

## ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD DE FISURAS EN EL HORMIGÓN DE LA PRESA DEL APROVECHAMIENTO HIDROELECTRICO PIEDRA DEL AGUILA

Alberto I. Gregotti<sup>a</sup>, Adriana Pernich<sup>b</sup>

<sup>a</sup> *Departamento Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Comahue, Buenos Aires 1400, 8300 Neuquén, Argentina, [alberto.gregotti@gmail.com](mailto:alberto.gregotti@gmail.com), <http://www.uncoma.edu.ar>*

<sup>b</sup> *Departamento Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Comahue, Buenos Aires 1400, 8300 Neuquén, Argentina, [apernich@gmail.com](mailto:apernich@gmail.com), <http://www.uncoma.edu.ar>*

**Keywords:** Fisuras en hormigón, mecánica de fractura lineal elástica, factor de intensidad de tensiones.

**Resumen:** La fisuración por contracción térmica es una patología muy común encontrada en las presas de hormigón masivo. Para evitar el efecto lixiviante del agua que circula por el interior de la fisura y restablecer la continuidad estructural de los módulos fisurados, se realizan tratamientos de inyección a alta presión de resinas epoxis.

Se realizan simulaciones de los casos típicos de la Mecánica de Fractura Lineal Elástica con el fin de validar los modelos numéricos realizados en un programa de elementos finitos para propósitos generales. A través de numerosos modelos se evalúa la influencia en la convergencia de los resultados de diversos parámetros tales como el tamaño, tipo y distribución de elementos, la cantidad de integrales de contorno a evaluar y la geometría de la fisura. Los resultados muestran que los modelos numéricos implementados concuerdan con los resultados teóricos de la Mecánica de Fractura Lineal Elástica.

Luego se estudia la estabilidad de la fisura del Módulo 27 de la presa del Aprovechamiento Hidroeléctrico Piedra del Águila a través de modelos de elementos finitos que representan diversas condiciones de inyección de la fisura y estado de carga más desfavorable. También se analiza la influencia de distintos tipos de interacciones entre las partes modeladas, como adherencia perfecta o contacto sin fricción entre la resina y el hormigón. En todos los modelos se obtuvo que la fisura es estable aún bajo condiciones altamente desfavorables y que el proceso de inyección mejora notablemente la estabilidad de la fisura.

## 1 INTRODUCCIÓN

La fisuración de origen térmico del hormigón es una patología de ocurrencia frecuente en las presas de hormigón masivo. El calor generado durante la hidratación del cemento, en toda la masa de hormigón, es liberado en las superficies produciendo un gradiente de temperatura. Este gradiente genera tensiones que al superar la resistencia del material produce fisuras. En general este tipo de fisuras se encuentra ubicado en la zona central de los módulos de la presa en un plano vertical que se inicia en el paramento de aguas arriba y se propaga hacia el interior de los módulos. Esta patología se desarrolló en varios módulos de la presa del Aprovechamiento Hidroeléctrico Piedra del Águila durante el primer llenado del embalse en el año 1992. Si bien éstas fisuras no comprometen la estabilidad estructural de la presa, su presencia afecta las condiciones de servicio y auscultación principalmente debidas a la filtración de agua (ACI, 2001). La filtración además produce la lixiviación de la etringita y del hidróxido de calcio, la cual conlleva pérdida del material cementante en la superficie de la fisura y parcialmente en un espesor de 10 mm adyacente a la misma (Giovambattista, 2007).

Desde el primer llenado se ha monitoreado la temperatura de los módulos de la presa por medio del instrumental de auscultación instalado con el fin de determinar el momento a partir del cual la temperatura ha entrado en régimen solo dependiente de las temperaturas externas (régimen estacional). A partir de ese momento es posible realizar el sellado definitivo de las fisuras por inyección a presión de resinas epoxis con el fin de evitar el ingreso de agua a las galerías y recuperar el monolitismo del módulo. Dicho procedimiento debe realizarse de modo tal que la fisura permanezca estable (ICOLD, 1997).

En el presente trabajo se busca evaluar numéricamente los resultados del proceso de inyección, una vez finalizado éste, evaluando la estabilidad de la fisura con diferentes condiciones de adherencia de la resina a los planos de la fisura ante diversos estados de carga.

En la sección 1 se presentan los dos casos a estudiar y sus objetivos. En la sección 2 se presenta el estudio realizado sobre una probeta para comparar los resultados numéricos con los provenientes de la mecánica de fractura lineal elástica. En la sección 3 se presentan los modelos realizados de la fisura del módulo de la presa, considerando diferentes estados al final del proceso de inyección. Finalmente en la sección 4 se presentan las conclusiones del presente estudio

## 2 MODELOS NUMÉRICOS

Los modelos numéricos basados en la mecánica de fractura lineal elástica frágil (MFLE) permiten estudiar la rotura de un material en condiciones de pequeñas deformaciones y niveles de tensiones inferiores a los que producen la plastificación del material. El proceso de fractura tiene lugar en una pequeña zona cercana a la punta de la fisura mientras el material restante permanece en régimen lineal elástico. El inicio de la propagación de la fisura es predicho por MFLE cuando el factor de intensidad de tensiones  $K_I$  alcanza un valor crítico, correspondiente al modo de apertura de la fisura,  $K_{IC}$  denominado tenacidad a la fractura del material. Durante la propagación de la fisura se generan dos superficies dentro del material sin interacción entre ellas.

Se utilizó el código comercial Abaqus 6.6 para implementar los distintos modelos estudiados, considerando por simplicidad en todos los casos que las superficies que forman la fisura son planas.

El planteo de los modelos numéricos tiene dos objetivos principales, el primero es validar el modelo con los resultados típicos de la mecánica de fractura lineal elástica (MFLE) correspondiente al Modo I de apertura y el segundo es estudiar la estabilidad de la fisura del

módulo de la presa.

La validación del modelo numérico con la mecánica de fractura lineal elástica ha permitido garantizar la concordancia de los resultados obtenidos con dos metodologías diferentes (compatibilidad / equilibrio) en especial en lo referente a la imposición de condiciones de contorno en el modelo numérico (método de equilibrio). Se utiliza un dominio rectangular con una fisura centrada en el lado de mayor longitud considerando un caso de deformación plana, y se lo denomina probeta. El material considerado es un acero ( $E = 2.0 \cdot 10^{11} \text{ N/m}^2$ ,  $\nu = 0.29$ ) a los efectos de comparar con resultados analíticos provenientes de la mecánica de fractura.

Si bien el desarrollo de la fisura del módulo en estudio llevaría a un modelo tridimensional, para el análisis se asimilará a un problema bidimensional de deformación plana considerando el caso más desfavorable que consiste en evaluar la sección horizontal del módulo que combina una relación longitud de fisura / ancho del módulo (Rocco, 2011) desfavorable para la estabilidad de la fisura y un estado de carga de embalse elevado. La "rebanada" del módulo se considera en deformación plana y al hormigón como un material elástico lineal homogéneo de comportamiento de tipo frágil.

### 3 MODELO NUMÉRICO DE LA PROBETA

Para los modelos se utilizaron elementos con funciones de interpolación lineales para los desplazamientos. En modelos previos (Gregotti, 2012) se utilizaron elementos cuadráticos encontrando que el tiempo de cálculo se incrementa notoriamente sin una apreciable mejora en los resultados. En los modelos previos también se evaluó la influencia de la apertura inicial de la fisura, encontrando que los resultados de interés (factor de intensidad de tensiones  $K_I$ ) no son afectados de manera significativa, por ello se consideró una separación entre bordes de fisura para en el borde de la probeta de 1mm. La geometría de la fisura modelada es triangular.

Se modeló una probeta de 200 mm de largo y 100 mm de ancho con una fisura de 20 mm de largo y 1 mm de ancho en la base, localizada en el centro del lado mayor longitud. Se restringieron los desplazamientos en la dirección  $x$  al punto medio del lado opuesto a la fisura y los desplazamientos en la dirección  $y$  a ambos lados paralelos a la fisura. El sistema de referencia se indica en la Figura 1.

El factor de intensidad de tensiones es evaluado por integración del campo de tensiones. Estas integrales solo son calculadas por el programa si los elementos en los cuales se va a llevar a cabo la integración son cuadriláteros, esto motivó dividir el dominio en dos zonas para optimizar el mallado y contar con suficiente número de capas de elementos para realizar varias integrales en la zona de punta de fisura.

Los modelos utilizados consideran diferentes tamaños de los elementos cuadriláteros en la zona cercana a la fisura, observándose que el valor obtenido para  $K_I$  es afectado por el tamaño promedio de los elementos. El refinamiento de la malla se realizó principalmente en la zona circular que rodea la fisura y los elementos triangulares compatibilizan su tamaño en la zona cercana, discretizando el resto del dominio con triángulos que aumentan su tamaño hacia los bordes de la probeta

. En la Figura 1 se muestra una de las mallas utilizadas donde puede observarse la zonificación del dominio.

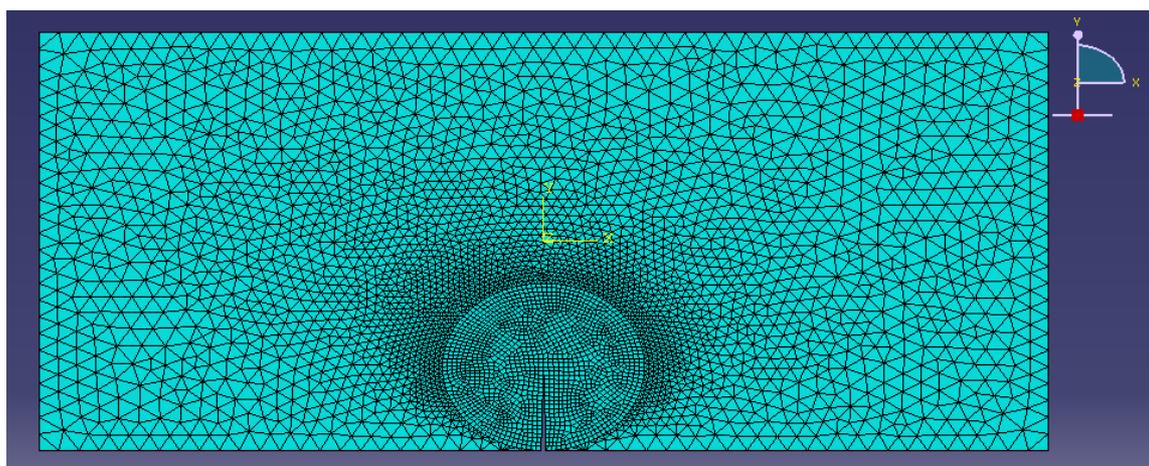


Figura 1: Zonificación del dominio de la probeta y mallado combinando elementos cuadriláteros y triangulares.

Para realizar el análisis de convergencia de las tensiones y del factor de intensidad de tensiones se realizaron seis modelos con tamaños de elementos, en la zona del dominio cercana a la fisura, de 4 mm a 0.1 mm.

El análisis de la convergencia de la tensión  $\sigma_{11}$  y  $\sigma_{22}$  en la punta de la fisura con el tamaño de elemento se muestra en la Figura 2. Puede observarse que al disminuir el tamaño los valores de las tensiones en ambas direcciones convergen asintóticamente a infinito, tal como lo establece la MFLE.

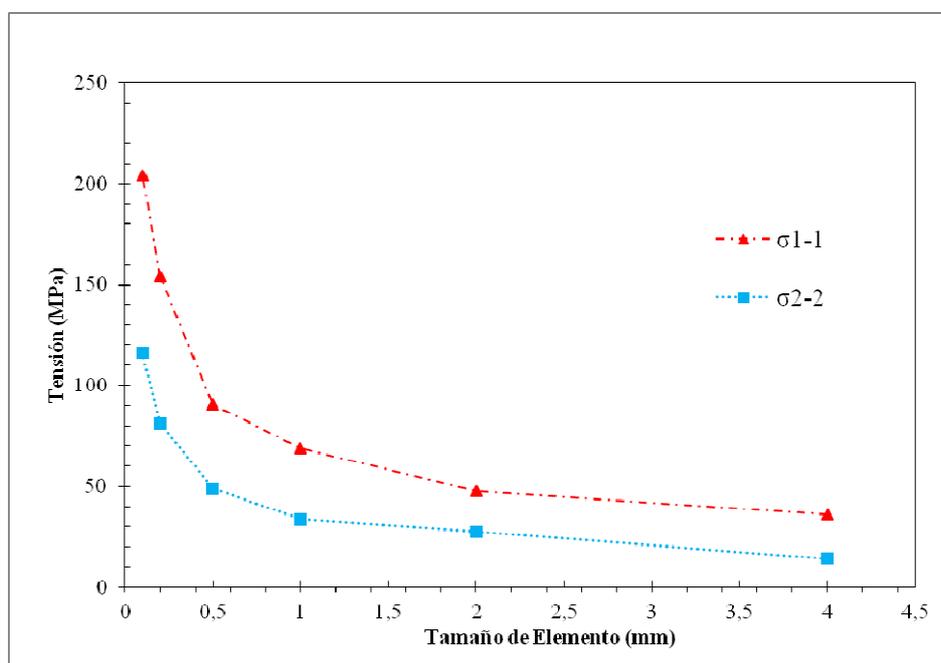


Figura 2: Convergencia de la tensión  $\sigma_{11}$  y  $\sigma_{22}$  con el tamaño de elemento.

En la Figura 3 se puede observar la distribución de tensiones  $\sigma_{11}$  en toda la probeta, con una zona muy pequeña de alta tensión de tracción que disminuye rápidamente hacia el resto del dominio. También puede verificarse que en la mitad superior la tensión  $\sigma_{11}$  es constante .

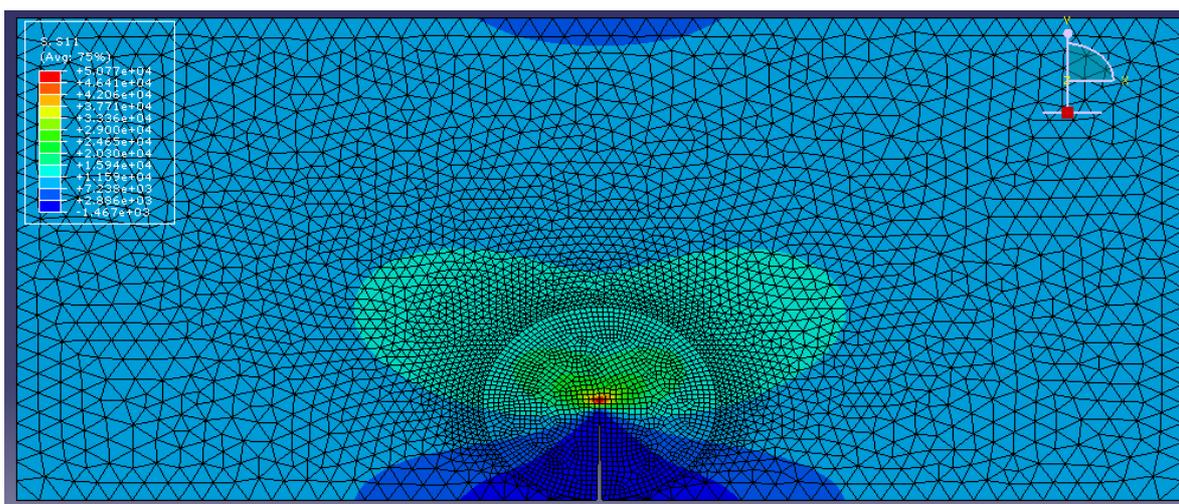


Figura 3: Distribución de tensión  $\sigma_{11}$  en la probeta.

A su vez se analizó la correspondencia de las tensiones  $\sigma_{11}$  calculadas con los modelos de elementos finitos y las tensiones arrojadas por las ecuaciones de la MFLE. La Figura 4 muestra el valor de las tensiones  $\sigma_{11}$  y  $\sigma_{22}$  a distintas distancias desde la punta de la fisura sobre el eje de simetría de la probeta para modelos con diferentes tamaños de elementos. Se observa que las tensiones calculadas con los modelos cuyo tamaño máximo de elemento es 0,2 mm y 0,5 mm muestran buena correspondencia con las tensiones predichas por la MFLE.

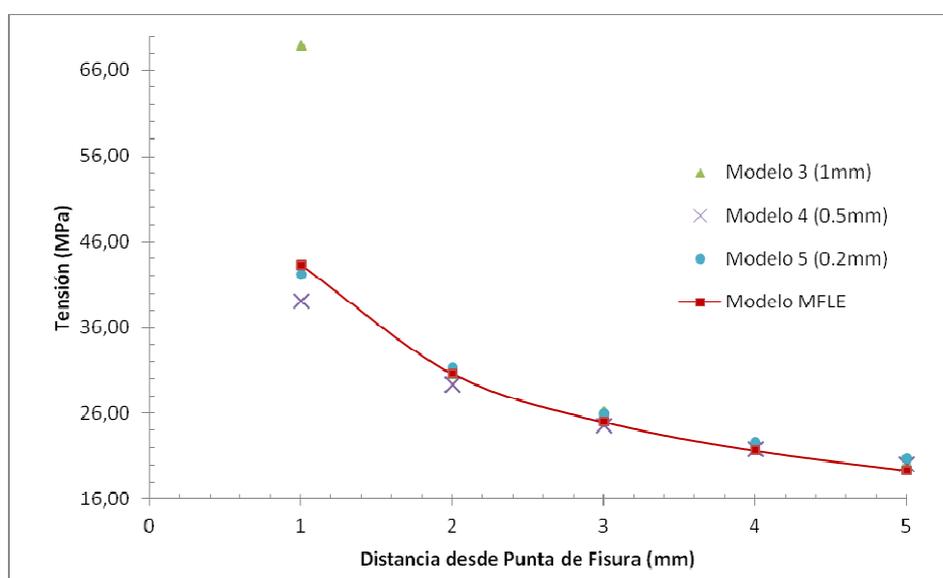


Figura 4: Convergencia de la tensión  $\sigma_{11}$  en función de la distancia a la punta de fisura.

El análisis de convergencia de  $K_I$  se realizó considerando el tamaño de elemento y la cantidad de integrales de contorno. Cada integral de contorno utiliza las tensiones de diferentes conjuntos de elementos, la primera integral utiliza las tensiones de los elementos en contacto directo con la punta de la fisura y las restantes integrales las capas sucesivas de elementos que rodean a la capa previa. En la Figura 5 se muestra un esquema de los elementos que el programa utiliza para calcular las primeras cuatro integrales de contorno.

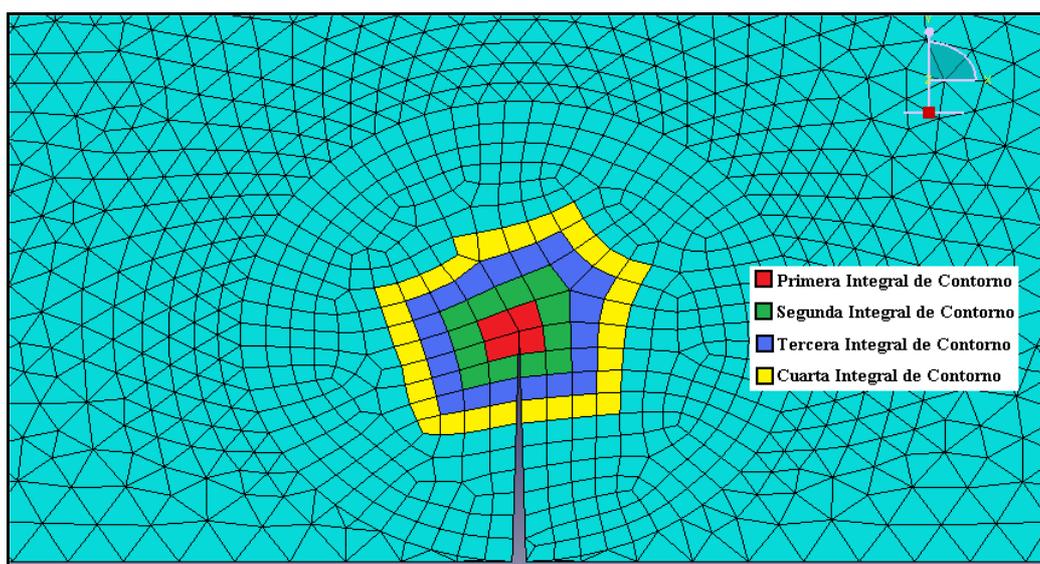


Figura 5: Esquema de los elementos considerados en las primeras cuatro integrales de contorno

En la [Figura 6](#) se presenta el análisis de convergencia de  $K_I$  con el tamaño promedio de los elementos y con el número de integrales que han sido calculadas. Puede observarse que para tamaño de elementos iguales ó menores a la menor dimensión de la fisura (1mm) el valor de  $K_I$  converge rápidamente, aún cuando la cantidad de integrales de contorno evaluadas es mínima. La utilización de elementos con tamaños mayores sólo permite el cálculo de unas pocas integrales de contorno, siendo la aproximación obtenida poco satisfactoria (Modelo 1 en [Figura 6](#)). Para tamaño de elementos menor o igual que 1 mm, se obtienen valores de  $K_I$  muy estables a partir de la sexta integral de contorno.

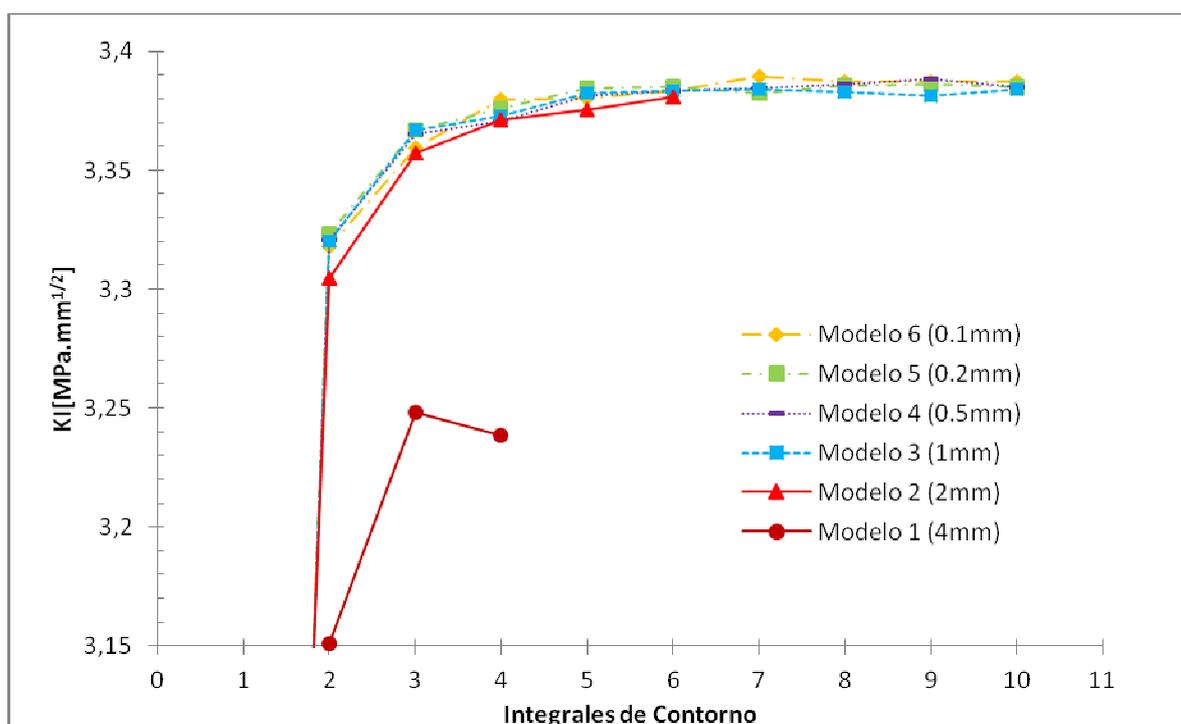


Figura 6: Convergencia de  $K_I$  con el tamaño de elemento e integrales de contorno

De acuerdo a la MFLE se puede calcular:

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \cdot f(\lambda) \quad \text{para} \quad a; t \geq 2,5 \cdot \left( \frac{K_{IC}}{Y} \right)^2 \quad (1)$$

$\lambda$	$f(\lambda)$
0 ( $c \rightarrow \infty$ )	1,12
0,2	1,37
0,4	2,11
0,5	2,83

Siendo:

a: ancho de la probeta.

t: espesor de la probeta

Y: tensión de fluencia.

c: longitud de la fisura.

$\lambda = a / c$

$K_{IC}$ : Factor de intensidad de tensiones crítico del material

$K_I$ : Factor de intensidad de tensiones.

De esta forma se obtiene para el modelo de la mecánica de fractura lineal elástica:

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \cdot f(\lambda) = 10 \text{ MPa} \cdot \sqrt{\pi \cdot 0,02} \cdot 1,37 = 3,43 \text{ MPa} \cdot \sqrt{\text{mm}} \quad (2)$$

El valor del factor de intensidad de tensiones para el Modo I de apertura calculado con los modelos numéricos converge a un valor de  $K_I = 3,39 \text{ MPa} \cdot \text{mm}^{1/2}$  por lo que se observa una muy buena correspondencia con los resultados de la MFLE.

#### 4 MODELO NUMÉRICO DEL MÓDULO DE LA PRESA

En la construcción del módulo de la presa fueron utilizados dos tipos de hormigones diferentes. Los parámetros mecánicos utilizados en los modelos de la sección horizontal estudiada fueron obtenidos a partir de los ensayos realizados durante la obra. Se midieron: la resistencia a compresión, la resistencia a tracción y el módulo de elasticidad. A los valores obtenidos de los ensayos se les realizaron regresiones para obtener las expresiones de la resistencia a compresión en función de la resistencia a tracción Ec. (3) y del módulo de Young en función de la resistencia a compresión Ec. (4). Para la relación de Poisson se adoptó el valor propuesto en (Rocco, 2011) de  $\nu = 0,20$ .

$$\sigma_{comp} = 0.755 + 9.143 \sigma_{trac} \text{ [MPa]} \quad (3)$$

$$E = 7457 \cdot \sigma_{comp}^{0.42} \text{ [MPa]} \quad (4)$$

Teniendo en cuenta los tamaños máximos de agregado en la dosificación de los hormigones y del valor de la resistencia del hormigón, se obtuvo la energía específica de fractura utilizando las curvas del (Código modelo CBE-FIB, 1990). Los parámetros de

caracterización de los hormigones se muestran en la [Tabla 1](#).

	Hormigón Tipo	
	4,5/90	12/90
$\sigma_{\text{COMP}}$ (MPa)	13,90	22,40
$\sigma_{\text{TRACC}}$ (MPa)	1,44	2,37
E (Mpa)	22523,21	27521,26
$\nu$	0,20	0,20
$G_{\text{IC}}$ (N/mm)	0,21	0,28
$K_{\text{IC}}$ (Mpa.mm <sup>1/2</sup> )	70,98	89,16

Tabla 1: Parámetros de los hormigones utilizados.

En la [Figura 7](#) se muestra un esquema de la sección del módulo a estudiar, correspondiente a la cota 476.00 m.s.n.m. cuyas dimensiones son:  $a = 20.00\text{m}$ ,  $b = 90.20\text{m}$ ,  $c = 35.30\text{m}$ ,  $d = 4.7\text{mm}$ ,  $h_1 = 22.00\text{m}$  y  $h_2 = 12.20\text{m}$ .

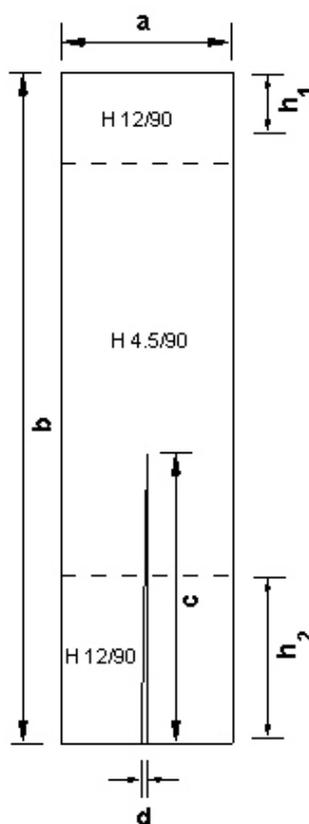


Figura 7: Esquema de la sección del módulo de la presa

Con el fin de evaluar el riesgo de propagación de fisura, se optó por utilizar en toda la sección el hormigón de menor resistencia, denominado 4.5/90, que es el material correspondiente a la zona donde se encuentra la punta de la fisura.

Los valores de los parámetros mecánicos de la resina epoxi, una vez endurecida, son: módulo de Young  $E = 6 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$  y relación de Poisson  $\nu = 0.30$ .

Los estados de carga de ocurrencia probable luego de realizada la inyección de la fisura,

consisten en la carga hidráulica del embalse y la sobrepresión que generaría la ocurrencia de un sismo.

En el caso donde se considera la fisura sin inyectar, se desprecia la pérdida de carga que ocurre por la circulación de agua en la fisura (se considera que actúa dentro de la fisura la misma presión que en el paramento de aguas arriba del módulo a la misma cota) y eficiencia nula de la cortina de drenes. La sobrepresión generada por sismo es evaluada con el modelo propuesto por Westergaard. Se considerará en los modelos la máxima presión probable que corresponde a la presión hidrostática más la sobrepresión por sismo a la correspondiente cota.

Los estados de inyección de la fisura a considerar en los modelos son: fisura sin inyectar (con presión interna igual a la del paramento), fisura llena de resina con adherencia total a las paredes, fisura llena de resina pero sin adherencia a las paredes, fisura parcialmente llena de resina y con adherencia a una sola de las paredes de la fisura (con presión interna igual a la del paramento). En todos los casos se busca evaluar la estabilidad a la propagación de la fisura por acción de la presión del embalse y la presencia nula, parcial o total de resina dentro de la fisura.

El tipo, tamaño y distribución de los elementos utilizados en los modelos es función de la geometría, los parámetros a evaluar y las hipótesis a cumplir de acuerdo a las teorías utilizadas para el análisis. En función de esto, los elementos utilizados deben ser deformación plana, cuadrilaterales alrededor de la punta de la fisura y triangulares en el resto del modelo. Buscando optimizar el proceso de cálculo, se realizó un mallado diferencial alrededor de la fisura para diferenciar las zonas con distintos tipos de elementos y efectuar transiciones que lleven a una optimización de la malla. La Figura 8 muestra la zonificación de la malla alrededor de la fisura. Los elementos cuadriláteros son denominados “CPE4R” y los elementos triangulares “CPE3” (Abaqus, 1998).

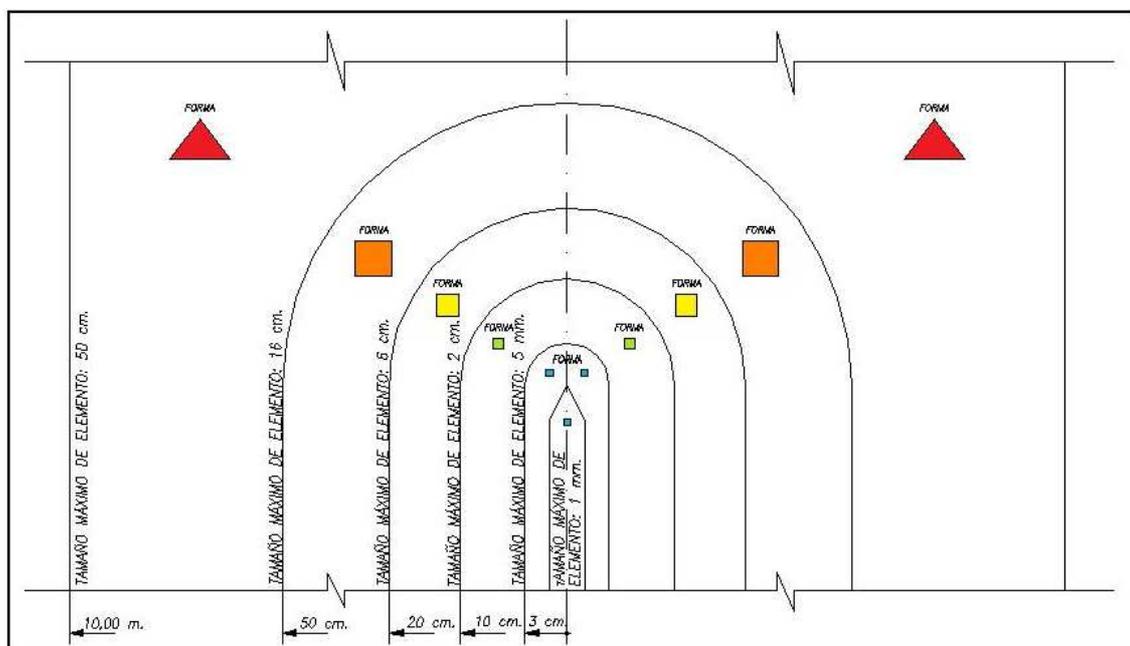


Figura 8: Zonificación de la malla alrededor de la fisura.

#### 4.1 Caso 1. Fisura sin inyectar:

Este modelo representa la condición de la fisura abierta sin inyectar. Se considera que la misma se encuentra llena de agua y sometida a la presión generada por la carga del embalse mas la sobrepresión por sismo de acuerdo a la teoría de Westergaard (despreciando el efecto de las pérdidas de carga dentro de la fisura y que la eficiencia de la cortina de drenes es nula). La Figura 9 muestra al modelo con sus condiciones de borde y las cargas aplicadas. La magnitud de la carga considerada es de 1,438 MPa.

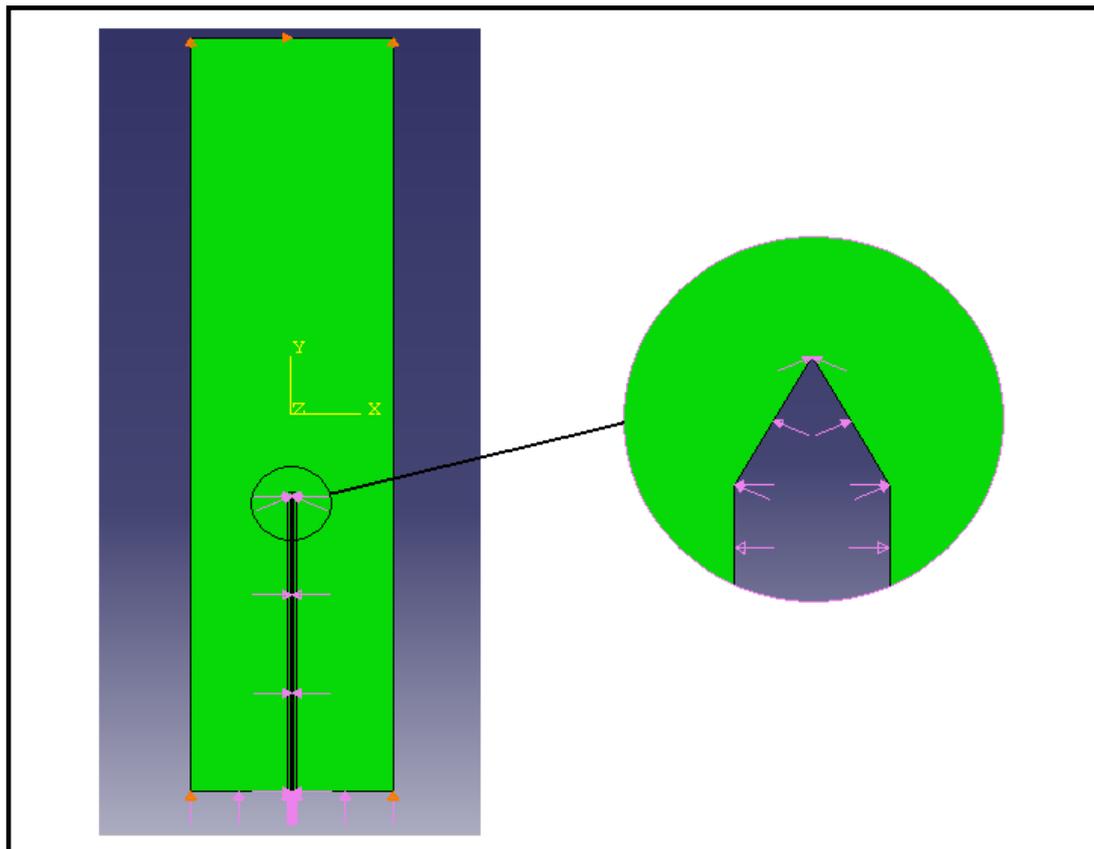


Figura 9: Geometría, cargas y condiciones de borde para el caso 1.

En la Figura 10 se muestran los valores del Factor de Intensidad de Tensiones  $K_I$  cuando la fisura está sin inyectar con resina (Caso 1), en función del número de integrales de contorno. Se puede observar que los valores convergen rápidamente a un valor de  $19,20 \text{ MPa} \cdot \text{mm}^{1/2}$ .

Comparando el valor de  $K_I$  obtenido ( $19,20 \text{ MPa} \cdot \text{mm}^{1/2}$ ), con el valor de  $K_{IC}$  del hormigón 4,5/90 que es de  $70,98 \text{ MPa} \cdot \text{mm}^{1/2}$  se concluye que la fisura es estable en la condición sin inyectar, aun considerando condiciones altamente desfavorables (eficiencia nula del sistema de drenaje, no existencia de pérdida de carga en el interior de la fisura y sobrepresión hidrostática generada por un sismo).

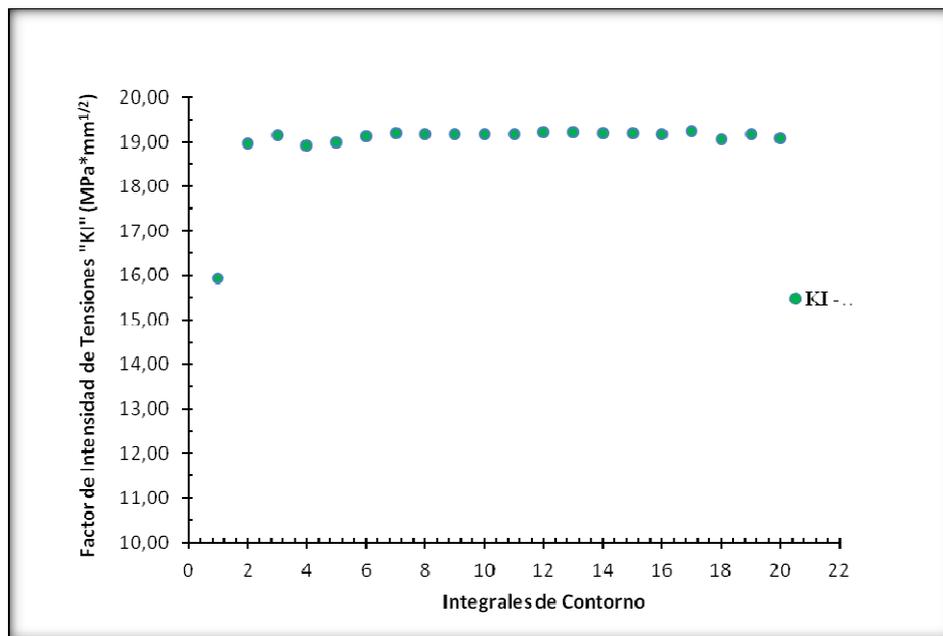


Figura 10: Valores de  $K_I$  en función de la cantidad de Integrales de Contorno evaluadas para el caso 1.

#### 4.2 Caso 2. Fisura parcialmente inyectada:

Este modelo representa la condición de fisura inyectada parcialmente. Se considera que luego del proceso de inyección, la fisura no se ha llenado completamente con resina epoxi y por lo tanto existe una abertura de dimensión mucho menor a la inicial por la cual ingresa agua. Al igual que en el Caso 1 el agua existente en el interior de la fisura posee la presión del embalse en el nivel considerado. La magnitud de la carga considerada es de 1,438 MPa. La Figura 11 muestra el modelo con las condiciones de borde aplicadas y las cargas consideradas.

En la Figura 12 se muestran los valores del Factor de Intensidad de Tensiones  $K_I$  del Caso 2, obtenido para las distintas integrales de contorno. Si bien se puede observar un comportamiento asintótico de  $K_I$  en torno a un valor de 9,40 MPa\*mm<sup>1/2</sup>, los modelos obtenidos presentan diferente comportamiento que los obtenidos en el Caso 1. Se requieren mayor cantidad de integrales de contorno para lograr la estabilidad del resultado.

Comparando el valor obtenido para el Factor de Intensidad de Tensiones,  $K_I = 9,40$  MPa\*mm<sup>1/2</sup>, con el valor obtenido en el caso 1,  $K_I = 19,20$  MPa\*mm<sup>1/2</sup>, se puede concluir que aún con un proceso de inyección deficiente la estabilidad de la fisura mejora considerablemente.

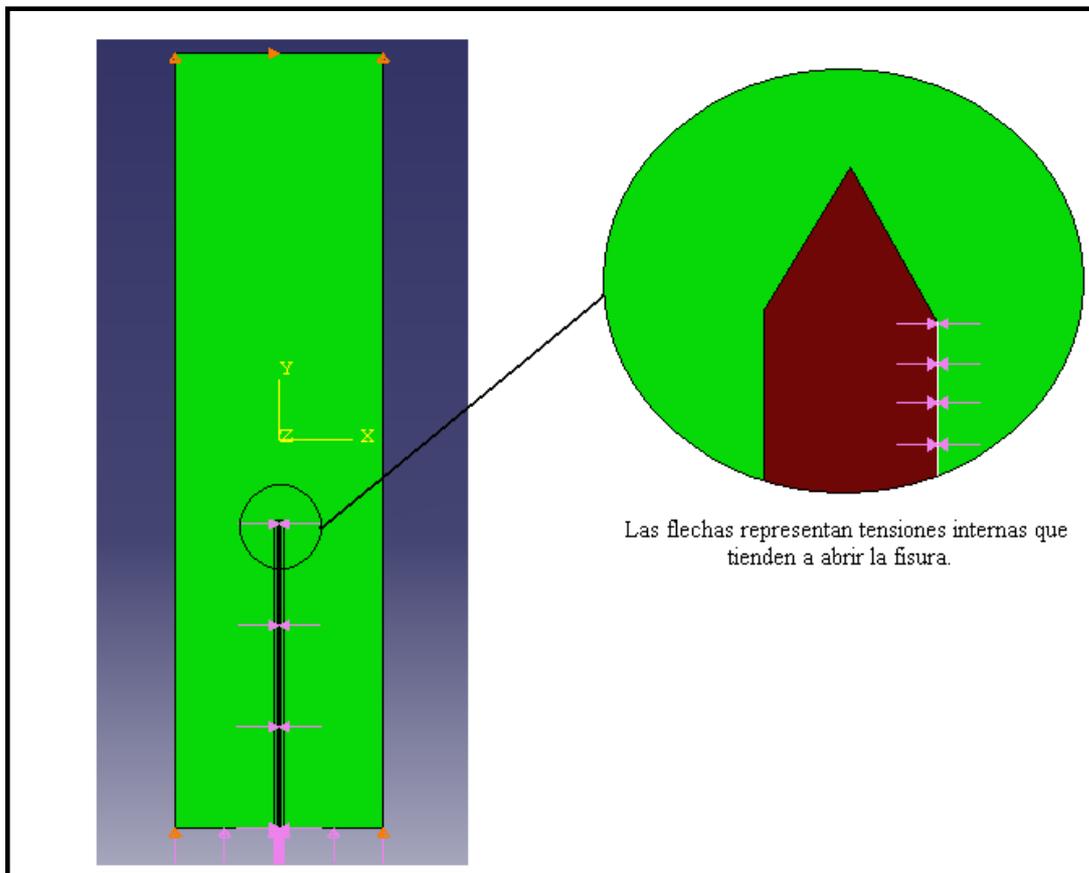


Figura 11: Geometría, cargas y condiciones de borde para el caso 1.

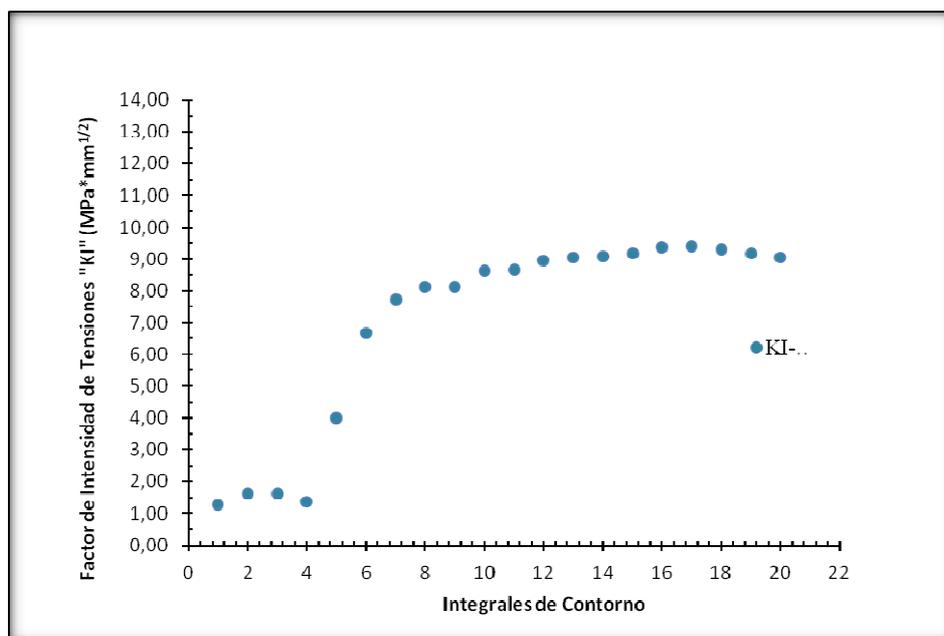


Figura 12: Valores de KI en función de la cantidad de Integrales de Contorno evaluadas para el caso 2.

### 4.3 Caso 3. Fisura totalmente inyectada, sin adherencia:

Este modelo representa la condición de fisura inyectada completamente, sin adherencia entre la resina y el hormigón. Se considera que la resina rellenó a la fisura pero que al no existir adherencia solo se establece un contacto entre las 2 partes. Se supone una interacción de contacto sin fricción entre la resina y el hormigón (la presencia de una película de agua entre ambos materiales actúa como lubricante), por lo que el deslizamiento entre ellos es libre.

La carga se considera actuando en el paramento de la presa, tanto sobre el hormigón como sobre la resina. La no existencia de un vínculo entre los dos materiales se establece para simular el posible deslizamiento de la cuña de resina dentro del hormigón y evaluar su influencia en punta de la fisura. La magnitud de la carga considerada es de 1,438 MPa.

La Figura 13 muestra la geometría del modelo con las condiciones de borde aplicadas y las cargas consideradas.

En la Figura 14 se muestran los valores del Factor de Intensidad de Tensiones  $K_I$  del Caso 3, al ser evaluadas las integrales en distintos grupos de elementos. Se observa una rápida convergencia de  $K_I$  hacia valores negativos de magnitud  $0,65 \text{ MPa} \cdot \text{mm}^{1/2}$ . Estos resultados se deben a la presencia de una zona en la punta de la fisura con tensiones de compresión, las cuales tienden a cerrar la fisura. El proceso de inyección representado por el Caso 3 es altamente eficiente respecto a la colmatación de la fisura pero no se verifica adherencia entre la resina y el hormigón. Bajo estas condiciones, al aplicarse la carga del embalse sobre la fisura y el paramento, se verifica que la fisura no tiende a propagarse.

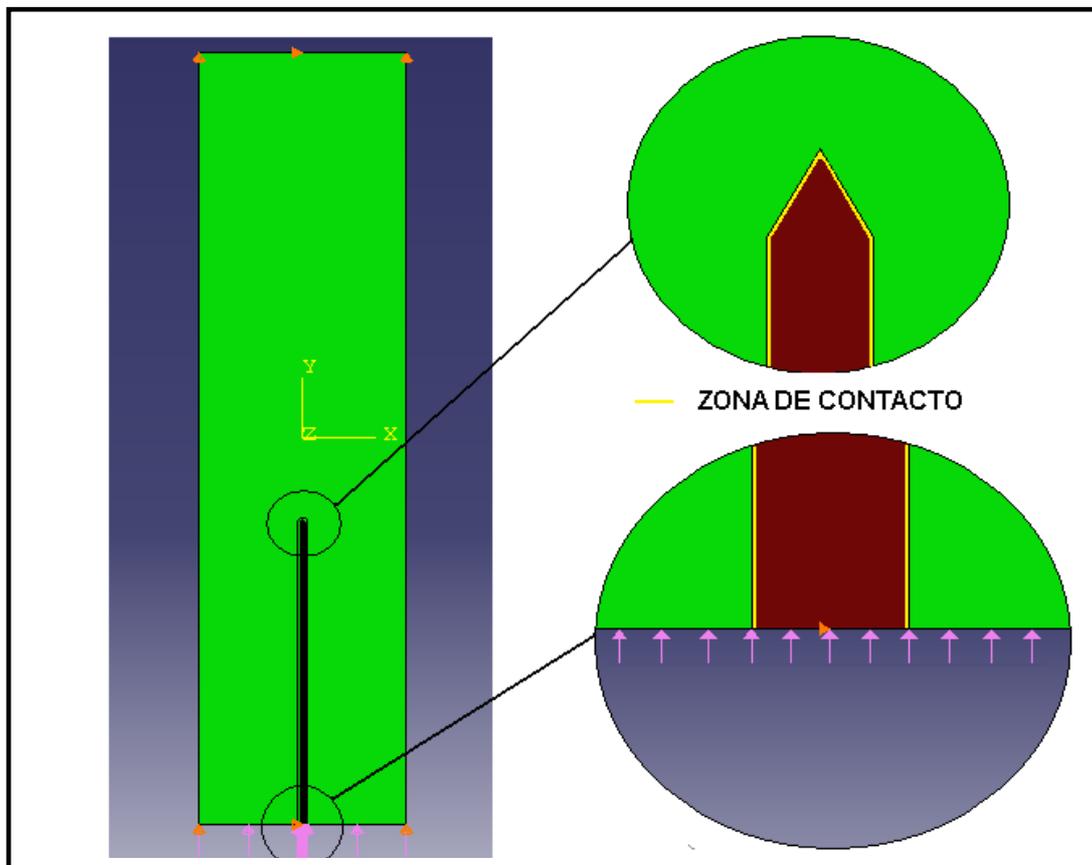


Figura 13: Valores de  $K_I$  en función de la cantidad de Integrales de Contorno evaluadas para el caso 3.

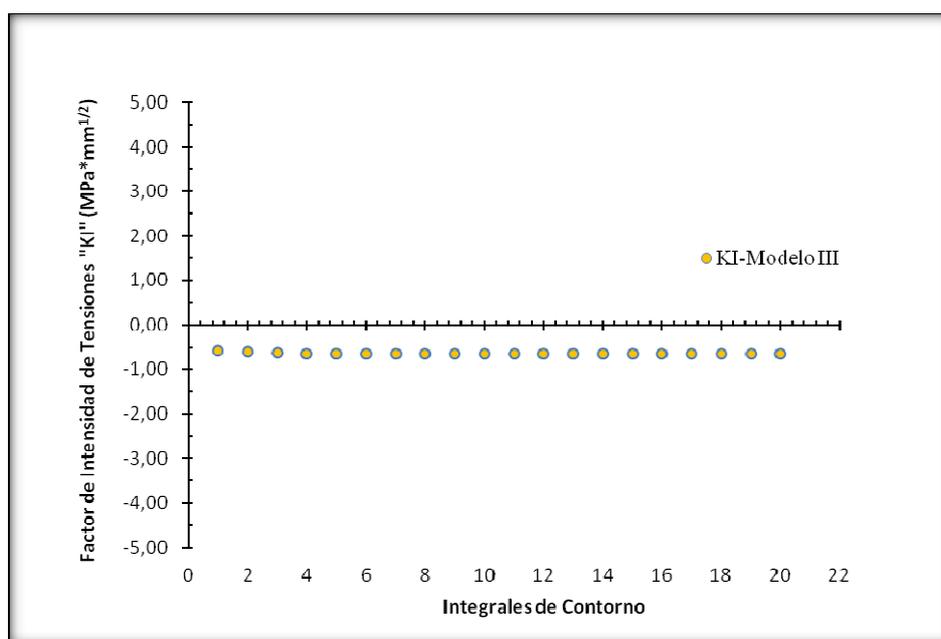


Figura 14: Valores de  $K_I$  en función de la cantidad de Integrales de Contorno evaluadas para el caso 3.

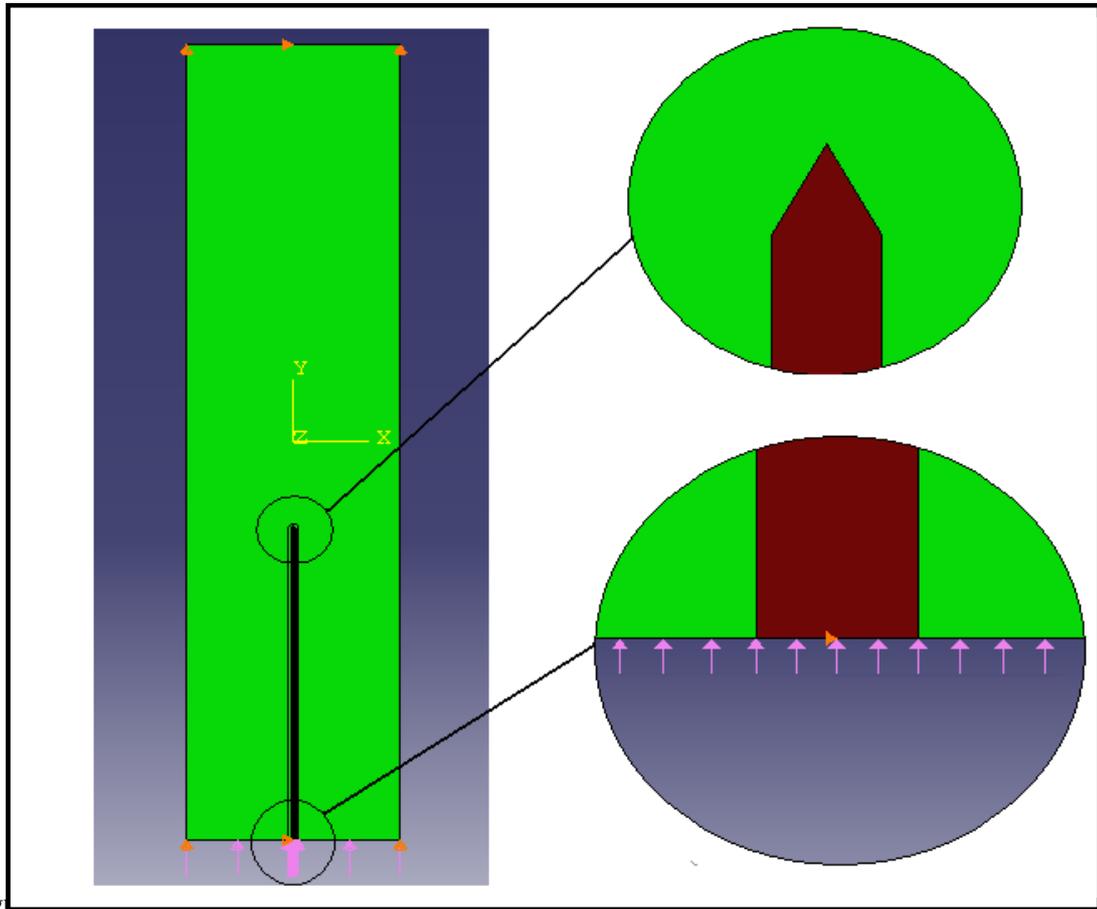
#### 4.4 Caso 4. Fisura totalmente inyectada con adherencia total:

Este modelo representa la condición de fisura inyectada completamente, con adherencia perfecta entre la resina y el hormigón. En este caso se considera que se ha restablecido la condición de monolitismo del módulo, existente previo a la fisuración. La carga aplicada en el paramento de la presa actúa tanto sobre el hormigón como sobre la resina y tiene el mismo valor que en los casos previos.

En la [Figura 15](#) se presentan la geometría, condición de carga y las condiciones de borde del Caso 4. La magnitud de la carga considerada es de 1,438 MPa.

En la [Figura 16](#) se muestran los valores del Factor de Intensidad de Tensiones  $K_I$  del Caso 4, calculados con distinta cantidad de integrales de contorno. Se observan valores de  $K_I$  muy cercanos a cero, con una leve tendencia hacia valores negativos de magnitud despreciable. Esto se debe a que el campo de tensiones en la zona de la punta de la fisura es de compresión y de magnitud muy baja.

Con esto se puede concluir que cuando el proceso de inyección es óptimo, es decir que la fisura se inyecta completamente y además se logra una perfecta adherencia entre la resina y el hormigón, se restablecen las condiciones originales de monolitismo en el módulo de la presa y se controla la probabilidad de propagación de la fisura.



Fig

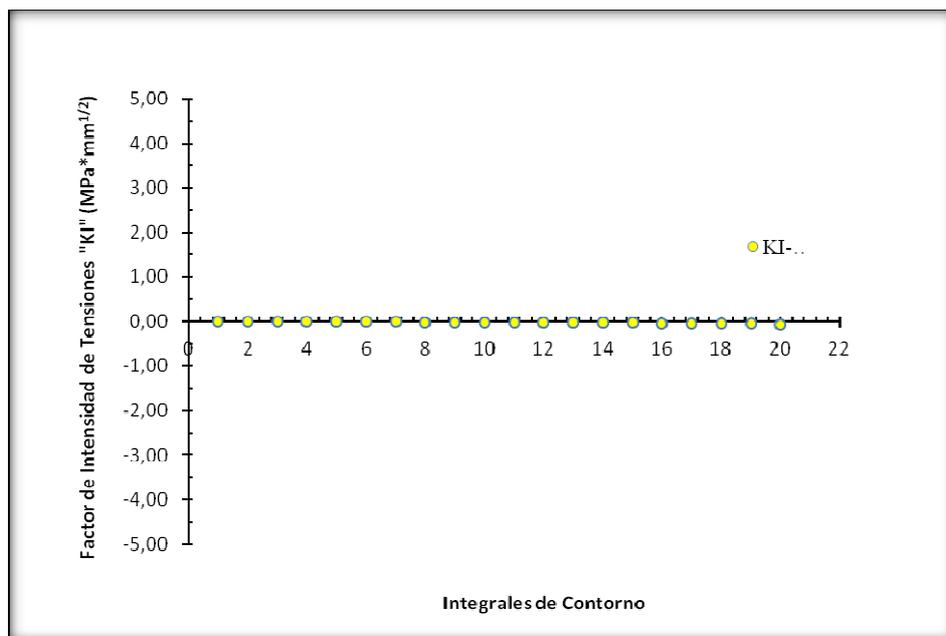


Figura 16: Valores de KI en función de la cantidad de Integrales de Contorno evaluadas para el caso 4.

## 5 CONCLUSIONES

La inyección de las fisuras generadas por contracción térmica del hormigón en los módulos de la presa mejora considerablemente el comportamiento de la estructura frente a la propagación de las fisuras. Aun considerando la posibilidad de que el proceso de inyección sea deficiente, ya sea por una inyección incompleta de la fisura ó por falta de adherencia entre los materiales, la mejora en el coeficiente de seguridad es significativa.

Debe considerarse además que la inyección de las fisuras evita la continua circulación de agua en el interior de las fisuras, deteniendo el proceso de lixiviación que deteriora al hormigón. Por otro lado al evitar el ingreso de agua a las galerías de inspección de la presa se alivia el sistema de bombeo destinado a la evacuación del agua, mejorando además las condiciones para el proceso de auscultación.

## 6 REFERENCIAS

ACI Committee 224, Control of Cracking in Concrete Structures (ACI 224R-01), American Concrete Intitute, 2001

Anefhop, ICCE, IECA, “Código Modelo CBE-FIP 1990 para hormigón estructural”, 1995.

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

Giovambattista, Alberto. “Informe 1 – 07. Rev04.” Informe Técnico - Hidroeléctrica Piedra del Águila. 2007.

Rocco Claudio G., Braun Matias N., Zappitelli María P., Villa Edgardo I., “Estabilidad de fisuras en presas de hormigón frente a la acción de presiones internas”, Mecánica Computacional, Vol XXX, 127-139, 2011

Hibbit, Karlson & Sorensen, “Abaqus / CAE User’s manual versión 6.6-4”, 1998.

Hibbit, Karlson & Sorensen, “Abaqus / Analysis User’s manual versión 6.6-4 – Volumen I, II & III”. 1998.

Gregotti Alberto, Pernich Adriana, “Análisis de estabilidad de fisura en el hormigón de la presa del Aprovechamiento Hidroeléctrico Piedra del Águila”, 2012.