



BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

AND

UNIVERSIDAD DE OVIEDO

***EVALUACIÓN MODELO DE LAS PROPIEDADES DE  
FRACTURA DEL C50/60 MEDIANTE EL  
EXPERIMENTO DEL DISCO BRASILEÑO***

***– RESUMEN EN ESPAÑOL –***

TRABAJO FIN DE GRADO

AUTOR

D. Alejandro Parcerro Alonso

SUPERVISOR

Profesor Stanislav Seitl

SUPERVISOR ESPECIALISTA: Ingeniero Petr Miarka

BRNO, REPÚBLICA CHECA, MAYO 2018

INDICE

<b>1. INTRODUCCION Y OBJETIVO.....</b>	<b>3</b>
<b>2.FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....</b>	<b>4</b>
2.1. CARACTERÍSTICAS DEL HORMIGON .....	4
2.1.1. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES COMPUESTOS.....	4
2.1.2. CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS.....	4
2.2. MECÁNICA DE LA FRACTURA .....	5
2.2.1. INTRODUCCIÓN .....	5
2.2.2. FRACTURA FRÁGIL .....	5
2.2.3. TEORÍA DE GRIFFITH.....	5
2.2.4. FACTOR DE INTENSIDAD DE TENSIÓN .....	6
2.2.5. PLASTICIDAD EN LA PUNTA DE LA GRIETA .....	7
2.2.6. TENSIÓN T.....	7
2.3. EXPERIMENTO DEL DISCO BRASILEÑO.....	8
2.3.1. INTRODUCCIÓN .....	8
2.3.2. DESCRIPCIÓN DEL TEST.....	8
<b>3. MODELADO NUMÉRICO EN ANSYS .....</b>	<b>9</b>
3.1. GEOMETRÍA .....	9
3.2. MODELADO .....	9
<b>4. RESULTADOS OBTENIDOS .....</b>	<b>10</b>
4.1. FACTORES DE INTENSIDAD DE TENSIÓN .....	10
4.2. CURVAS DE CALIBRACIÓN .....	10
<b>5. RESULTADOS EXPERIMENTALES.....</b>	<b>12</b>
5.1. CURVAS DE CALIBRACIÓN PARA EL EXPERIMENTO .....	12
5.2. RESULTADOS OBTENIDOS DE MANERA EXPERIMENTAL .....	13
<b>6. COMPARACIÓN CON DIVERSOS MODELOS .....</b>	<b>14</b>
6.1. COMPARACIÓN CON LA TESIS DE MARÍA VILLANUEVA .....	14
6.2. COMPARACIÓN CON LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	15
6.3. COMPARACIÓN CON LOS RESULTADOS DE M. R. AYATOLLAHI Y M. R. M. ALIHA .....	16
<b>7. CONCLUSIONES.....</b>	<b>17</b>

## 1. INTRODUCCION Y OBJETIVO

El uso del hormigón como material de construcción se debe al gran número de ventajas y propiedades que tiene, como pueden ser la resistencia a la corrosión y al envejecimiento. Debido a su naturaleza de material compuesto, el hormigón posee una gran variedad de aplicaciones.

Sin embargo, este material no responde de manera correcta a esfuerzos de tracción, debido a su base frágil. En este tipo de compuestos, que tienen a fragilizar, es esencial conocer el estado tensional en las cercanías de la grieta presenta en el espécimen con el objetivo de deducir el comportamiento que tendrá la grieta y en qué dirección crecerá. Existen en la actualidad diferentes experimentos que permiten llevar a cabo esta investigación.

La gran mayoría de estructuras que se encuentran en nuestro entorno están sometidas no solo a un modo de carga determinado, si no a un modo mixto I/II de carga (modo biaxial), lo que significa que la estructura está sometida a dos diferentes tipos de carga.

El experimento del Disco Brasileño es usado de forma notoria para obtener los valores de los factores de intensidad de tensión para diferentes casos. Además, este examen permite a los ingenieros conocer la resistencia de un tipo de hormigón con facilidad. A este experimento también se le conoce como test de tensión indirecta.

Por otro lado, el objetivo de este proyecto ha sido el estudio del mecanismo de iniciación y propagación de una grieta situada en la mitad del espécimen.

La probeta ha sido sometida a dos fuerzas de compresión simétricamente opuestas respecto del diámetro hasta el fallo. Los resultados fueron estudiados de manera experimental y de manera simulada con el software de elementos finitos ANSYS para después compararlos con los resultados obtenidos por diferentes profesionales mediante el uso de unas curvas de calibración.

## 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 2.1. CARACTERÍSTICAS DEL HORMIGÓN

#### 2.1.1. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES COMPUESTOS

Como bien es sabido, el hormigón es un material compuesto creado de la unión de diversos materiales en los que el compuesto principal o aglutinante, es el cemento, un material cerámico. Debido a esto, el hormigón es considerado un material compuesto de matriz cerámica.

Es un material creado para mejorar las propiedades del cemento y, gracias a ello, es considerado uno de los materiales más utilizados en la construcción. Las propiedades pertenecientes al hormigón y que lo caracterizan de esta manera es debido al hecho de que la fase matriz del compuesto global es un material cerámico, como es el cemento, y debido a ello, este material adquiere ciertas características. La resistencia a la compresión es una característica muy importante del hormigón ya que permite crear estructuras muy duraderas en el tiempo.

#### *CARACTERÍSTICAS CERÁMICAS DEL CEMENTO*

Los materiales cerámicos están caracterizados por su fragilidad y su dureza. Por un lado, la dureza se explica debido a que los enlaces atómicos que componen estos materiales son muy difíciles de romper y son un oponente muy duro para el movimiento de las dislocaciones. Estas dislocaciones permiten el movimiento de la deformación plástica, por ello, en estos materiales, al ser esta deformación casi cero, son materiales muy duros.

De otra manera, la fragilidad de estos materiales se debe a la existencia de imperfecciones superficiales e interiores que, al crecer y convertirse en grietas, pueden provocar el colapso de la estructura. El crecimiento de las grietas se lleva a cabo debido a que este tipo de imperfecciones, cuando se encuentran orientadas en un plano normal respecto del eje de carga, crecen en una dirección normal induciendo el mecanismo de fractura.

#### 2.1.2. CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS

La resistencia a la tracción de los materiales cerámicos es muy baja comparada con los materiales metálicos, debido a la existencia de grietas:

$$\sigma = \frac{K_{Ic}}{C\sqrt{\pi a}} \quad (1)$$

donde

$\sigma$  es la presión aplicada,

$K_{Ic}$  es la tenacidad a la fractura,

$C$  es una constante que depende de la geometría de la probeta,

$a$  es la longitud de la grieta.

## 2.2. MECÁNICA DE LA FRACTURA

### 2.2.1. INTRODUCCIÓN

La fractura y, en general, las estructuras que pueden llegar a colapsar, han sido un problema muy importante para la sociedad. Desde una vista atómica, la fractura de un material ocurre cuando la tensión aplicada a un nivel atómico es suficiente para romper los enlaces atómicos que mantienen a los átomos juntos.

### 2.2.2. FRACTURA FRÁGIL

Es posible diferenciar entre fractura frágil y fractura dúctil. Debido a las propiedades del hormigón, este tipo de estructuras sufren lo que se denomina fractura frágil.

La fractura dúctil se caracteriza por la existencia de deformación plástica antes del fallo de la estructura, que se sitúa en una zona muy distorsionada.

### 2.2.3. TEORÍA DE GRIFFITH

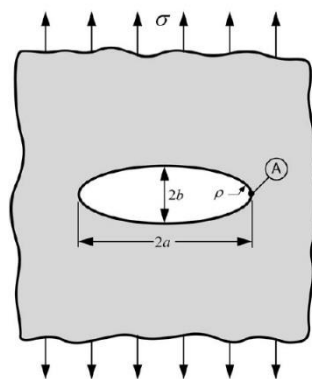
La teoría de Griffith trata de la pequeña resistencia que existe en los sólidos frágiles y que son producidos debido a la existencia de grietas superficiales e internas. Estas grietas se crean a partir de los procesos de fabricación del hormigón.

Años después, Inglis publicó que la presencia de una grieta puede inducir la concentración de tensiones en las cercanías de dicha grieta y que pueden ser mayores que la que se aplica. La fractura tiene lugar cuando esta tensión sobrepasa la resistencia del material.

$$\sigma_A = \sigma \left( 1 + \frac{2a}{b} \right) \quad (2)$$

donde

$\sigma_A$  es la tensión localizada en el extremo de la grieta  $A$ ,  
 $\sigma$  es la tensión aplicada,  
 $a$  y  $b$  son los dos ejes de la elipse cuya forma tiene la grieta.

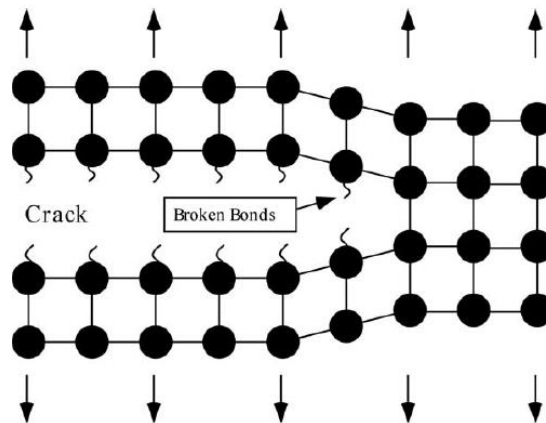


Cuando la tensión localizada alcanza un valor crítico de la tensión, ello desemboca en la siguiente ecuación:

$$\sigma_f = \left( \frac{E\gamma_s}{4a} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

donde

$\sigma_f$  es la tensión remota en el fallo,  
 $E$  es el módulo de Young,  
 $\gamma_s$  es la energía de superficie por unidad de área.

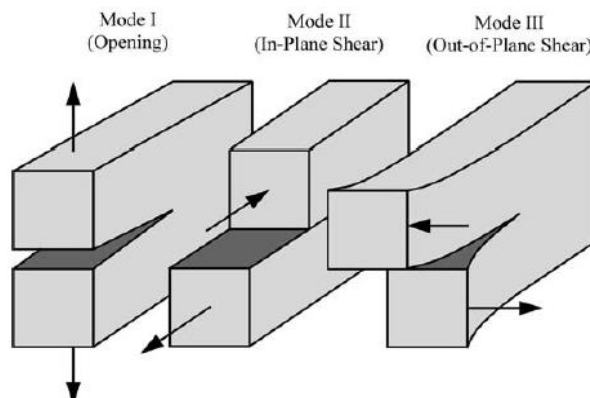


#### 2.2.4. FACTOR DE INTENSIDAD DE TENSIÓN

Existen tres modos diferentes de carga que se pueden aplicar a cualquier sólido agrietado de manera individual o combinada:

- Modo I: la carga principal es aplicada normal al plano de fractura (el plano de la grieta). Este modo tiene a abrir la grieta.
- Modo II: existe una carga cortante aplicada en una cara de la grieta respecto a la otra cara.
- Modo III: la carga aplicada cortante se aplica en la grieta en la dirección paralela a la cara de la grieta.

Un cuerpo agrietado puede ser sometido a cualquiera de los modos anteriores o a la combinación de dos o tres de ellos.



Una vez el factor de intensidad de tensión  $K$  es conocido, es posible resolver todos los componentes de la tensión, la deformación y el desplazamiento como función de las constantes  $r$  y  $\theta$ . Esta descripción uniparamétrica de la zona situada en las cercanías de la punta de la grieta es uno de los conceptos más importantes de la mecánica de la fractura.

El factor de intensidad de tensión  $K$  es una expresión que solo depende de la tensión aplicada  $\sigma$ , la longitud de la grieta  $a$  y de la geometría de la probeta  $C$ , como se demuestra en la expresión siguiente:

$$K = C\sigma\sqrt{\pi a} \quad (4)$$

### 2.2.5. PLASTICIDAD EN LA PUNTA DE LA GRIETA

En los materiales reales las tensiones son siempre finitas y en la punta de la grieta la resistencia del material se ve sobrepasada, y por ello se produce una deformación plástica y el material deja de ser elástico – lineal.

En los materiales cerámicos, como el hormigón, esta deformación plástica es muy pequeña y el fallo de la estructura ocurre de manera casi inmediata cuando la resistencia es sobrepasada. Es posible calcular el tamaño de esta zona plástica:

$$\sigma_{yy} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} = \sigma_{ys} \quad (5)$$

donde

$\sigma_{yy}$  es la tensión normal en un material elástico - lineal,  
 $\sigma_{ys}$  es el límite elástico del material.

Así, es posible calcular la zona plástica:

$$r_y = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{K_I}{\sigma_{ys}} \right)^2 \quad (6)$$

Donde  $r_y$  corresponde al radio de esta zona, supuestamente esférico.

### 2.2.6. TENSION T

La tensión  $T$  es un parámetro que permite a los ingenieros caracterizar el nivel de libertad y el campo de tensión y desplazamientos alrededor de la punta de la grieta. Este parámetro representa las tensiones paralelas en la línea de la grieta, únicamente en condiciones planas.

Cuando una grieta esta inclinada respecto a la acción de las cargas, entonces los factores de intensidad de tensión son suficientes para caracterizar el estado tensional y los desplazamientos, pero hay ocasiones donde este parámetro, tensión  $T$ , puede ser demasiado grande en comparación con otros y, por ello, es importante tenerlo en cuenta.

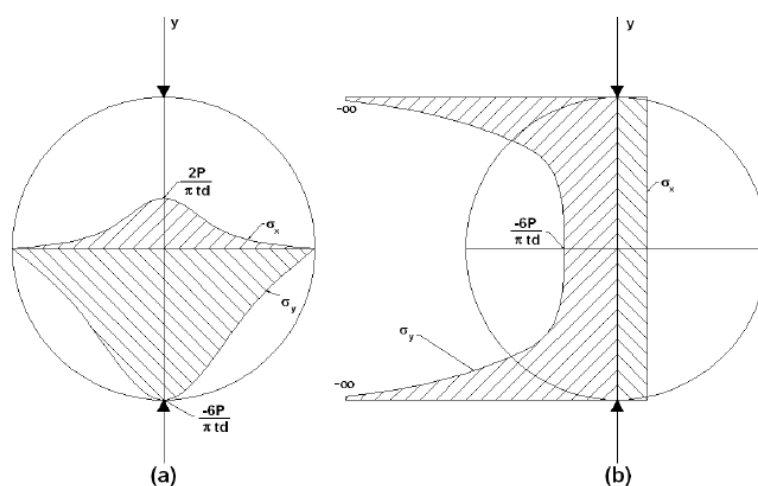
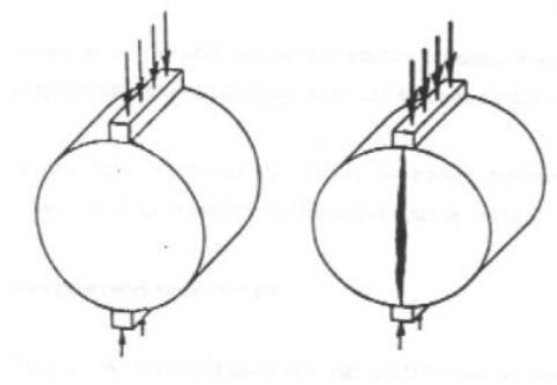
## 2.3. EXPERIMENTO DEL DISCO BRASILEÑO

### 2.3.1. INTRODUCCIÓN

Este experimento es un test de tensión indirecta, muy útil para calcular la máxima carga que puede ser aplicada a un espécimen antes del fallo.

### 2.3.2. DESCRIPCIÓN DEL TEST

Este examen consiste en la aplicación de dos cargas diametrales de compresión en una probeta de tamaño cilíndrico a lo largo de las dos generatrices opuestas hasta el fallo. Esta configuración de carga induce una distribución de carga de tracción uniforme a lo largo del diámetro del plano vertical de carga, que produce la rotura. En las siguientes imágenes se puede observar, por un lado, la aplicación de las fuerzas en la probeta y su rotura, y, por otro, la distribución de las tensiones que aparecen a lo largo del diámetro.



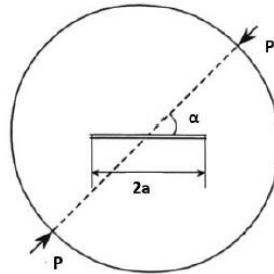


### 3. MODELADO NUMÉRICO EN ANSYS

El modelado numérico de este experimento ha sido realizado mediante el software *ANSYS*, que es un programa informático de simulación que permite a los ingenieros conocer si cierto producto va a trabajar de manera correcta bajo ciertas premisas. Este comportamiento ha sido estudiado bajo las ideas del método de los elementos finitos (*MEF*) para estructuras.

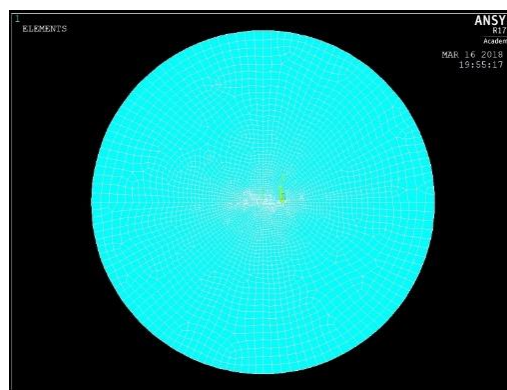
#### 3.1. GEOMETRÍA

EL disco modelado tiene las siguientes dimensiones: diámetro,  $D = 100$  mm con una relación del tamaño de la grieta en el rango  $a/R = [0.1,0.9]$  y un ángulo de dicha grieta sobre la que se aplican las fuerzas en el rango  $[0^\circ,90^\circ]$ . Variando la relación de la grieta y el ángulo es posible estudiar los factores de intensidad de tensión para diferentes tamaños de grieta.



#### 3.2. MODELADO

Para realizar el modelado de la probeta correspondiente con la geometría previamente descrita es necesario definir una serie de puntos (keypoints), líneas y áreas para posteriormente hacer el mallado y distribuir la fuerza aplicada uniformemente en cada punto o nodo del componente, tal y como se muestra en la imagen siguiente:



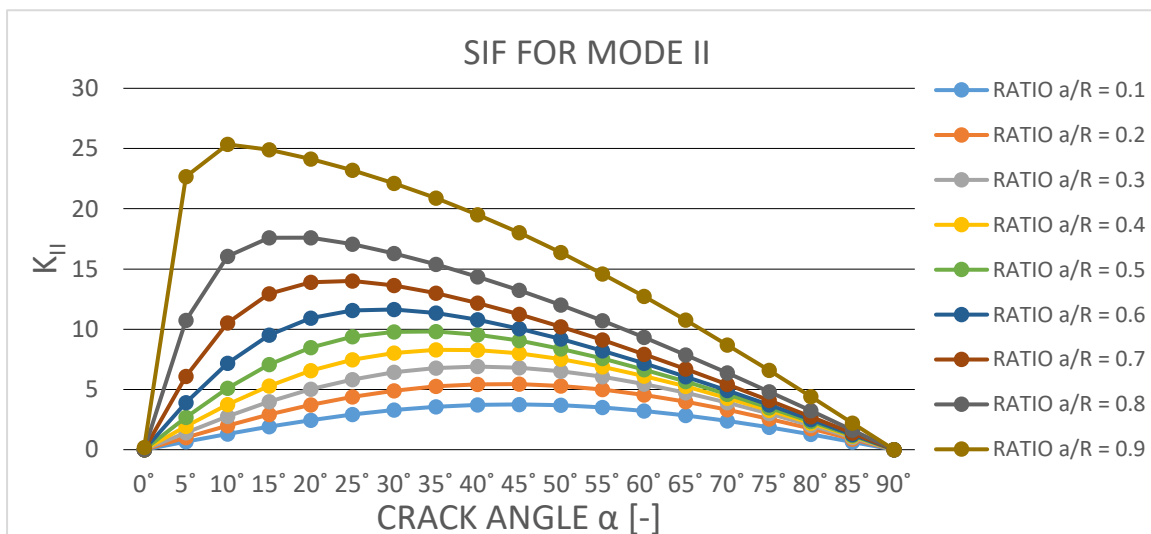
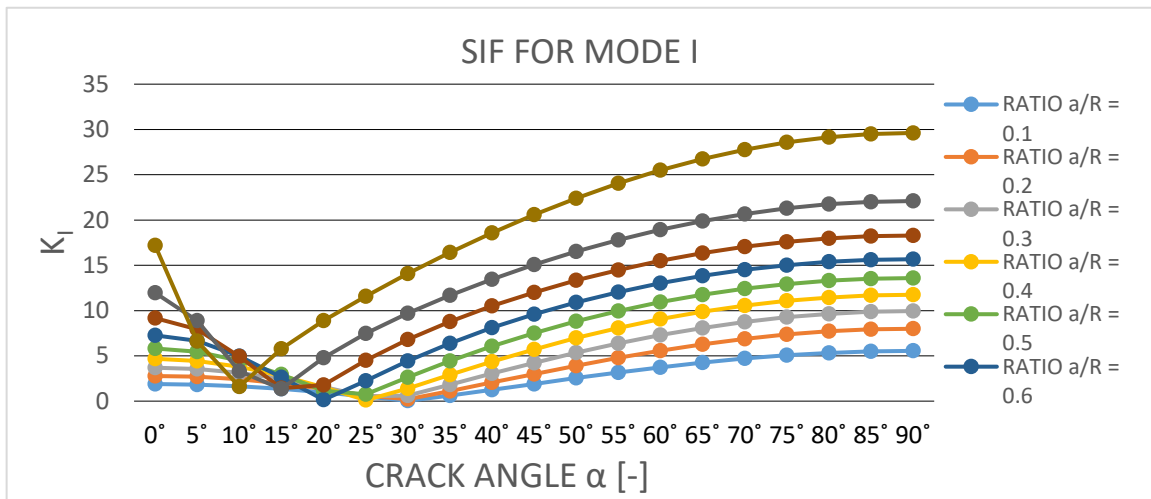
Una vez modelado el espécimen, es necesario especificar las condiciones de contorno a las que se verá sometido, como son los apoyos y las fuerzas externas.

Finalmente, la solución se obtiene especificando el patrón donde se van a calcular los factores de intensidad de tensión. Este patrón está formado por ambas superficies de la grieta, una vez separadas una respecto a la otra cuando se ha aplicado la fuerza.

## 4. RESULTADOS OBTENIDOS

A continuación, se muestran, de manera resumida, los resultados obtenidos de manera simulada de los factores de intensidad de tensión y de las curvas de calibración, utilizadas para la comparación con diversos modelos.

### 4.1. FACTORES DE INTENSIDAD DE TENSIÓN



### 4.2. CURVAS DE CALIBRACIÓN

Para el cálculo de las curvas de calibración se han utilizado las siguientes funciones, dadas por mis tutores del proyecto:

$$f_I(\alpha, a/R) = \frac{K_I RB \sqrt{\pi}}{P \sqrt{a}} \sqrt{1 - \frac{a}{R}} \quad (7)$$

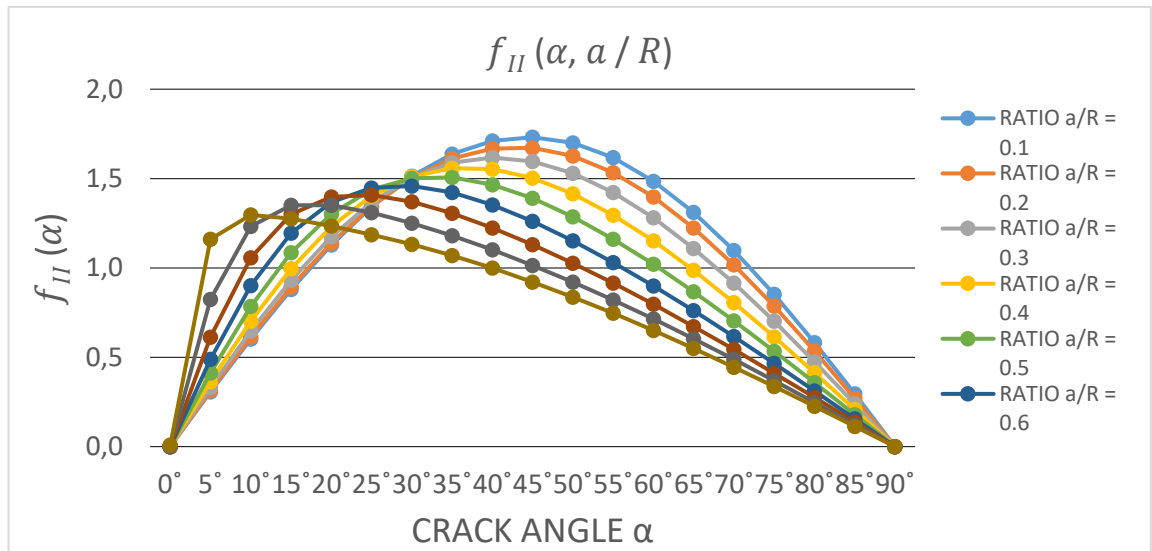
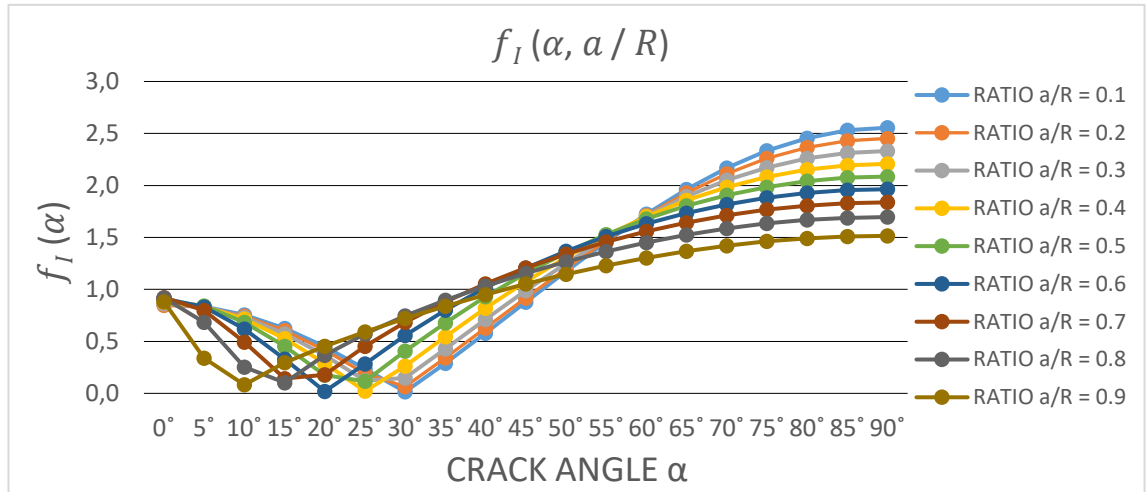
$$f_{II}(\alpha, a/R) = \frac{K_{II} RB \sqrt{\pi}}{P \sqrt{a}} \sqrt{1 - \frac{a}{R}} \quad (8)$$

donde

$K_I$  es el factor de intensidad de tensión para el modo I, obtenido de ANSYS,

$R, B, a$  son las medidas de la probeta,

$P$  es la fuerza aplicada.

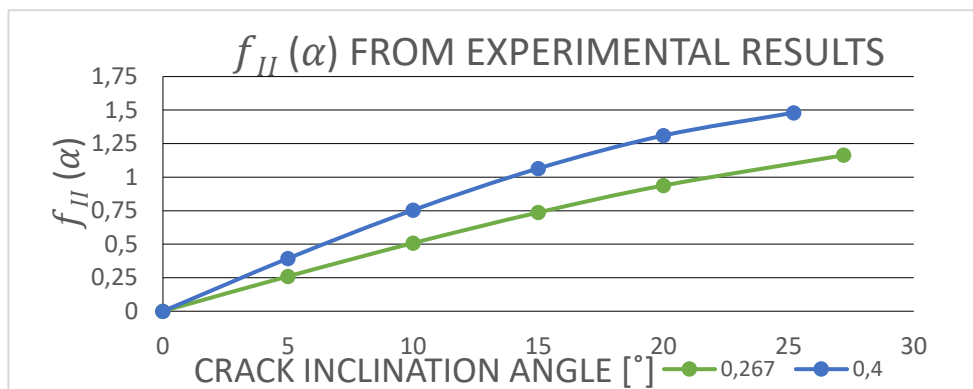
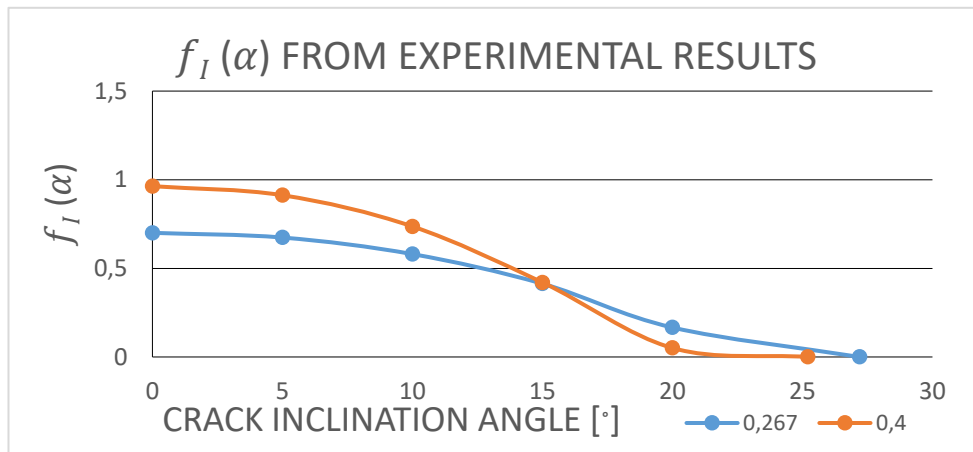


## 5. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Los resultados experimentales fueron llevados a cabo por Stanislav Seidl, Petr Miarka y Vlastimil Bílek en el laboratorio de la Facultad de Ingeniería Civil de Brno. El experimento fue desarrollado bajo la premisa de las diversas especificaciones y normas aplicables y utilizando probetas estandarizadas.

### 5.1. CURVAS DE CALIBRACIÓN PARA EL EXPERIMENTO

A partir del software de elementos finitos ANSYS se ha obtenido los valores de los factores de intensidad de tensión para ambos modos I y II. El uso de las ecuaciones anteriores permite la obtención de los valores pertinentes para las curvas de calibración para ambas relaciones de la longitud de la grieta:



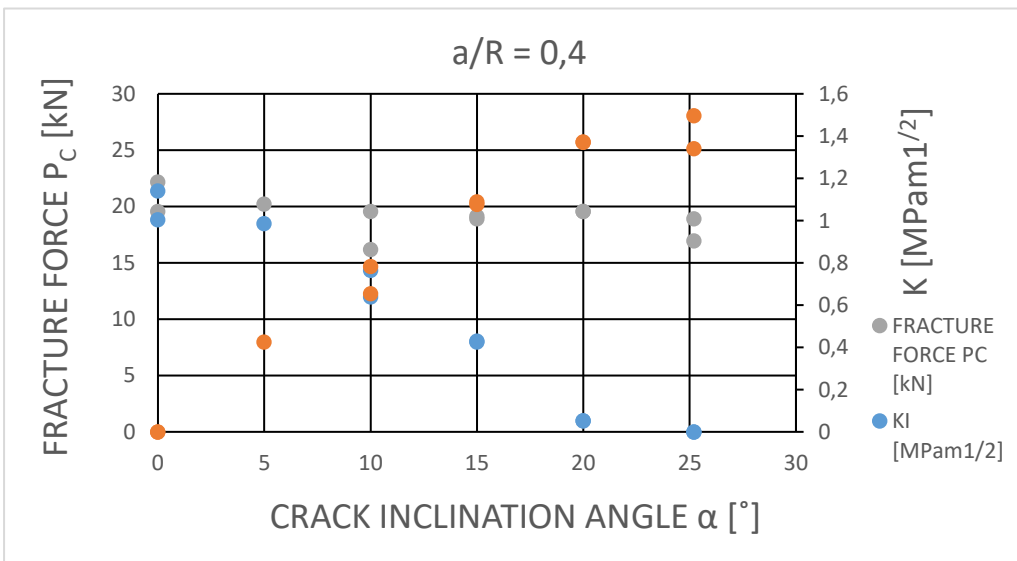
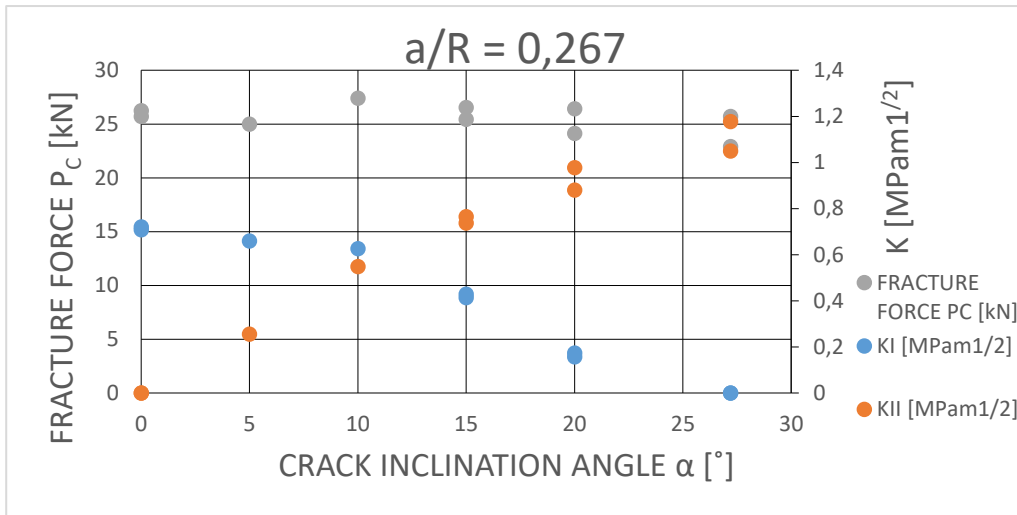
Una vez las curvas de calibración han sido obtenidas, el uso de las siguientes ecuaciones permite evaluar los factores de intensidad de tensión para diferentes probetas:

$$K_I = \frac{P\sqrt{a}}{RB\sqrt{\pi}} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{a}{R}}} Y_I(a/R, \alpha) \quad (9)$$

$$K_{II} = \frac{P\sqrt{a}}{RB\sqrt{\pi}} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{a}{R}}} Y_{II}(a/R, \alpha) \quad (10)$$

## 5.2. RESULTADOS OBTENIDOS DE MANERA EXPERIMENTAL

La carga máxima obtenida a partir de este experimento esta resumida en las siguientes gráficas para las dos relaciones de la longitud de la grieta.

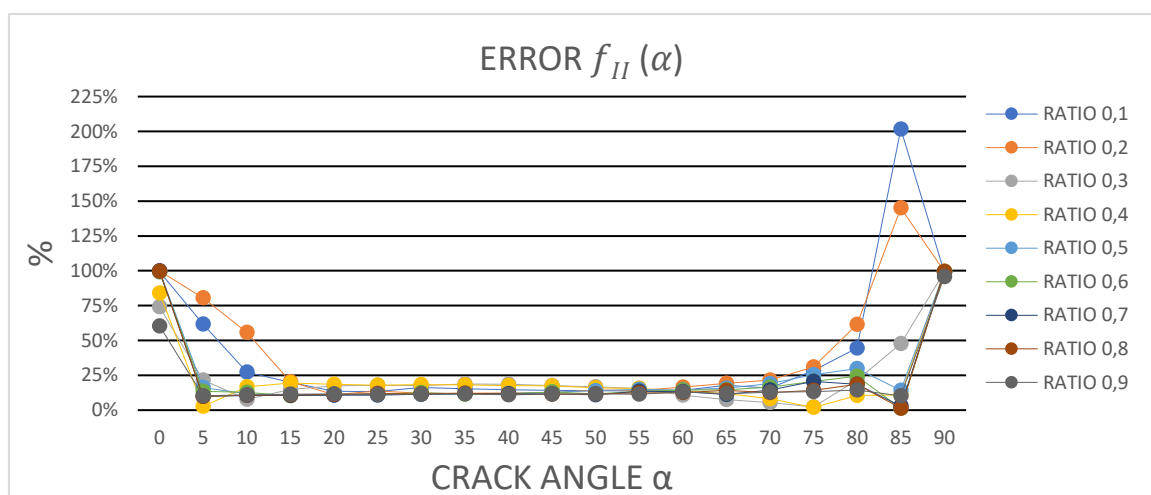
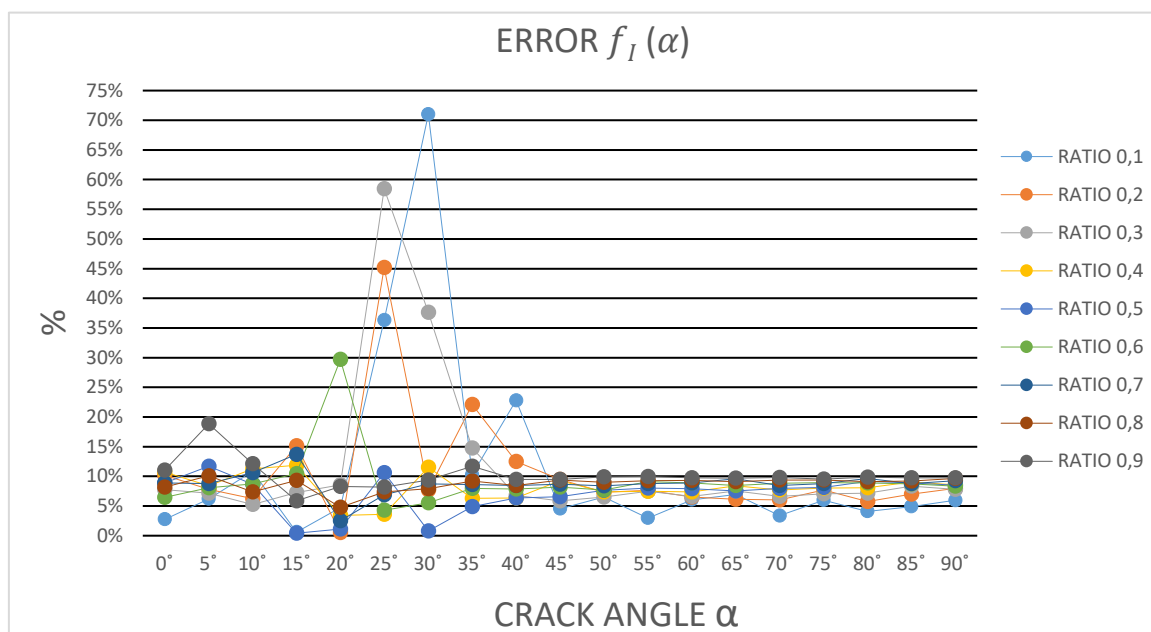


## 6. COMPARACIÓN CON DIVERSOS MODELOS

Como los resultados que he obtenido a través de ANSYS pueden no ser correctos, se han comparado con diversos modelos, con el objetivo de cuantificar la diferencia que puede existir.

### 6.1. COMPARACIÓN CON LA TESIS DE MARÍA VILLANUEVA

La primera comparación se ha hecho la tesis que María Villanueva realizó el pasado curso y en la que, como en mi caso, calculo los factores de intensidad de tensión a partir de este simulador informático para posteriormente utilizar las curvas de calibración. Los análisis de ambos enfoques se resumen en las siguientes graficas:



Puede verse que las grandes diferencias entre ambos enfoques se deben al uso por mi parte de un software externo digitalizador de gráficas que me permitió calcular los

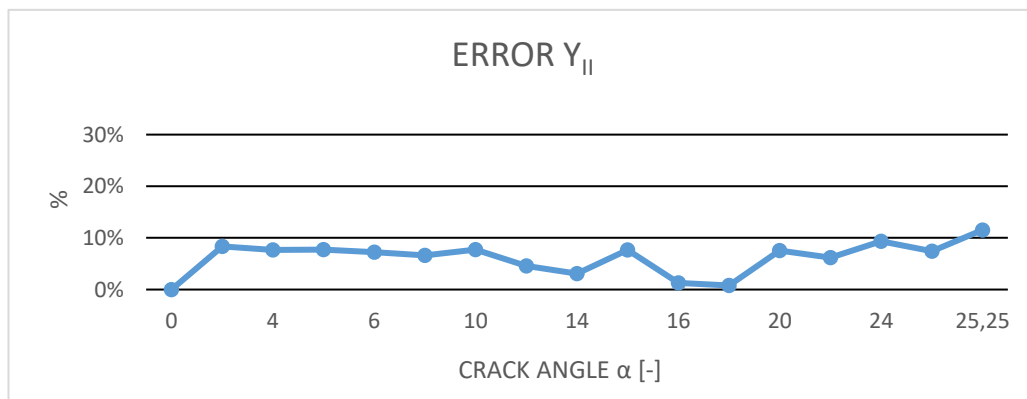
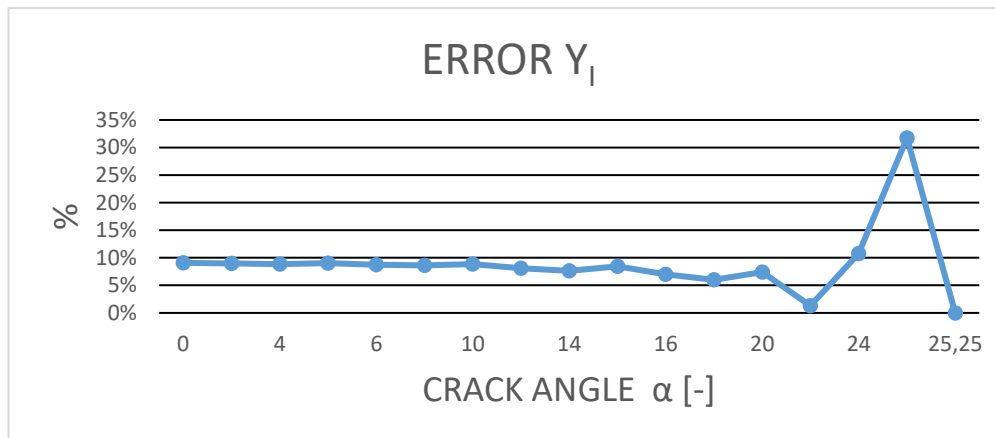
valores de los factores de intensidad tensión de una forma aproximada, al no tener en mi poder los resultados exactos.

## 6.2. COMPARACIÓN CON LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES

La comparación se realizó únicamente para para una de las dos relaciones  $a/R$  ( $a/R = 0,4$ ) debido a que en mi investigación no se tuvo en cuenta la otra relación que se estudió en mi simulación.

Como mis resultados obtenidos de ANSYS fueron hallados para ángulos en el rango  $[0^\circ, 90^\circ]$  en intervalos de  $5^\circ$ , fue necesario crear diferentes graficas a partir de las funciones de calibración para ángulos entre  $0^\circ$  y  $25^\circ$  en intervalos de  $5^\circ$  para poder ser comparados ambos enfoques.

Las gráficas siguientes muestran el error existente entre ambos estudios:



Puede verse que no hay mucha diferencia entre ambos modelos, únicamente la diferencia existente cuando se alcanzan tanto el modo puro I (cuando  $K_{II}$  es igual o muy próximo a 0) y el modo puro II ( $K_I$  igual próximo a 0).

### 6.3. COMPARACIÓN CON LOS RESULTADOS DE M. R. AYATOLLAHI Y M. R. M. ALIHA

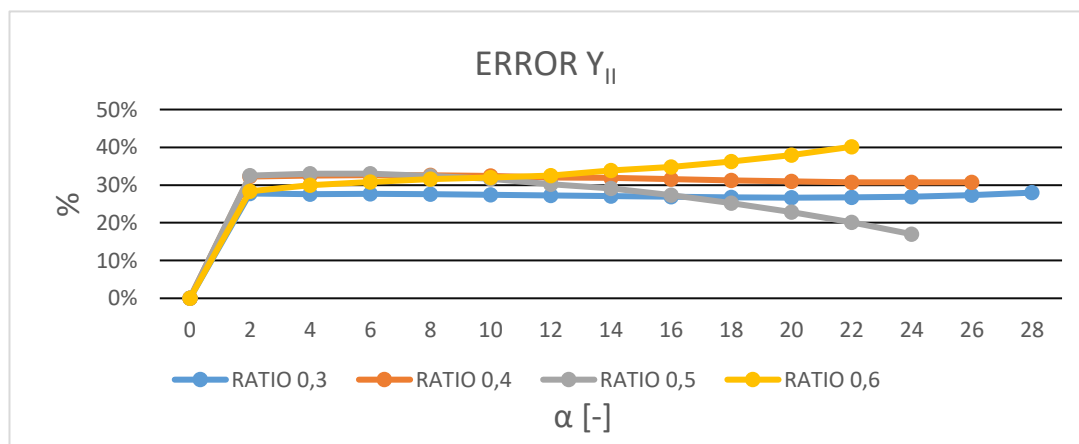
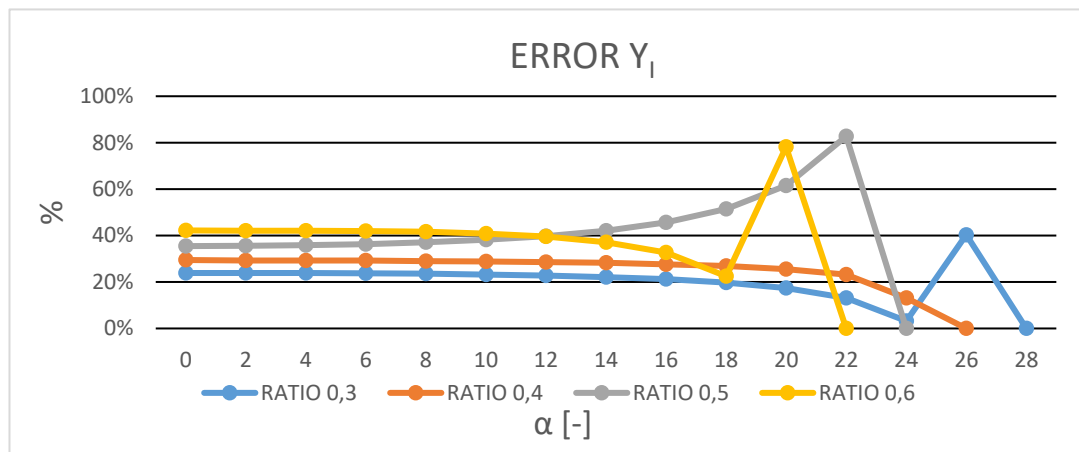
La última comparación se ha realizado con los resultados que M. R. Ayatollahi y M. R. M. Aliha, de la universidad de tecnología de Irán, obtuvieron en uno de sus artículos. Teniendo en cuenta sus valoraciones en dicho artículo, llegaron a la conclusión de utilizar las siguientes expresiones para obtener los valores de los factores de intensidad de tensión:

$$K_I = \frac{P}{RB} \sqrt{\frac{a}{\pi}} Y_I(a/R, \alpha) \quad (11)$$

$$K_{II} = \frac{P}{RB} \sqrt{\frac{a}{\pi}} Y_{II}(a/R, \alpha) \quad (12)$$

Puede comprobarse que estas ecuaciones son diferentes a las utilizadas en los enfoques anteriores (7) y (8).

Como en casos previos, ha sido necesario calcular las diferentes curvas de regresión lineal y sus ecuaciones con el objetivo de poder realizar el análisis.



Es posible ver que los valores del error oscilan en gran cantidad y además poseen valores un tanto altos. Esto es debido a que estos profesionales calcularon sus funciones de forma a partir de diversos análisis de elementos finitos. Esto significa que obtuvieron los factores de intensidad de tensión de diferentes maneras y utilizaron las ecuaciones anteriores con el objetivo de hallar las curvas de calibración.



## 7. CONCLUSIONES

En este proyecto, dos parámetros han sido evaluados para definir el estado tensional en la punta de la grieta: los factores de intensidad de tensión y las curvas de calibración. A partir de ello, se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- Para una misma relación del tamaño de la grieta, los cuatro estudios parecen ser muy similares.
- La diferencia entre mis resultados y los de María Villanueva se debe al uso de un software de digitalización de datos, no a términos relacionados con la Mecánica de la Fractura.
- La comparación entre los modelos simulados y los experimentales muestran una similitud considerable.
- Las diferencias entre mi enfoque y el propuesto por Ayatollahi y Aliha se debe en gran parte al uso de diferentes curvas de calibración, utilizadas debido a diferentes estudios de los valores de los factores de intensidad de tensión.
- Sería crucial realizar un estudio en mayor profundidad de cara a poder certificar el uso de este hormigón y asegurar la estabilidad de la estructura.

Definitivamente, no hay una conclusión final para definir qué método de los estudiados obtiene unos resultados más exactos; los diferentes estudios muestran un comportamiento similar para calcular y definir el desarrollo de la grieta en una estructura de este material. Si bien es cierto que no se podría catalogar como un estudio definitivo.