

## ANÁLISIS NUMÉRICO DE LA ESTABILIDAD DE FISURAS EN PRESAS DE HORMIGÓN

E. Ignacio Villa, María P. Zappitelli y Claudio G. Rocco

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

**Palabras clave:** Presas de hormigón, fisuras de origen térmico, presiones internas, presiones hidrostáticas, factor de intensidad de tensiones

### INTRODUCCIÓN

La ocurrencia de fisuras de origen térmico, producidas como consecuencia de los gradientes de masa y de superficie inducidos por el calor liberado durante la hidratación del cemento, es una de las patologías que se presentan con mayor frecuencia en las presas de hormigón. En general estas fisuras se localizan en el tercio medio de la distancia entre juntas de contracción, produciendo un plano de fractura vertical que suele iniciarse en el paramento de aguas arriba y propagarse hacia el interior de la presa en dirección perpendicular al mismo. Si bien estas fisuras no suelen comprometer la estabilidad estructural de la presa, al encontrarse sometidas en su interior a la acción de la presión hidrostática del embalse, tiende a favorecerse su propagación incrementando la permeabilidad de la presa debido a la filtración de agua, lo cual puede afectar sus condiciones de servicio.

Una estrategia convencional para remediar esta patología consiste en sellar la fisura mediante la inyección de resinas. En esta clase de intervenciones es importante diseñar la secuencia de inyección y las presiones máximas de trabajo de modo que la fisura permanezca estable, evitando su propagación como consecuencia del propio procedimiento de reparación. Las resinas se inyectan desde puntos distribuidos en todo el plano de la fisura, con una densidad que va disminuyendo desde las proximidades del frente de la misma hacia el paramento aguas arriba. Las condiciones de estabilidad de la fisura frente a este tipo de acciones dependen de la geometría de la estructura, de las propiedades del material constituyente, de la geometría de la fisura, de la ubicación de los puntos de inyección y de la magnitud de dichas presiones.

En este trabajo se implementó un modelo basado en la Mecánica de Fractura Elástica Lineal (MFEL), teoría propuesta inicialmente por Griffith para explicar los distintos mecanismos de rotura en un sólido fisurado (Griffith, 1920) y desarrollado posteriormente por Irwin (Irwin, 1957). Hasta la aparición de la MFEL, solo el agotamiento por colapso plástico del material tenía fundamentos físicos y matemáticos bien estructurados. La MFEL vino a llenar el vacío que existía en la situación extrema de agotamiento opuesta al colapso plástico, cuando la rotura se produce en condiciones de pequeña deformación y con niveles de sollicitación muy inferiores a los límites de plasticidad del material.

La hipótesis fundamental de esta teoría establece que los procesos de fractura tienen lugar en una pequeña zona situada alrededor del extremo de la fisura, mientras el resto del sólido mantiene un comportamiento elástico y lineal. Los campos de tensiones y de desplazamientos próximos al extremo de la fisura tienen una estructura universal cuya dependencia de la geometría y de la sollicitación exterior se establece mediante un factor de proporcionalidad denominado Factor de Intensidad de Tensiones,  $K_I$  (Meguid, 1989; Anderson, 1995).

La propagación de la fisura sobreviene cuando el  $K_I$  alcanza un valor crítico denominado tenacidad de fractura,  $K_{Ic}$ , que es una propiedad intrínseca del material. En ese instante la fisura se propaga dividiendo al material, que fuera de la zona en proceso de fractura continúa teniendo un comportamiento elástico y lineal, en dos partes entre las cuales no hay interacción a través de la fisura (Kanninen and Popelar, 1985). De esta manera, el criterio local de rotura en Modo I queda determinado por la siguiente ecuación:

$$K_I / K_{Ic} = 1 \quad (1)$$

En el caso de una presa de hormigón, la aplicabilidad de este modelo está justificada al ser las dimensiones de la estructura muy grandes en comparación con la longitud característica del material (Bazant and Planas, 1998).

En este trabajo se presentan expresiones que permiten calcular el Factor de Intensidad de Tensiones,  $K_I$ , en presas de hormigón fisuradas mediante la utilización del Método de los Elementos Finitos (MEFL), implementado a través de un código comercial de probada eficiencia (ABAQUS V6.9)

### CASOS ESTUDIADOS

Para la determinación de  $K_I$  se llevó a cabo una simulación numérica tridimensional de la geometría completa de un módulo típico de una presa de hormigón. Por simplicidad se consideró que la fisura se encontraba contenida en el plano medio del módulo de la misma. De esta forma se impusieron condiciones de simetría en correspondencia con dicho plano y se modeló solo la mitad de la geometría.

Tanto la forma del módulo de presa como las dimensiones de la misma y su relación con las dimensiones del macizo rocoso de fundación fueron tomadas de las recomendaciones del USACE (USACE, 1995). En la Fig. 1 se observa el perfil de presa simulado así como la forma de las fisuras analizadas.

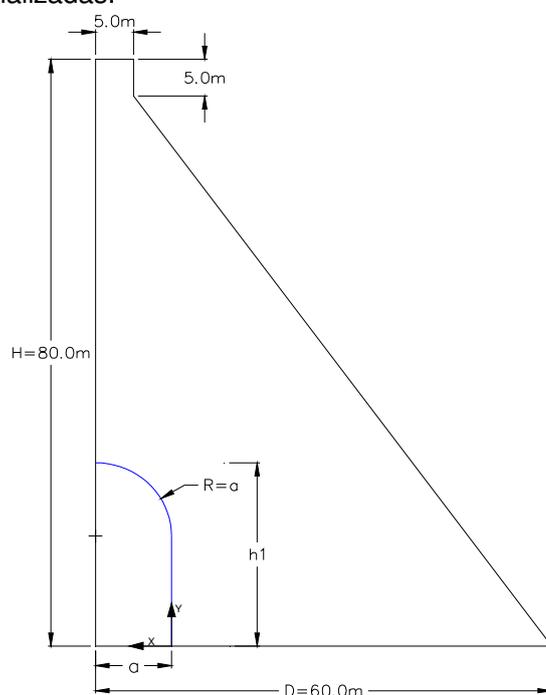


Figura 1 – Perfil de presa analizado

En la Tabla 1 se reseñan las características geométricas en función de las cuales se llevó a cabo el análisis de las seis fisuras estudiadas. Es importante destacar que la forma es la misma en todos los casos analizados, variando solamente sus dimensiones.

Caso	$h_f$ [m]	$a$ [m]
0	12,5	2,5
1	12,5	5,0
2	25,0	5,0
3	25,0	10,0
4	50,0	10,0
5	50,0	20,0

Tabla 1 – Características geométricas

Para la discretización de la presa se utilizaron elementos tridimensionales hexaédricos de 8 nodos, con interpolación lineal de las funciones de forma e integración reducida, lo que genera una importante reducción del tiempo de cálculo. En el macizo rocoso se emplearon elementos tridimensionales hexaédricos de 6 nodos, en tanto que en el frente de la fisura se utilizaron elementos tridimensionales hexaédricos de 4 nodos. En la Fig. 2 se muestra la malla de elementos finitos utilizada, donde se puede observar la sección de la presa y el macizo de fundación.

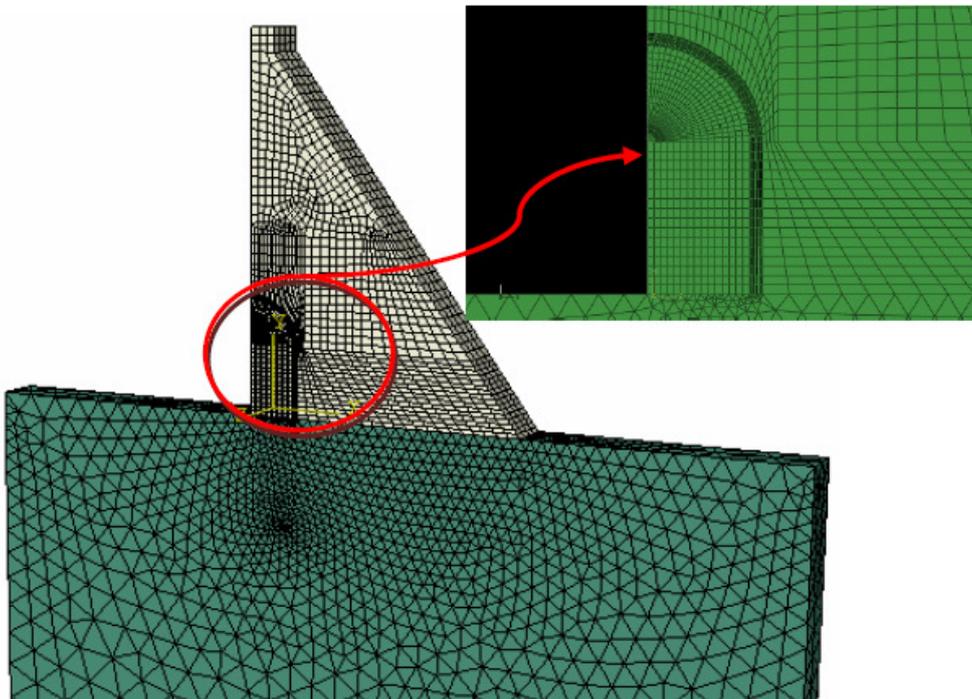


Figura 2 – Vista general del mallado utilizado para la discretización de la presa y del macizo rocoso

Se consideraron dos estados de carga, presiones de inyección y presiones hidrostáticas. Las presiones de inyección se simulon mediante la aplicación de una carga puntual de valor unitario sobre un nodo. Las presiones hidrostáticas se simulon actuando sobre el plano de la fisura para distintos niveles de la cota de embalse que incluyeron la situación de fisura parcialmente sumergida y fisura totalmente sumergida. Para la primera situación se analizaron cuatro niveles de embalse comprendidos entre el 20% y el 100% de la altura total de la fisura,  $h_f$ . Para la segunda situación los niveles de embalse variaron entre  $h_f$  y la altura  $H$  correspondiente al coronamiento de la presa.

Para el caso de las presiones de inyección para cada posición de la carga se obtuvieron los valores de  $K_I$  arrojados por el código a lo largo del perfil del frente de la fisura en correspondencia con la cota de aplicación de la carga, como se observa en la Fig. 3.

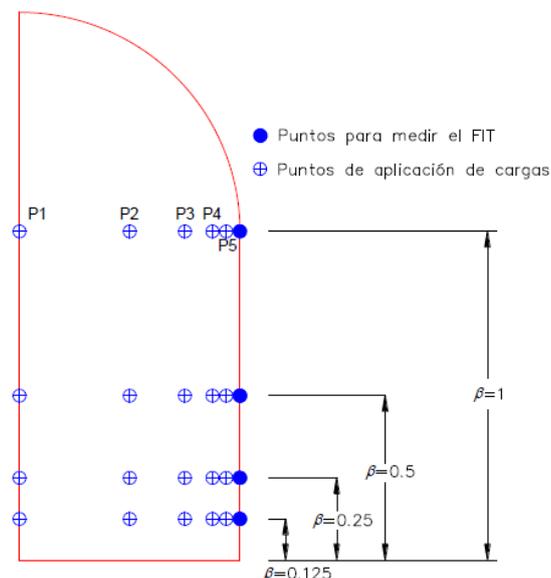


Figura 3 – Puntos considerados para la determinación de  $K_I$

En cambio para las presiones hidrostáticas se obtuvieron los valores de  $K_I$  a lo largo del perfil del frente de la fisura en puntos ubicados a diferentes alturas respecto del plano de fundación.

Para ambos estados de carga se consideraron los primeros 10 contornos de integración, correspondiendo en todos los casos el  $K_I$  informado al promedio de estos 10 valores.

En la Tabla 2 se indican las propiedades mecánicas de los materiales considerados.

Parámetro	Roca	Hormigón
Módulo de Elasticidad, GPa	10.0	25.0
Coefficiente de Poisson	0,15	0,15

Tabla 2 – Propiedades mecánicas de los materiales

## RESULTADOS

Para el caso de las presiones de inyección se obtuvieron los valores adimensionales del factor de intensidad de tensiones que se observan en la Tabla 3 del factor de intensidad de tensiones para el Caso 3, el cual se consideró por ser un caso intermedio.

Caso 3	$K_I/K_0$			
	$\beta=y/h$			
$\alpha=x/a$	1,000	0,500	0,250	0,125
1,0000	24,1	22,2	12,2	5,6
0,5000	26,5	26,5	19,9	14,0
0,2500	49,6	49,7	45,1	38,4
0,1250	117,6	116,7	113,8	105,8
0,0625	253,4	243,2	241,0	230,6

Tabla 3 – Valores adimensionales  $K_I/K_0$

$K_0$  es un parámetro obtenido según la expresión (2):

$$K_0 = F(\alpha, \beta) / (HD^{1/2}) \tag{2}$$

donde:

- $F(\alpha, \beta)$  es la magnitud de la carga aplicada en las caras de la fisura, en las coordenadas relativas  $\alpha = x/a$  y  $\beta = y/h$ , referidas al sistema local de referencia x-y ubicado en el extremo inferior de la fisura (ver Fig. 1)
- $a$  es el ancho máximo de la fisura
- $h$  es la altura del frente vertical de fisura
- $H$  es la altura de la presa
- $D$  es el ancho de la presa en el plano de fundación

Para el caso de la presión hidrostática se obtuvieron, a través de un análisis de regresión por mínimos cuadrados, las expresiones (3) y (4) para el Factor de Intensidad de Tensiones adimensional en función de la cota relativa de embalse  $\gamma$  o  $\beta$ , para el caso de fisura parcialmente sumergida y completamente sumergida respectivamente.

$$K_I^a{}_{max} = \sum C_n \gamma^n \tag{3}$$

$$K_I^a{}_{max} = C_0 + C_1 \beta \tag{4}$$

$K_I^a{}_{max}$  se define a partir de las expresiones (5) y (6):

$$K_I^a = K_I / K_0 \tag{5}$$

$$K_0 = \rho h D^{1/2} \tag{6}$$

siendo  $\rho$  la densidad del agua,  $h$  la cota de embalse y  $D$  una de las dimensiones de la presa. Para el caso de presión hidrostática  $\gamma$  y  $\beta$  se definen como se indica a continuación:

$$\gamma = h/h_1 \tag{7}$$

$$\beta = (h/h_1 - 1) / (H/h_1 - 1) \tag{8}$$

en las cuales  $h$  la altura de embalse,  $h_1$  la altura máxima de la fisura y  $H$  la cota de coronamiento de la presa. Los valores de las constantes  $C_0$  y  $C_n$ , tanto para el caso de fisura parcialmente sumergida como completamente sumergida se observan en las Tablas 4 y 5.

Parámetros de ajuste	Casos					
	0	1	2	3	4	5
$C_1$	0,572	0,828	1,097	0,926	1,69	0,902
$C_2$	-0,565	-1,632	-1,383	-1,327	-2,412	1,061
$C_3$	0,251	1,971	0,591	1,767	4,055	0,183
$C_4$	0,011	-0,907	0,171	-0,876	-2,458	-0,801

Tabla 4 – Parámetros de la función de ajuste para el cálculo de  $K_I^a{}_{max}$  en fisuras parcialmente sumergidas.

Parámetros De ajuste	Casos					
	0	1	2	3	4	5
$C_0$	0,1147	0,1398	0,1721	0,265	0,2436	0,4311
$C_1$	0,268	0,3084	0,426	0,5499	1,0178	1,4161

Tabla 5 – Parámetros de la función de ajuste para el cálculo de  $K_I^a$  en fisuras completamente sumergidas.

Mediante las expresiones anteriores es posible obtener el valor máximo del Factor de Intensidad de Tensiones adimensional en el frente de la fisura en función del nivel del embalse.

## DISCUSIÓN FINAL Y CONCLUSIONES

El estudio realizado nos permite concluir que se han obtenido tablas y expresiones que permiten estimar el valor máximo de  $K_I$  debido a dos estados de carga diferentes, por un lado la acción de cargas puntuales aplicadas en las caras interiores de fisuras verticales y perpendiculares al paramento de aguas arriba en presas de hormigón. Las cuales simulan presiones de inyección, y por el otro a presiones hidrostáticas.

Las mismas pueden ser empleadas para el estudio de la estabilidad de fisuras de origen térmico frente a la acción de las presiones que se originan en el interior de las fisuras durante los trabajos de reparación mediante la aplicación de inyecciones de resinas a alta presión o durante el llenado del embalse o su operación.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] ABAQUS, User's Manual Version 6.9, Karlsson and Sorensen Inc., 2011.
- [2] ACI Committee 224, Control of Cracking in Concrete Structures (ACI 224R-01), American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2001.
- [3] Bazant, Z.P., and Planas, J., Fracture and size effect in concrete and other quasibrittle structures, CRC Press LLC, 1998.
- [4] Concrete dams-control and treatment of cracks, review and case histories, Bulletin N°107, ICOLD, 1997.
- [5] Gravity Dam Design, Engineering and design, EM 1110-2-2200, USACE, 1995.
- [6] María.P Zappitelli, E.I gnacio Villa, José Fernández-Sáez y Claudio G. Rocco, Estabilidad de fisuras en presas de hormigón frente a la acción de presiones internas. Mecánica Computacional, 31:1173–1183, 2012.
- [7] 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.
- [8] Villa, E.I., Braun, M., Zappitelli, M.P., Vaquero Hernández, A. and Rocco, C.G., Simulación numérica del proceso de inyección de fisuras en presas de hormigón. Anales de Mecánica de la Fractura, 28:625–630, 2011.