

ANALISIS DE LA ESTABILIDAD DE FISURAS EN PRESAS DE GRAVEDAD DE HORMIGON SOMETIDAS A ACCIONES SISMICAS

M. Braun¹, E.I. Villa^{2*}, C. Rocco² y J. Fernández-Sáez¹

¹ Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras.
Universidad Carlos III de Madrid.
Avda. de la Universidad, 30, 28911 Leganés, Madrid, España.

² Departamento de Construcciones, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata.
Calle 48 y 115 s/n, (B1900TAG) La Plata, Buenos Aires, República Argentina.
e-mail: eivilla@ing.unlp.edu.ar

1. INTRODUCCIÓN

Es común que en las presas de gravedad de hormigón se generen, como consecuencia de la presencia de acciones de origen sísmico, fisuras horizontales [1] comúnmente conocidas como *fisuras cerradas*. Se trata de fisuras que se forman bajo acciones de corta duración y se cierran (en sentido mecánico, no hidráulico) bajo cargas permanentes, normalmente el peso propio. Ante la presencia de este tipo de fisuras, es habitual reparar la presa mediante la inyección de resinas [1]. Típicamente, esta técnica consiste en realizar un taladro desde una galería interna de la presa hasta alcanzar la fisura y aplicar la resina.

En el presente trabajo se ha estudiado el caso de una presa prefisurada sometida a una acción sísmica. Con la finalidad de evaluar la estabilidad de las fisuras [2-4], se ha calculado el Factor de Intensidad de Tensiones (*FIT*) en modo mixto, considerando distintas posiciones y longitudes de grieta. Los resultados del estudio permiten establecer importantes conclusiones respecto de la sensibilidad de las variables analizadas, definiendo cuáles son las fisuras que más comprometen la integridad estructural de la presa frente a acciones sísmicas.

2. DESCRIPCIÓN DEL MODELO

2.1. Generalidades

En este estudio se ha evaluado la integridad estructural de la presa de Koyna [5,6], a la que se le ha incorporado una fisura paralela al plano horizontal, que se inician 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 [7].

En la Figura 1 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 es sometida la presa se corresponde a los acelerogramas registrados en 1968 durante el sismo que afectó a la presa de Koyna [6]. Para simplificar el análisis se ha considerado solamente la presión hidrostática del embalse, despreciando el efecto hidrodinámico.

Para la discretización del dominio se han utilizado elementos cuadriláteros de integración reducida que permiten realizar el análisis bajo la hipótesis de deformaciones planas (*CPE4R*), disponible en la galería del código utilizado. En la Figura 2 se muestra la malla de elementos finitos utilizada, con una composición de 2310 nodos y 2176 elementos. Para definir el tamaño de dicha malla se ha llevado a cabo su correspondiente análisis de sensibilidad.

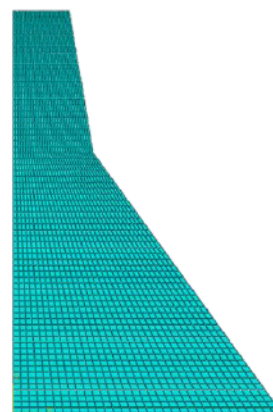
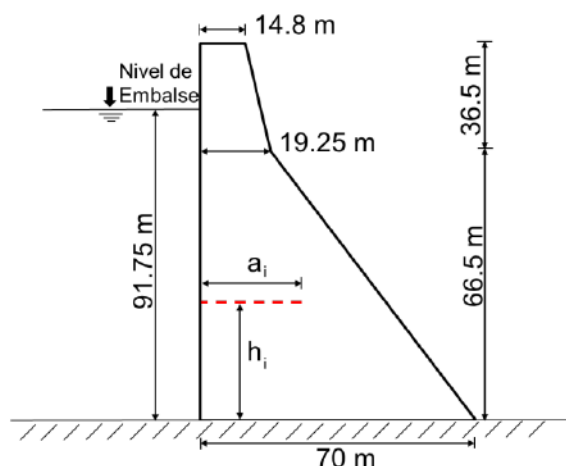


Figura 1: Geometría de la presa de Koyna. Figura 2: Vista general de la malla utilizada.

Las fisuras han sido consideradas con espesor nulo, definiendo la interacción entre las caras mediante un contacto mecánico normal. De manera que ambas superficies pueden separarse y juntarse, pero se impide su interpenetración. En la Tabla 1 se indican las propiedades mecánicas del material considerado en el estudio [6].

Densidad del Hormigón [ρ]	2643 Kg/m ³
Energía de Fractura [G_f]	250 N/m
Coefficiente de Poisson [ν]	0.15
Módulo de Young [E]	31027 MPa

Tabla 1. Propiedades mecánicas del hormigón considerado.

2.2. Casos Estudiados

Se ha llevado a cabo un análisis paramétrico asignando dos variables distintas a la fisura, correspondientes a su longitud y a la altura a la que se encuentra ubicada. Para ello, se han considerado 10 cotas distintas, separadas 6 metros entre sí. Para cada altura se han propuesto cuatro longitudes de grieta, correspondientes al 12.5, 25, 50 y 75 por ciento del espesor de la presa en la cota correspondiente. En la Tabla 2 se muestra un resumen de las 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	6.40	12.80	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	22.10
60	3.14	6.28	12.56	18.84

Tabla 2. Características geométricas de las fisuras estudiadas.

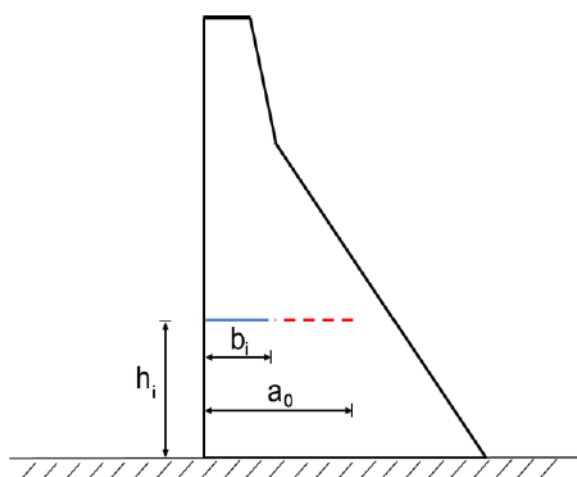


Figura 3: Esquema de las dimensiones de las fisuras con sellado parcial.

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	6.40	12.80	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	22.10	3.68	7.37	14.73
60	18.84	3.14	6.28	12.56

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

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 por ciento de la longitud inicial de la fisura (a_0). En la Figura 3 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 son presentados en función del *FIT* equivalente, K_{eq} , calculado a partir de la teoría de William [8] mediante la siguiente expresión:

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

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 definido del siguiente modo:

$$\tan \theta_0 = \frac{1 K_{II}}{4 K_{IC}} \pm \frac{1}{4} \sqrt{\left(\frac{K_{II}}{K_{IC}}\right)^2 + 8}$$

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 [9], válida para la hipótesis de deformaciones planas:

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

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

Para cada morfología de fisura se ha calculado la evolución temporal de K_{eq} durante la acción sísmica, obteniéndose de cada histograma un valor máximo de K_{eq} para cada configuración.

En la Figura 4 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 grieta. En esta figura, se puede observar que la inestabilidad de las fisuras aumenta al incrementar su distancia a la base de la presa.

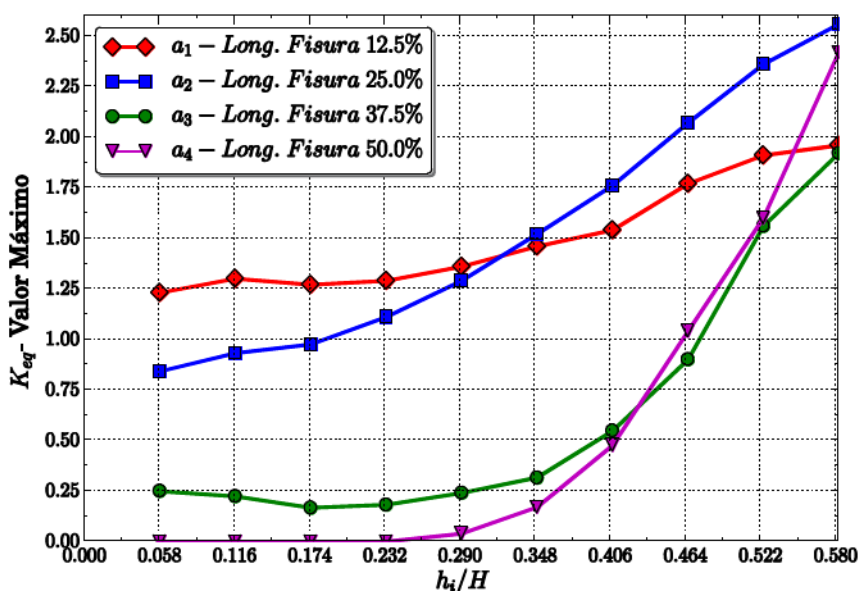


Figura 4: FIT equivalente máximo para distintas morfologías de fisuras.

Esto puede deberse a que el peso propio actúa como fuerza estabilizante, colaborando 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 el K_{eq} es inversamente proporcional a la longitud de la fisura, con lo que es esperable que este tipo de fisuras se propaguen hasta estabilizarse. Asimismo es importante destacar que en aquellas grietas ubicadas en cotas superiores esta tendencia se rompe, con lo que el comportamiento resulta ser menos predecible.

Por último, se ha podido establecer que la reparación de fisuras situadas en cotas superiores a 48.0 m es sumamente importante, dado que estas fisuras se comportan de forma inestable para todo el rango de longitudes.

En la Figura 5 se han graficado los valores máximos de K_{eq} correspondientes a fisuras selladas parcialmente, en función de la relación h_i/H . De este análisis es posible establecer que un sellado parcial en fisuras localizadas en cotas superiores a 48.0 m ayuda a reducir su inestabilidad. Sin embargo, aunque en un grado menor, continúan siendo inestables, de modo que el sellado total de estas fisuras es de suma importancia para garantizar la estabilidad estructural de la presa. Esto contrasta, por ejemplo, con el hecho que se observa para fisuras localizadas en cotas inferiores en las cuales el sellado parcial no genera una mejora en la estabilidad.

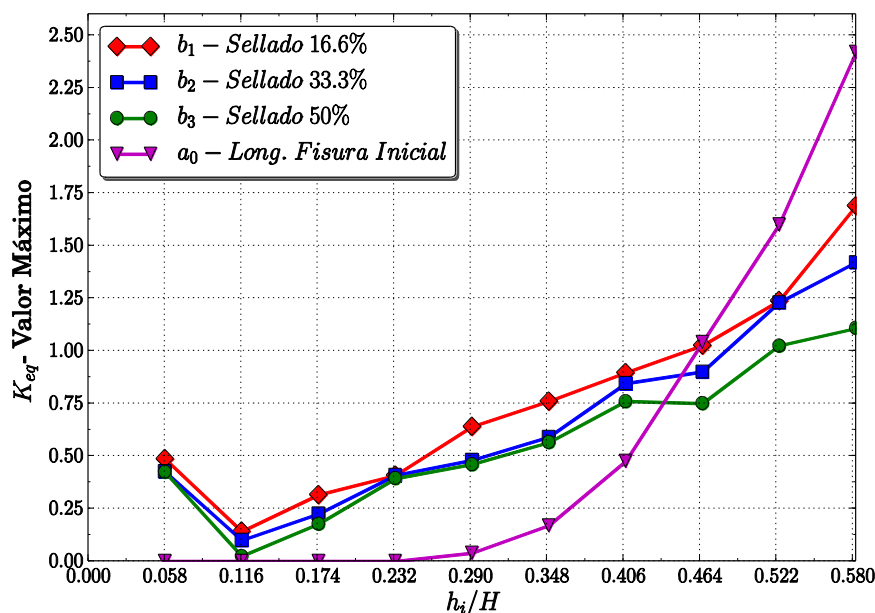


Figura 5: FIT equivalente máximo para distintas morfologías de fisuras selladas parcialmente.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentan resultados del cálculo del *FIT* en Modo Mixto, correspondientes 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 en el que se ha analizado 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 estudio paramétrico se han podido obtener las siguientes conclusiones:

- La inestabilidad de las fisuras se incrementa con la altura. Esto puede deberse a que en cotas inferiores el peso propio de la estructura colabora al cierre de las fisuras de una forma más relevante que en el caso de fisuras situadas en cotas más altas.
- En fisuras cercanas a la base de la presa, cotas inferiores a 24.0 m, 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.
- Aquellas fisuras localizadas en cotas superiores a los 24.0 m se comportan de forma inestable para todo el rango de longitudes analizado.
- Para la geometría y las condiciones de contorno estudiadas, se puede observar claramente que es sumamente importante la reparación de las fisuras situadas en cotas superiores a los 48.0 m dado que son altamente inestables, mientras que las 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 las fisuras ubicadas en las cotas inferiores se requiere de un sellado completo, y es necesario además realizarlo de una forma adecuada, ya que fisuras internas de longitudes medias y cortas son particularmente inestables.

Este análisis pone de manifiesto la importancia de llevar a cabo este tipo de estudios antes de proceder a la reparación con resinas de tipo epoxi o similares de fisuras horizontales en presas de gravedad de hormigón. En particular se ha podido establecer, en función de la localización y longitud de las fisuras analizadas, la importancia de su reparación así como la mejora real que representa en la estructura su sellado parcial.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Fathy Abdelaziz, A.M., *Inyección de grandes grietas con resinas epoxi*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, 1996.

[2] Bazant, Z. and Planas, J., *Fracture and Size Effect in Concrete and Other Quasibrittle Materials*, ISBN 978-08-4938-284-0, CCR Press, 1998.

[3] Villa, E.I., Braun, M., Zappitelli, M.P., Vaquero Hernández, A. y Rocco, C.G., *Simulación numérica del proceso de inyección de fisuras en presas de hormigón*. Anales de Mecánica de la Fractura, 28(2):625-630, 2011.

[4] Rocco, C.G., Braun, M., Zappitelli, M.P. y Villa, E.I., *Estabilidad de fisuras en presas de hormigón frente a la acción de presiones internas*. Mecánica Computacional, 30:127-139, 2011.

[5] Braun, M., Rocco, C.G, Villa, E.I. y Fernández-Sáez, J., *Análisis del comportamiento sísmico de una presa de gravedad de hormigón mediante un modelo discreto*. Anales de Mecánica de la Fractura, 30(2):377-382, 2013.

[6] Ayari, M.L. and Saouma, V.E., *A fracture mechanics based seismic analysis of concrete gravity dams using discrete cracks*. Engineering Fracture Mechanics, Vol. 35, No. 1-3, pp. 587-598, 1990.

[7] ABAQUS, *User's Manual Version 6.13*, Hibbitt, Karlsson and Sorensen Inc., 2014.

[8] Gómez Sánchez, F.J., *Un criterio de rotura en sólidos entallados*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, 1998.

[9] Villa, E.I., *Un método analítico para el estudio del comportamiento en fractura de materiales cuasi-frágiles*. Tesis Doctoral, Universidad Carlos III de Madrid, 2007.