

ESTABILIDAD DE FISURAS EN PRESAS DE HORMIGÓN FRENTE A LA ACCIÓN DE PRESIONES HIDROSTÁTICAS

María P. Zappitelli^a, E. Ignacio Villa^a, José Fernández-Sáez^b y Claudio G. Rocco^a

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

^b *Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras, Universidad Carlos III de Madrid. Av. de la Universidad 30. 28911 Leganés, Madrid, España.*

Palabras Clave: Presas de hormigón, fisuras de origen térmico, presiones hidrostáticas.

Resumen. 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 sin lugar a dudas una de las patologías que se presentan con mayor frecuencia en las presas de hormigón. En general este tipo de 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 a dicho paramento. Debido a su ubicación, estas fisuras se encuentran sometidas en su interior a la acción de la presión hidrostática del embalse, lo que tiende a potenciar su propagación incrementando la permeabilidad de la presa. Cuando esto ocurre, una práctica habitual para controlar el problema consiste en introducir drenes en el plano de la fisura para aliviar las presiones internas y controlar su propagación. En este trabajo se presentan expresiones que permiten calcular el Factor de Intensidad de Tensiones K_I en función del tamaño de fisura y de la cota del pelo de agua, que permiten predecir la estabilidad de fisuras de origen térmico tanto durante el llenado del embalse de una presa de hormigón como durante su operación. Dichas expresiones se obtuvieron haciendo un ajuste a partir de la determinación numérica de K_I utilizando el Método de los Elementos Finitos. Se estudiaron seis fisuras diferentes en las que se mantuvo constante la forma y se varió la relación entre la altura de la fisura y la altura total de la presa, así como su profundidad en relación al ancho total de la misma.

1 INTRODUCCIÓN

Un objetivo básico en el diseño de estructuras de hormigón masivo, como por ejemplo las presas de gravedad, es prevenir la aparición de fisuras originadas como consecuencia de los gradientes térmicos de masa y de superficie provocados por el calor liberado durante la hidratación del cemento.

En efecto, debido a la cantidad de variables y factores que intervienen en el fenómeno, la formación de fisuras de origen térmico en este tipo de presas es una patología que en la práctica se presenta en forma recurrente. Aún cuando en general su presencia no compromete la estabilidad estructural de la presa, puede afectar sus condiciones de servicio debido a la filtración de agua ([ACI 224R-01, 2001](#)).

La aparición de estas fisuras puede producirse antes, durante o con posterioridad al llenado del embalse. Normalmente se localizan en el tercio medio de la distancia entre juntas de contracción y producen un plano de fractura vertical que se inicia en el paramento de aguas arriba, propagándose hacia el interior de la presa en dirección perpendicular al mismo.

Como consecuencia de ello estas fisuras se ven sometidas en su interior a la acción de la presión hidrostática del embalse, lo que favorece su propagación afectando la permeabilidad de la presa. Cuando estas fisuras aparecen, la primera intervención consiste en introducir drenes en su plano para aliviar las presiones internas. Este tipo de práctica suele ser intuitiva ya que en general los proyectistas no disponen de modelos predictivos para simular la estabilidad de fisuras en estas condiciones. Una vez estabilizado el proceso es habitual reparar la presa mediante la inyección de resinas ([ICOLD, 1997](#); [Villa et al. 2011](#); [Rocco et al. 2011](#)).

En este trabajo se presentan expresiones para el cálculo del Factor de Intensidad de Tensiones K_I , correspondientes a la simulación numérica tridimensional de fisuras de origen térmico en presas de hormigón, sometidas a la presión hidrostática del embalse. El uso de K_I en este tipo de estructuras está justificado al ser sus dimensiones lo suficientemente grandes en comparación con la longitud característica del material ([Bazant and Planas, 1998](#)).

Se estudiaron seis fisuras diferentes, variando la relación entre su altura y la altura total de la presa, así como su profundidad en relación al ancho total de la misma y manteniendo constante su forma. Los resultados permiten extraer conclusiones de interés práctico para el análisis de la estabilidad de este tipo de fisuras y establecer criterios para el control de su propagación.

2 SIMULACIÓN NUMÉRICA

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, empleando el Método de los Elementos Finitos (MEF) utilizando un código comercial de análisis de probada capacidad para la resolución de este tipo de problemas ([ABAQUS, 2011](#)). Por simplicidad se consideró que la fisura se encontraba contenida en el plano medio del módulo de presa. 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 del macizo rocoso de fundación fueron tomadas de las recomendaciones del USACE ([USACE, 1995](#)).

En la [Figura 1](#) se observa el perfil de presa simulado así como la forma de las fisuras analizadas. En la misma puede verse además el estado de cargas considerado, correspondiente a una presión hidrostática actuando en el plano de la fisura para una cota de embalse h .

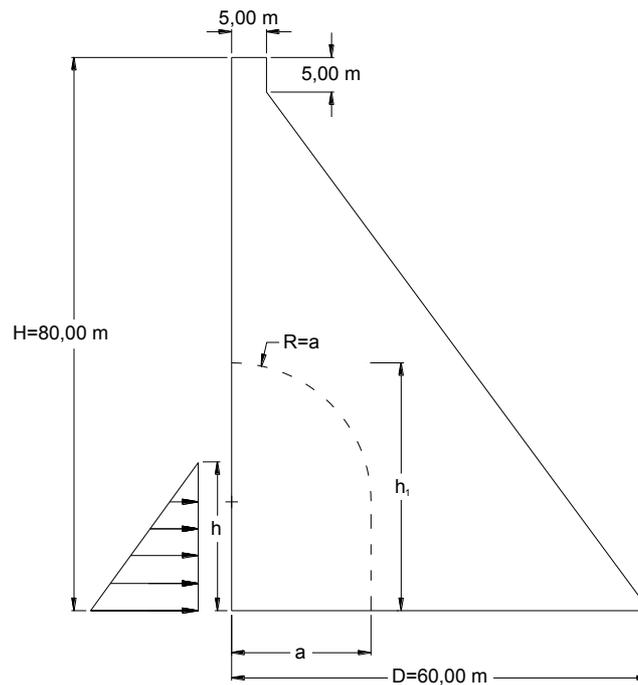


Figura 1: Dimensiones del módulo de presa y de las fisuras estudiadas

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 [Figura 2](#) se muestra la malla de elementos finitos utilizada, donde se puede observar la sección de la presa y el macizo de fundación.

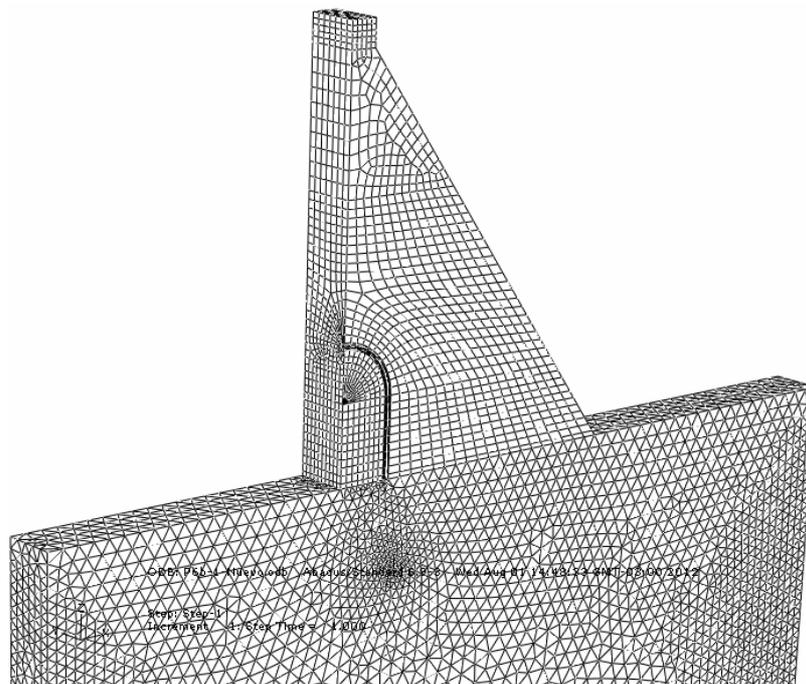


Figura 2: Discretización utilizada para la presa, la fisura y el macizo de fundación

3 CASOS ANALIZADOS

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_1 [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: Dimensiones de las fisuras estudiadas.

Los diferentes estados de carga se simularon mediante la aplicación de una presión hidrostática 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_1 . Para la segunda situación los niveles de embalse variaron entre h_1 y la altura H correspondiente al coronamiento de la presa. Para cada estado de carga 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.

En la [Tabla 2](#) se indican las propiedades mecánicas de los materiales considerados. Para darle al análisis la mayor generalidad posible, dichos valores corresponden a los típicos de una roca en el caso del macizo y de un hormigón convencional en el caso de la presa.

Parámetro	Roca	Hormigón
Módulo de Elasticidad, GPa	10,0	25,0
Coefficiente de Poisson	0,15	0,15

Tabla 2: Propiedades mecánicas del hormigón y de la roca del macizo de fundación.

4 DISCUSIÓN

Con las morfologías de fisuras y estados de carga considerados en el trabajo se efectuaron un total de 55 simulaciones. A los efectos de presentar los resultados en forma adimensional los valores de K_I fueron normalizados mediante la expresión siguiente:

$$K_I^a = K_I/K_0. \quad (1)$$

en la cual K_I^a es el valor adimensional del Factor de Intensidad de Tensiones y el parámetro de normalización K_0 ha sido definido en este trabajo de la siguiente manera:

$$K_0 = \rho hD^{1/2}. \quad (2)$$

donde ρ es el peso específico del agua, h es la cota de embalse y D es una de las dimensiones de la presa según se puede ver en la [Figura 1](#).

4.1 Variación de K_I a lo largo del frente de fisura

En la [Figura 3](#) se representa, para la fisura del caso 3 en situación parcialmente sumergida, la variación del Factor de Intensidad de Tensiones adimensional, K_I^a , a lo largo de distintos puntos del frente de la fisura ubicados a diferentes cotas relativa respecto del plano de fundación. Para el análisis de los resultados se consideró el caso 3 por tratarse de una situación intermedia, habiéndose observado en los casos restantes un comportamiento similar.

Cada una de las curvas representadas en la figura corresponde a niveles de embalse con distinta cota relativa γ definida mediante la siguiente expresión:

$$\gamma = h/h_1. \quad (3)$$

en la cual h es la cota de embalse y h_1 es la altura máxima de la fisura. El parámetro γ varía entre 0, para el caso de embalse vacío y 1 para el caso en que el nivel de embalse alcanza la altura máxima de la fisura. En la figura se indica en línea de trazos punteada la posición donde se alcanza el valor máximo, $K_{I \max}^a$, del Factor de Intensidad de Tensiones adimensional.

En la [Figura 4](#) se representa, también para el caso 3, la variación de K_I^a a lo largo del frente de fisura para la situación de fisura completamente sumergida. Cada una de las familias de puntos representados corresponde a niveles de embalse con distinta cota relativa β definida en este caso mediante la siguiente expresión:

$$\beta = (h/h_1 - 1) / (H/h_1 - 1). \quad (4)$$

donde H es la cota de coronamiento de la presa. El parámetro β varía entre 0 cuando el nivel de embalse alcanza la altura máxima de la fisura y 1 para el caso de embalse lleno.

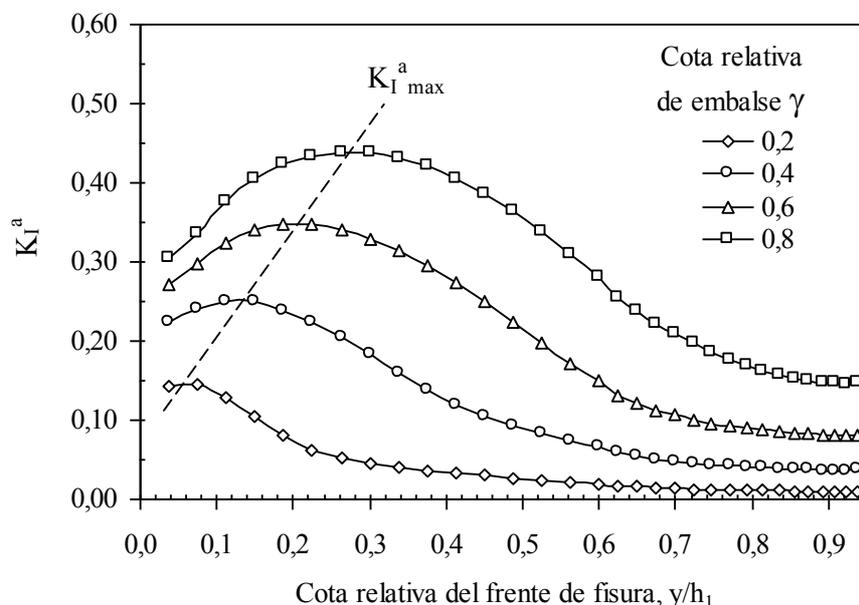


Figura 3: Variación de K_I^a a lo largo del frente de la fisura del caso 3. Fisura parcialmente sumergida sometida a diferentes cotas relativas de embalse γ

Las [Figuras 3 y 4](#) muestran que, para un determinado nivel de embalse, K_I^a fluctúa a lo largo del frente de fisura alcanzando su valor máximo en puntos intermedios.

En el caso de fisuras parcialmente sumergidas el punto de máximo valor se aleja del plano de fundación a medida que se incrementa la cota de embalse mientras que, para el caso en donde la fisura se encuentra totalmente sumergida, dicho punto permanece en una posición fija. Estos comportamientos fueron similares en todos los casos estudiados.

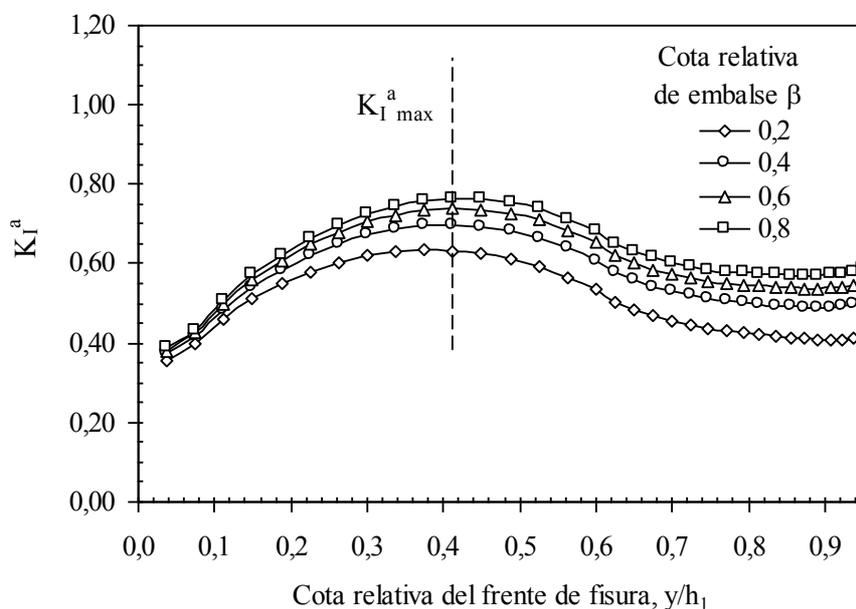


Figura 4: Variación de K_I^a a lo largo del frente de la fisura del caso 3. Fisura completamente sumergida sometida a diferentes cotas relativas de embalse β

4.2 Variación de $K_{I^a_{max}}$ en función de la cota de embalse y del tamaño relativo de fisura

En la Figura 5 se representa, para los casos de fisuras parcialmente sumergidas, el valor máximo del Factor de Intensidad de Tensiones adimensional calculado a lo largo del frente de la fisura, $K_{I^a_{max}}$, en función de la cota relativa de embalse γ .

Del mismo modo, en la Figura 6 se representan, para los casos correspondientes a fisuras completamente sumergidas, el valor de $K_{I^a_{max}}$ en función de la cota relativa de embalse β .

En las Figuras 5 y 6 se incluyeron las curvas obtenidas mediante un análisis de regresión mediante mínimos cuadrados. En el caso de fisuras parcialmente sumergidas (Figura 5) la ley de ajuste obtenida fue una función polinómica de grado 4 cuya expresión analítica es la siguiente:

$$K_{I^a_{max}} = \sum C_n \gamma^n. \quad (5)$$

En el caso de fisuras completamente sumergidas (Figura 6) la ley de variación, tal cual lo esperado, fue de tipo lineal de acuerdo a la siguiente expresión:

$$K_{I^a_{max}} = C_0 + C_1 \beta. \quad (6)$$

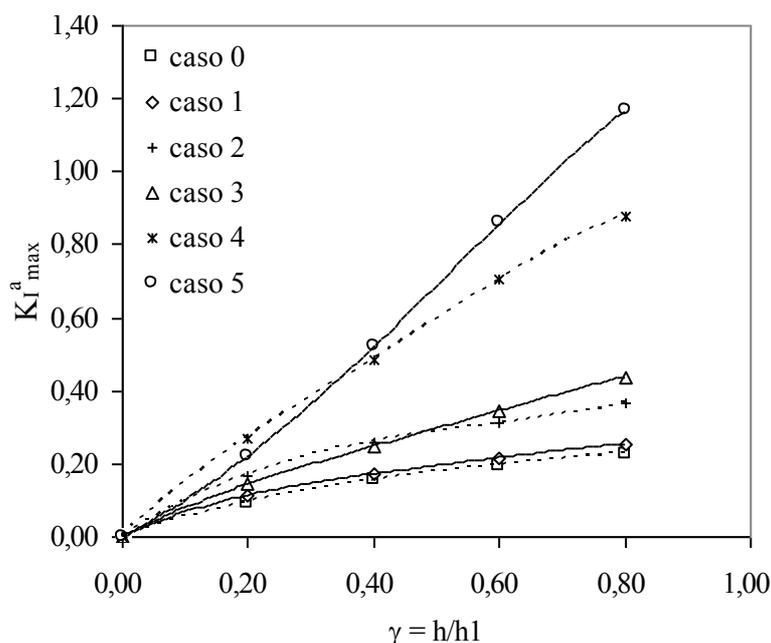


Figura 5: Valores de $K_{I_{max}}^a$ para fisuras parcialmente sumergidas en función de la cota relativa de embalse γ

En las Tablas 3 y 4 se muestran los parámetros correspondientes de las funciones de ajuste representadas en las figuras. Mediante dichas expresiones 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.

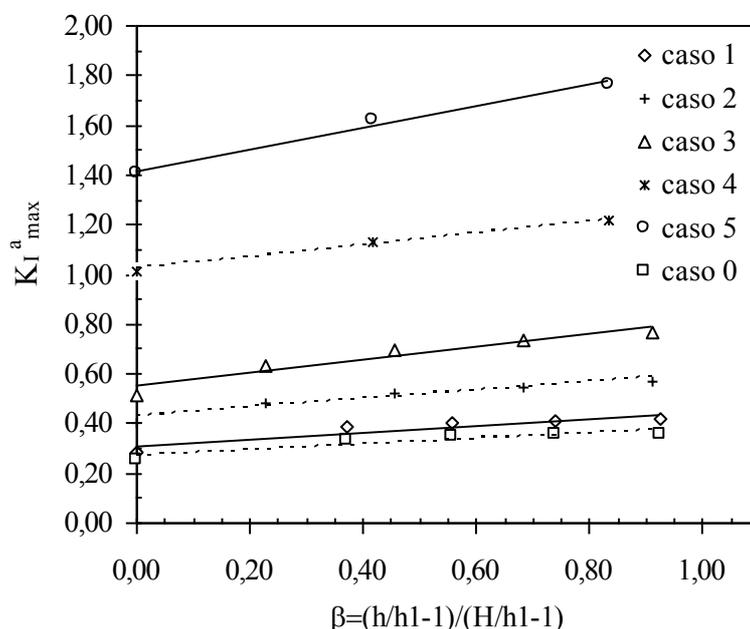


Figura 6: Valores de $K_{I_{max}}^a$ para fisuras completamente sumergidas en función de la cota relativa de embalse β

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 3: Parámetros de la función de ajuste para el cálculo de $K_{I_{max}}^a$ en fisuras completamente sumergidas.

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 $K_{I \max}^a$ en fisuras parcialmente sumergidas.

Los resultados representados en las Figuras 5 y 6 y las funciones ajustadas a partir de los mismos muestran que el valor máximo del Factor de Intensidad de Tensiones adimensional se incrementa a medida que aumenta el nivel de la cota de embalse, hasta alcanzar una velocidad de crecimiento constante una vez que la fisura queda completamente sumergida.

Los resultados muestran también que la velocidad de crecimiento de $K_{I \max}^a$ en función de la cota de embalse resulta mucho más acentuada cuanto mayor es el tamaño de la fisura. Esto se puede apreciar claramente si se comparan las curvas de comportamiento de los casos 0 y 1 (fisuras más pequeñas) con los casos 4 y 5 (fisuras de mayor tamaño).

En el caso de una presa fisurada antes de su primer embalse, el comportamiento descrito tenderá a potenciar la propagación de la fisura durante el llenado generando, en caso que el Factor de Intensidad de Tensiones alcance el valor de la tenacidad de fractura del material, una situación de fuerte inestabilidad en el frente de la fisura.

Respecto a este punto cabe indicarse que, aún para las fisuras de menor tamaño analizadas, los valores de $K_{I \max}^a$ obtenidos estuvieron en general muy por encima del rango de valores característicos de la tenacidad a la fractura de los hormigones usados en la construcción de presas (30 a 60 MPa mm^{1/2}) razón por la cual la probabilidad de ocurrencia de este fenómeno resulta muy elevada.

Para poder analizar con mayor claridad la influencia que tiene el tamaño de la fisura sobre el valor máximo del Factor de Intensidad de Tensiones adimensional en las Figuras 7a y 7b se representa, para distintas cotas relativas de embalse γ y para el caso de fisuras parcialmente sumergidas, la variación de $K_{I \max}^a$ en función del tamaño relativo de fisura a/D .

La Figura 7a corresponde a los casos 1, 3 y 5 donde las fisuras presentaron una relación $h_1/a=2,5$ mientras que en la Figura 7b se representan las curvas correspondientes a los casos 0, 2 y 4 donde las fisuras presentaron una relación $h_1/a=5,0$.

De la misma manera y con el mismo criterio de diferenciación, en las Figuras 8a y 8b se muestran el efecto del tamaño relativo de fisura para el caso de fisuras completamente sumergidas a distintas cotas relativas de embalse β .

En todas las figuras se muestran las correspondientes curvas de regresión que muestran un comportamiento exponencial del fenómeno según la siguiente ley de variación:

$$K_{I \max}^a = B_0 e^{B1 a/D} \quad (7)$$

donde a/D es el tamaño relativo de fisura.

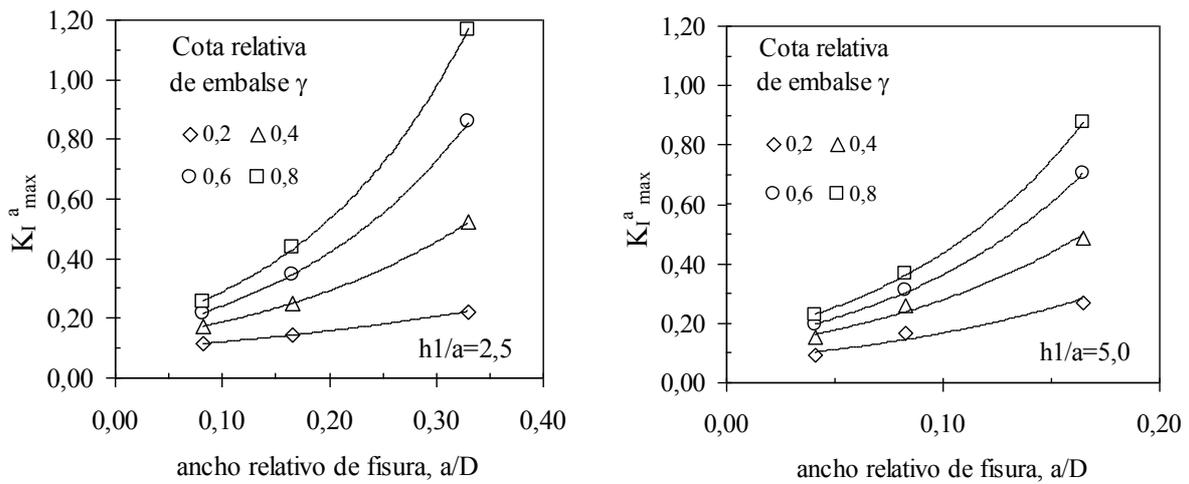


Figura 7a y 7b: Variación de $K_{I \max}^a$ en función del ancho relativo de fisura para distintas cotas relativas de embalse γ . Fisuras parcialmente sumergidas

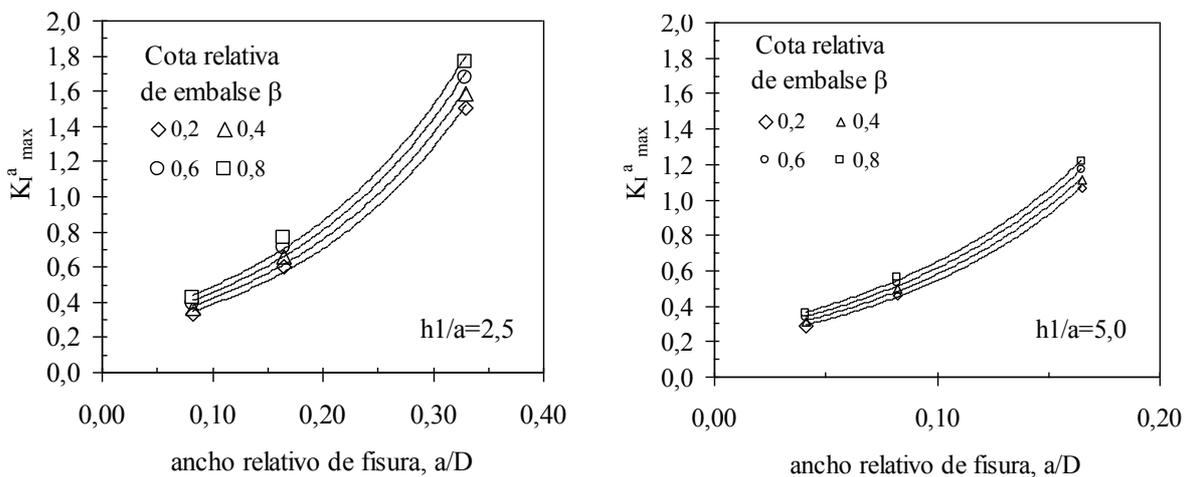


Figura 8a y 8b: Variación de $K_{I \max}^a$ en función del ancho relativo de fisura para distintas cotas relativas de embalse β . Fisuras completamente sumergidas

En las [Tablas 5 y 6](#) se indican los valores de los parámetros B_0 y B_1 correspondientes a las curvas de regresión ajustadas. A partir de las funciones obtenidas es posible estimar el $K_{I \max}^a$ en función de la cota relativa de embalse y del tamaño relativo de fisura, dentro de los rangos del ajuste y para fisuras geoméricamente semejantes a las representadas ($h_1/a=2,5$).

Cota relativa de embalse γ	Parámetros de ajuste			
	$h_1/a=2,5$		$h_1/a=5,0$	
	B_0	B_1	B_0	B_1
0,2	0,093	2,674	0,074	8,133
0,4	0,119	4,459	0,113	9,027
0,6	0,138	5,539	0,129	10,292
0,8	0,156	6,103	0,147	10,84

Tabla 5: Parámetros de la función de ajuste para el cálculo de $K_{I \max}^a$ en fisuras parcialmente sumergidas, en función de su tamaño relativo.

Cota relativa de embalse β	Parámetros de ajuste			
	$h_1/a=2,5$		$h_1/a=5,0$	
	B_0	B_1	B_0	B_1
0,2	0,2131	5,973	0,191	10,451
0,4	0,2341	5,865	0,209	10,187
0,6	0,2552	5,770	0,227	9,953
0,8	0,2764	5,687	0,245	9,742

Tabla 6: Parámetros de la función de ajuste para el cálculo de K_I^a en fisuras completamente sumergidas, en función de su tamaño relativo.

Los parámetros de ajuste indicados en las tablas precedentes muestran una variación casi lineal con respecto a las cotas relativas de embalse. Teniendo en cuenta dicha propiedad, se proponen a continuación ecuaciones generales que permiten estimar el valor de K_I^a en función de la cota relativa de embalse y del tamaño relativo de fisura, válidas para la geometría de presas y fisuras analizadas:

$$K_I^a = (0,104\beta + 0,074) e^{(5,683\gamma + 1,852) a/D} \quad (h_1/a=2,5) \quad (8)$$

$$K_I^a = (0,117\beta + 0,057) e^{(4,693\gamma + 7,226) a/D} \quad (h_1/a=5,0) \quad (9)$$

válida para fisura parcialmente sumergida con h_1/a igual a 2,5 y 5,0

$$K_I^a = (0,105\beta + 0,192) e^{(-0,476\beta + 6,062) a/D} \quad (h_1/a=2,5) \quad (10)$$

$$K_I^a = (0,090\beta + 0,173) e^{(-1,180\beta + 10,67) a/D} \quad (h_1/a=5,0) \quad (11)$$

válida para fisura completamente sumergida con h_1/a igual a 2,5 y 5,0

5 CONCLUSIONES

En el presente trabajo se han obtenido expresiones adimensionales que permiten calcular el valor máximo del Factor de Intensidad de Tensiones adimensional, K_I^a , en función del tamaño de fisura y de la cota del pelo de agua, que permiten predecir la estabilidad de fisuras de origen térmico tanto durante el llenado del embalse de una presa de hormigón como durante su operación.

A partir de los resultados obtenidos, validos para la geometría de presa y de fisuras analizadas, se pueden establecer las siguientes conclusiones:

- Para fisuras parcialmente sumergidas la posición en el frente de fisura donde se registra el valor de K_I^a se aleja del plano de fundación a medida que se incrementa la cota relativa de embalse. Sin embargo, en el caso de fisuras totalmente sumergidas esta posición es independiente de la cota relativa de embalse.
- La influencia de la relación de aspecto de la fisura (h_1/a) en el valor de K_I^a es más significativa a medida que el tamaño de la fisura aumenta, siendo además mucho más evidente este efecto en el caso de fisuras totalmente sumergidas.
- El valor de K_I^a aumenta a medida que se incrementa el tamaño de la fisura, siendo este incremento más veloz a medida que el tamaño de la fisura es mayor.

- En relación al punto anterior se observa que, para fisuras parcialmente sumergidas, la velocidad de crecimiento aumenta de manera proporcional a la cota relativa de embalse. Esto no ocurre en el caso de fisuras totalmente sumergidas para las cuales esta velocidad de crecimiento es independiente de la cota relativa de embalse.
- Finalmente, es importante destacar que, aún en el caso de fisuras pequeñas, es posible alcanzar condiciones de inestabilidad que propenden su propagación con niveles de embalse relativamente bajos.

REFERENCIAS

ABAQUS, *User's Manual Version 6.9*, Karlsson and Sorensen Inc., 2011.

ACI Committee 224, *Control of Cracking in Concrete Structures (ACI 224R-01)*, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2001.

Bazant, Z.P., and Planas, J., *Fracture and size effect in concrete and other quasibrittle structures*, CRC Press LLC, 1998.

Concrete dams-control and treatment of cracks, review and case histories, Bulletin N°107, ICOLD, 1997.

Gravity Dam Design, Engineering and design, EM 1110-2-2200, USACE, 1995.

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

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.