Structures," US Army Corps of Engineers, Washington D. C., USA, REMR-CS-48, Aug, 1995.
- [5] D. Higgins, "Repairs to cracks in concrete," *The Concrete Society*, vol. 17, no. 2, pp. 26-28, 1983.
- [6] R.T.L. Alien, "Choosing a concrete repair system," *Construction Repairs & Maintenance*, vol. 2, no. 5, pp. 10-12, 1986.
- [7] E.I. Villa, M. Braun, M.P. Zappitelli, A. Vaquero Hernández y C.G. Rocco, "Simulación numérica del proceso de inyección de fisuras en presas de hormigón," en *Anales de Mecánica de la Fractura XXVIII*, Gijón, 2011, pp. 625-630.
- [8] C.G. Rocco, M. Braun, M.P. Zappitelli, y E.I. Villa, "Estabilidad de fisuras en presas de hormigón frente a la acción de presiones internas", *Mecánica Computacional*, vol. 30, pp.127-139, 2011.
- [9] Z. Bazant and J. Planas, *Fracture and Size Effect in Concrete and Other Quasibrittle Materials*. London: CRC Press, 1998.
- [10] A. K. Chopra y P. Chakrabarti, "The earthquake experience at koyna dam and stresses in concrete gravity dams," *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, vol. 1, no. 2, pp. 151-164, 1972. doi: 10.1002/eqe.4290010204
- [11] M. L. Ayari y V. E. Saouma, "A fracture mechanics based seismic analysis of concrete gravity dams using discrete cracks," *Eng. Fract. Mech.*, vol. 35, no. 1-3, pp. 587-598, 1990. doi: 10.1016/0013-7944(90)90233-7
- [12] P. E. Skrikerud y H. Bachmann, "Discrete crack modelling for dynamically loaded, unreinforced concrete

structures,” *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, vol. 14, no. 2, pp. 297–315, 1986. doi: 10.1002/eqe.4290140209

[13] ABAQUS, “User’s Manual Version 6.13”. Karlsson and Sorensen Inc, 2014.

[14] N. Toshio y D. M. Parks, “Determination of elastic T-stress along three-dimensional crack fronts using an interaction integral,” *Int. J. Solids Struct.*, vol. 29, no. 13, pp. 1597–1611, 1992. doi: 10.1016/0020-7683(92)90011-H

[15] T. L. Anderson y T. L. Anderson, *Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications, Third Edition*. Taylor & Francis, 2005.

[16] F. Erdogan y G. C. Sih, “On the Crack Extension in Plates Under Plane Loading and Transverse Shear,” *J. Basic Eng.*, vol. 85, no. 4, p. 519, 1963. doi: 10.1115/1.3656897