

## LOCALIZACIÓN DE FALLAS EN VIGAS DE FUNDACION ELASTICA

Claudio J. Orbanich<sup>a,b</sup>, Néstor F. Ortega<sup>a</sup>, Sandra I. Robles<sup>a</sup>

*<sup>a</sup> Departamento de Ingeniería  
Universidad Nacional del Sur  
Av. Alem 1253*

*8000 Bahía Blanca, Argentina(nfortega@criba.edu.ar)*

*<sup>b</sup> Becario CONICET*

**Palabras Claves:** Vigas de Fundación, Detección de Fallas, Hormigón Armado.

**Resumen.** Las fundaciones de las estructuras cumplen un papel muy importante, que condiciona al comportamiento mecánico del resto de la obra. Existen tipologías que se encuentran ampliamente estudiadas, mientras que para el análisis de otras se recurre al empleo de hipótesis simplificativas, que no siempre poseen una adecuada precisión.

Con el transcurso del tiempo las fundaciones pueden deteriorarse debido al surgimiento de sobrecargas o asentamientos no previstos, apareciendo fisuras en el hormigón que disminuyen la sección útil de las mismas, degradación que se puede acentuar con el transcurrir del tiempo. Estas fisuras producen cambios en el comportamiento estático y dinámico de la fundación afectada. En la mayoría de las estructuras es relativamente fácil realizar una inspección visual, con el fin de evaluar su estado, pero en el caso de las fundaciones, es dificultoso su acceso.

En este trabajo se desarrollarán técnicas para la detección, localización y cuantificación del daño, utilizando modelos numéricos, resueltos con el empleo del Método de los Elementos Finitos. En este estudio se utilizarán distintos parámetros estáticos, tales como Desplazamientos Verticales, Diferencia entre Desplazamientos Verticales y Curvatura de la Elástica, con el fin de evaluar cual de ellos representa de forma más precisa la detección y localización del daño.

Para la detección y localización del daño se presentarán dos técnicas. La primera está relacionada con la variación de la flexibilidad de la estructura dañada, tomando como referencia la misma estructura sin afectación. La segunda técnica se basa en la variación de la curvatura de la deformada, la cual se obtiene mediante el Método de las Diferencias Finitas.

Los análisis se realizarán en vigas de fundación elástica, adoptando una reacción de la subrasante, cuya magnitud varía linealmente con la deformación del terreno.

Es interesante destacar que los tipos de técnicas que se emplearon permiten, en la práctica, hacer seguimientos de estructuras de fundación mediante, ensayos no destructivos, para evaluar su Capacidad de Carga Residual.

## 1 INTRODUCCION

Una estructura se puede dañar por diversas causas, sobrecargas accidentales que excedan aquellas para las cuales fue diseñada, por el cambio o deterioro de sus propiedades físicas o mecánicas en el transcurrir del tiempo, por la influencia del medio ambiente, entre otras. Con el fin de realizar la detección temprana de los daños estructurales, muchos investigadores han desarrollado métodos de evaluación para conocer la condición de los elementos. La detección de daño, se puede efectuar mediante métodos de auscultación basados en ensayos destructivos y no destructivos.

Existe interés en disponer de técnicas que permitan hacer un seguimiento continuo del estado de las estructuras. Entre los métodos no destructivos, están aquellos que se basan en establecer el cambio de la respuesta dinámica de la estructura, Estos últimos métodos han sido tratados por diferentes investigadores, generándose un numero importante de publicaciones (P. Rizos,1990; A. Dimagoras, 1996; O. Salawu, 1997; X. Yang et al., 2001; J. Kim and N. Stubbs, 2003; G. Owolabi, et al., 2003).

Comparativamente, existen pocos trabajos sobre identificación de daño, basado en la respuesta estática de una estructura (J. Chou and J. Ghaboussi., 2001; I. Choi et. al., 2004;D. Maity and A. Saha, 2004; S. Suresh et. al., 2004; T. Sain Chandra and J. M. Kishen., 2003; S. Caddemi and A. Morassi, 2005; F. Jiang et al., 2004).

Se debe tener presente que una estructura con daño pierde rigidez, lo que induce a variaciones en ambas respuestas, dinámica y estática. En el caso de la respuesta dinámica, lo que se mide es la variación en Frecuencias, Modos y Respuesta en Frecuencias; en tanto que en el caso de la respuesta estática, se miden las variaciones en los Desplazamientos Verticales, las Deformaciones, etc. Dependiendo de la estructura que se analiza y del equipamiento disponible para realizar las mediciones in situ, resulta más conveniente uno u otro método y en algunos casos ambos, usados en forma complementaria (F. Jiang et al., 2004).

Se debe mencionar que, un algoritmo para la detección de daño incluye cuatro etapas diferentes del análisis: la detección de la presencia de daño, la localización, la cuantificación y por último, la predicción de la Vida y/o Resistencia Residual (Capacidad Portante Residual) de la estructura afectada.

En este trabajo, se presenta la aplicación de una metodología no destructiva para la detección de daño, basada en la respuesta estática (Desplazamientos Verticales y Curvaturas de la Elástica) de estructuras de fundación realizadas en hormigón armado, trabajándose en las tres primeras etapas: detección, localización y cuantificación del daño estructural.

Es interesante destacar que en las Estructuras de Fundación es dificultosa la detección de patologías debido a que se encuentran cubiertas por suelo. Por este motivo también es complicada la medición del comportamiento mecánico de los mismos, investigándose en este trabajo la posibilidad de realizar la detección de fallas midiendo los Desplazamientos Verticales en la parte superior de la viga o de la placa.

## 2 DETECCIÓN, LOCALIZACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE DAÑO

Como se mencionó en la introducción, una estructura dañada presenta una rigidez relativa menor que la misma sin daño. Esto se evidencia en la respuesta estática, es decir mediante los Desplazamientos Verticales y las Deformaciones producidas, por la acción de las cargas actuantes.

Los Desplazamientos Verticales y las Deformaciones de una estructura son funciones de su geometría, de las propiedades del material y de las cargas externas. El daño puede presentarse

como un cambio en las propiedades del material o bien una alteración en su geometría. En este trabajo, el daño se modela como una fisura discreta, que altera la geometría y más específicamente, el Momento de Inercia de la zona afectada.

En este trabajo son comparados dos métodos de detección y localización de daño en estructuras, basados en el análisis de su respuesta estática. Además, se presenta un método que permite estimar la cuantificación del daño, que no provee una solución explícita al problema inverso, debido a que está basada en el uso de métodos numéricos.

Se realizó un modelo, representativo de la estructura con y sin daño, que consistió en una Viga de Fundación sobre un terreno elástico, tipo Winkler. Se analizó mediante un software que emplea el Método de los Elementos Finitos, comercialmente conocido como Algor15 (Algor15 Professional Mech/VE, 2001), obteniéndose los valores de Desplazamientos Verticales y Deformaciones en distintos puntos. Se debe tener presente que los valores de los Desplazamientos Verticales y Deformaciones también se pueden obtenerse en forma experimental, ya sea medidos en la estructura real o bien en un modelo físico a escala.

## 2.1 Modelación numérica

En las Figuras 1 se muestra un ejemplo de los modelos utilizados en este trabajo con sus dimensiones. La Figura 1 corresponde a una Viga de Fundación, donde se colocó una fisura sobre la viga a una distancia  $x$  del extremo izquierdo y otra en la placa a una distancia  $x_1$  del extremo izquierdo. En la Figura 2 se aprecia la densificación de la malla en la zona de fisuras en la viga, es interesante destacar que la densificación de la malla en la placa es similar al observado en la Figura 2. Estos modelos fueron analizados considerando elementos tipo Plate - Shell. Se diseñó una malla de elementos rectangulares, con nodos en sus vértices y en la zona de las fisuras se la densificó, empleándose elementos triangulares. El cambio de rigidez, debido al daño, fue modelado mediante la incorporación de una fisura discreta.

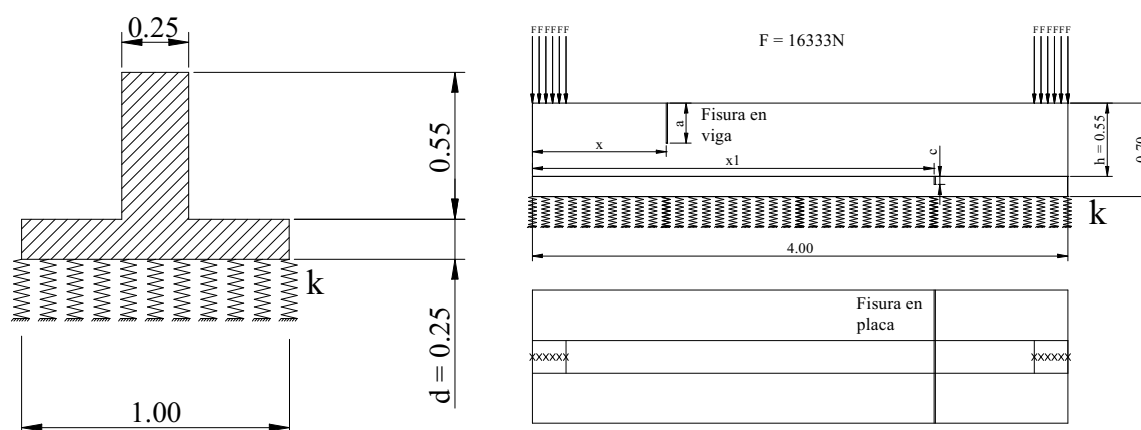


Figura 1: Modelo de Viga de Fundación con fisura en la viga y en la placa (unidades de long. en metros).

El material que se modeló (Hormigón Armado) se consideró homogéneo, continuo e isótropo, las propiedades que se adoptaron son:  $E = 3.10 \cdot 10^{10}$  [N/m<sup>2</sup>];  $\mu = 0.15$  y  $\rho = 2351$  [Kg/m<sup>3</sup>]. Las cargas son tipo concentrada en los nudos cuyo valor es de  $F = 16333$  N, simulando la descarga de una columna, el valor del Coeficiente de Reacción del Terreno ( $k$ ) es de  $9.8 \cdot 10^7$  N/m<sup>3</sup>.

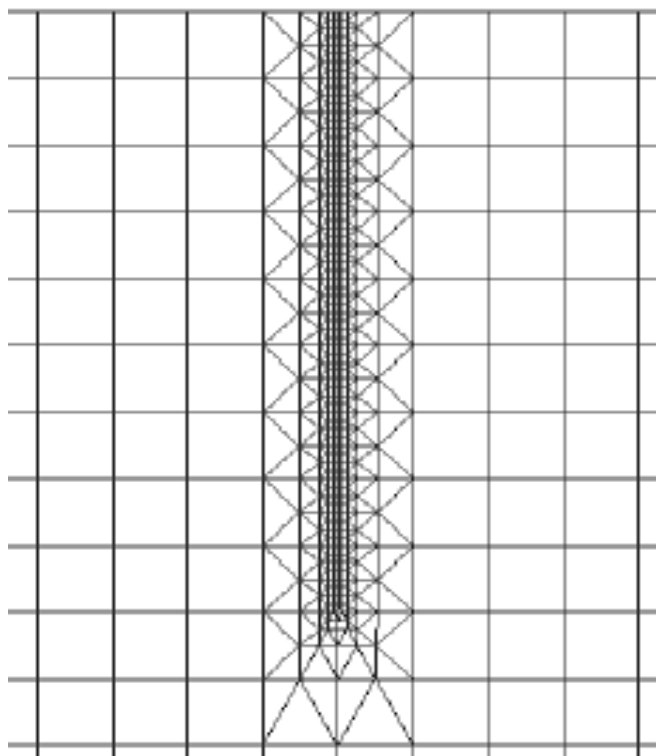


Figura 2: Detalle de malla en la fisura de viga.

## 2.2 Determinación de la presencia de daño en estructuras

Para la determinación de la presencia de daño, se realiza la comparación de los valores de los Desplazamientos Verticales, correspondientes a la estructura con y sin daño, empleándose esta variable como un índice de la existencia de daño. Cabe acotar que en el modelo empleado no se introdujo dentro de la fisura la armadura longitudinal, a los efectos de agilizar la velocidad de cada corrida del programa cuyo tiempo de ejecución se multiplicaba aproximadamente por 5. No obstante, a los efectos de verificar el error cometido por esta simplificación se realizó un modelo en el que se introdujo dentro de la fisura un elemento truss detectándose una máxima diferencia en los corrimientos verticales entre los modelos con y sin armadura del 0,02%.

Con relación a la determinación en obra de los Desplazamientos, se los puede medir mediante el uso de flexímetros mecánicos, cuya precisión es del orden de la centésima de milímetro, o con instrumental electrónico, tal es el caso de los LVDT, cuya precisión, habitualmente, es igual o superior a la de los flexímetros. Es interesante destacar que la capacidad de medición de estos equipos es suficiente, debido a que con la décima de milímetro ya se pueden detectar los desplazamientos originados por las fallas.

### 2.2.1 Análisis de resultados del modelo de Viga de Fundación, con una fisura en la viga

En la Figura 3 se representan los Desplazamientos Verticales de una Viga de Fundación, con daño en una posición fija, correspondiente al punto  $X = 1.5$  m (donde  $X$  es la coordenada de cada punto), en función de la ubicación relativa de cada punto, para distintas relaciones de  $a/h$  (donde: “ $a$ ” es la profundidad del daño y “ $h$ ” es la altura total de la viga), efectuándose la medición de los Desplazamientos Verticales sobre la viga. Además, se ha incluido en esta gráfica la curva correspondiente a los Desplazamientos Verticales de la estructura sin daño.

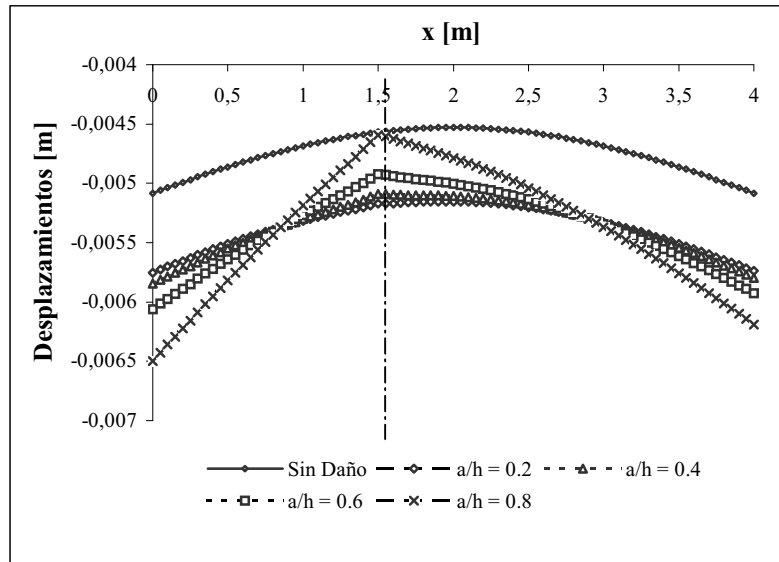


Figura 3: Desplazamiento Verticales de una Viga de Fundación con distintas severidades de daño, en  $x = 1.5$  m, medido desde la viga.

En la Figura 4 se representan los Desplazamientos Verticales de una Viga de Fundación, con daño en una posición fija, correspondiente al punto  $x = 1.5$  m, en función del eje longitudinal (viga y placa), para distintas relaciones de  $a/h$ , efectuándose la medición de los Desplazamientos Verticales sobre la placa. Estos fueron medidos a 0.05 m del borde libre de la placa.

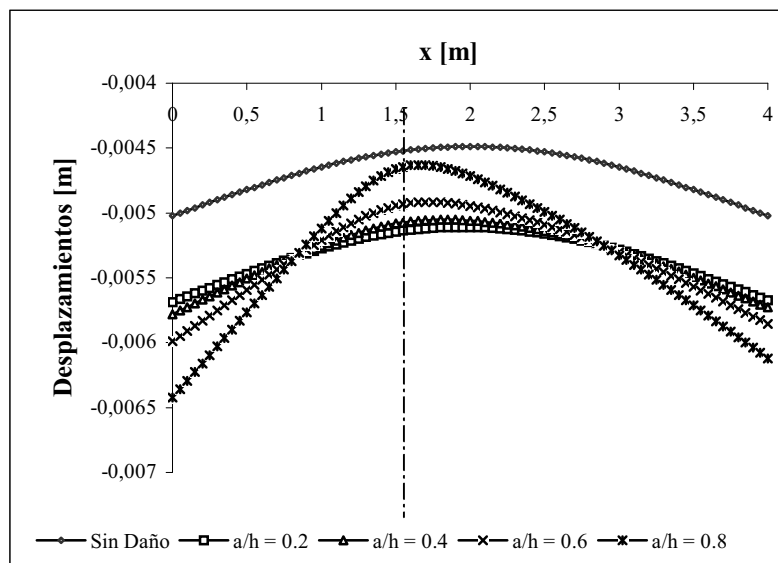


Figura 4: Desplazamientos Verticales de una Viga de Fundación con distintas severidades de daño, en  $x = 1.5$  m, medido desde la placa.

En la Figura 5 se representan los Desplazamientos Verticales, en función de la ubicación relativa de cada punto, para una relación  $a/h = 0.6$  y distinta ubicación del daño, es decir diferentes  $x$  (igual severidad y distinta ubicación), midiendo los Desplazamientos Verticales sobre la viga. Como se puede observar en dicha figura, cuando la ubicación del daño coincide con la zona de máximos Desplazamientos Verticales, la diferencia entre las curvas correspondientes a estructura dañada y sana es máxima, como era de esperar. Es interesante destacar que este método pierde sensibilidad, en la medida que la zona dañada se aproxima a los apoyos.

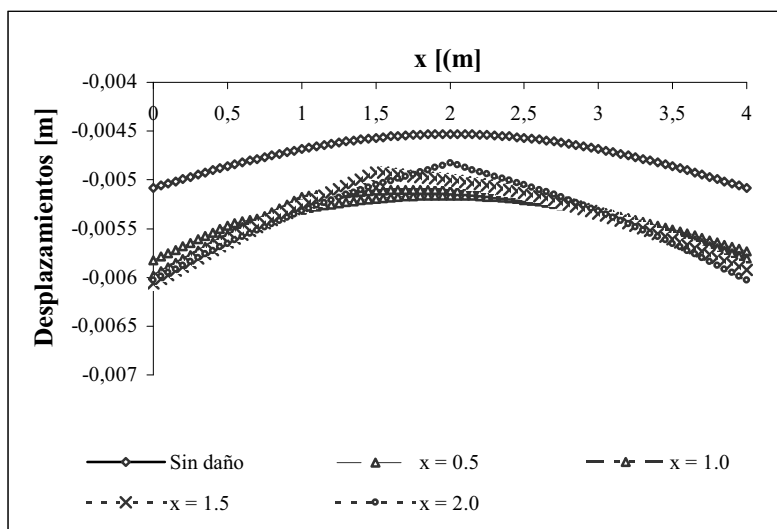


Figura 5: Desplazamientos Verticales de una Viga de Fundación con daño en distintas ubicaciones y  $a/h = 0.6$ , medido desde la viga.

En los Figuras 3 y 4, se observa que a medida que la relación  $a/h$  se incrementa, es decir cuando el daño es más severo, se hace más pronunciado el cambio de la pendiente de las curvas, en la zona donde se presenta el daño. Entre los casos de estudio, se aprecia que la forma de la curva correspondiente a la relación  $a/h = 0.2$ , difiere muy poco de la curva sin daño. Es interesante destacar que cuando se mide desde la viga, Figuras 3 y 5, el cambio de pendiente en la elástica es más pronunciado que cuando se mide sobre la platea. (Figura 4).

### 2.2.2 Análisis de resultados del modelo de Viga de Fundación, con una fisura en la placa

En la Figura 6 se representan los Desplazamientos Verticales de una Viga de Fundación, con daño en una posición fija de la placa, correspondiente al punto  $x = 2.5\text{m}$ , en función del eje longitudinal de la placa, para distintas relaciones de  $c/d$  (donde  $c$  es la profundidad del daño y “ $d$ ” es la altura total de la placa), efectuándose la medición de los Desplazamientos Verticales sobre la placa.

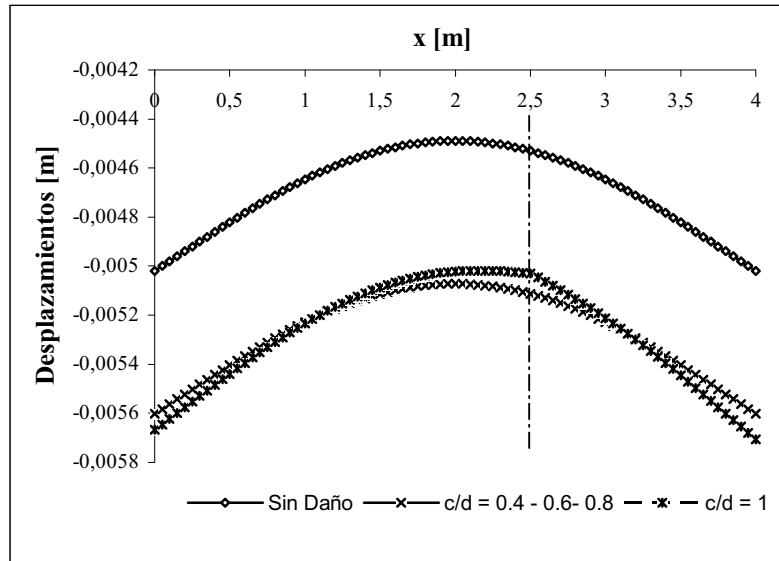


Figura 6: Desplazamiento de una Viga de Fundación con distintas severidades de daño en la placa, en  $x = 2.5$ , medido desde la placa.

### 2.2.3 Análisis de resultados del modelo de Viga de Fundación, con una fisura en la viga y en la placa

En la Figura 7 se representan los Desplazamientos Verticales de una Viga de Fundación, con daños en la viga y en la placa, correspondiente al punto  $x = 1\text{m}$  y  $x = 3\text{m}$  respectivamente, en función del eje longitudinal (viga y placa), para distintas relaciones de  $a/h$  y de  $c/d$ , efectuándose las mediciones sobre la viga.

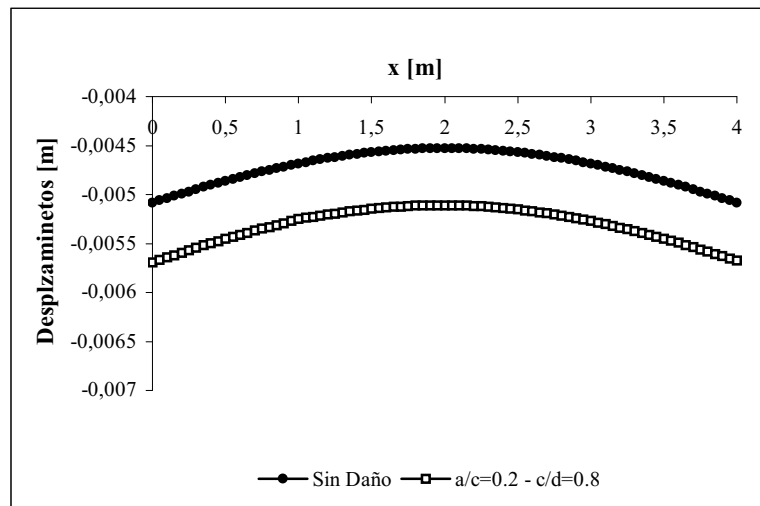


Figura 7: Desplazamientos Verticales de una Viga de Fundación con daño en la viga a  $1\text{m}$  y en la placa a  $3\text{m}$  del extremo, para  $a/h = 0.2$  y  $c/d = 0.8$ , medido desde la viga.

Las curvas que representan los Desplazamientos Verticales, cuando la medición se realiza sobre la placa, presentan similar comportamiento.

## 2.3 Localización de daño

La localización de daño se realiza una vez determinada la presencia del mismo en la estructura, para ello aquí se presentan dos métodos:

- Método de la variación de los Desplazamientos Verticales y
- Método de la Curvatura de la Elástica.

### 2.3.1 Método de la variación de los Desplazamientos Verticales

Este método se basa en la diferencia existente entre los Desplazamientos Verticales correspondiente a la estructura sin daño y los de la estructura afectada. Este parámetro es un índice de la variación de la rigidez estructural, y se lo define como:

$$\delta_i = |y_{iCD} - y_{iSD}| \quad (1)$$

donde  $y_{iCD}$  es el Desplazamiento Verticales del punto  $i$  en la estructura con daño, e  $y_{iSD}$  es el Desplazamiento del mismo punto en la estructura sin daño.

Si se dispone de estos datos en varios puntos, la gráfica de los mismos permite estimar la localización del daño. En el caso de no disponer de mediciones de los Desplazamientos Verticales del elemento estructural, sin alteración, situación que es muy frecuente, se puede estimar analíticamente.

#### 2.3.1.1 Análisis de resultados del modelo de Viga de Fundación con fisura en la viga

En la Figura 8 se representa la Variación de los Desplazamientos Verticales, en función de la ubicación de cada punto de la malla, para una Viga de Fundación con daño en la viga, en la ubicación correspondiente a  $x = 1.5$ , graficándose cuatro profundidades de fisuras  $a/h = 0.2$ ,  $a/h = 0.4$ ,  $a/h = 0.6$  y  $a/h = 0.8$ . Aquí se puede apreciar que en el lugar donde está el daño, se produce el cambio de pendiente de las variaciones de los Desplazamientos Verticales y por consiguiente también varía el signo de la curvatura. Cabe acotar que en este caso los Desplazamientos Verticales fueron medido sobre la viga.

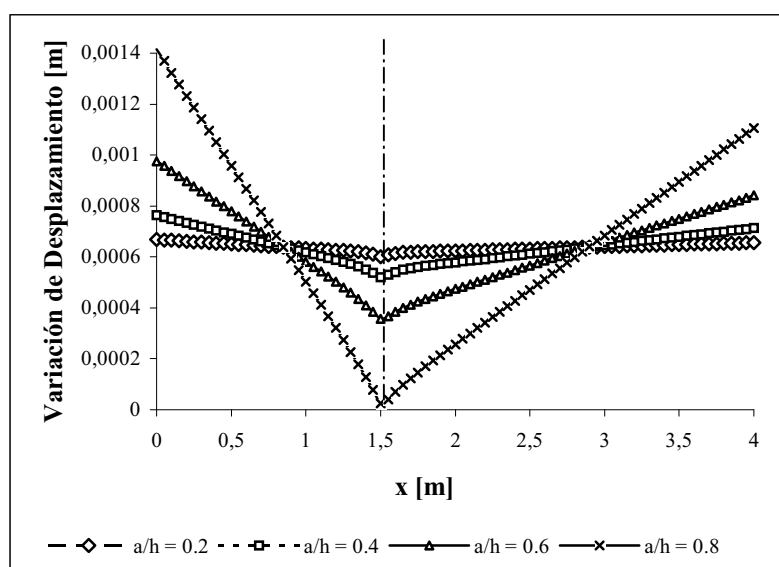


Figura 8: Variación de los Desplazamientos Verticales de una Viga de Fundación, con daño en  $x = 1.5$  m, medido desde la viga.



Es interesante destacar que a medida que aumenta la profundidad del daño, el cambio de pendiente que presentan estas curvas, coincidente con la ubicación de la fisura, es más notorio. Cabe acotar que cuando los Desplazamientos Verticales son medidos sobre la placa, Figura 9, las variaciones en las pendientes son más suaves.

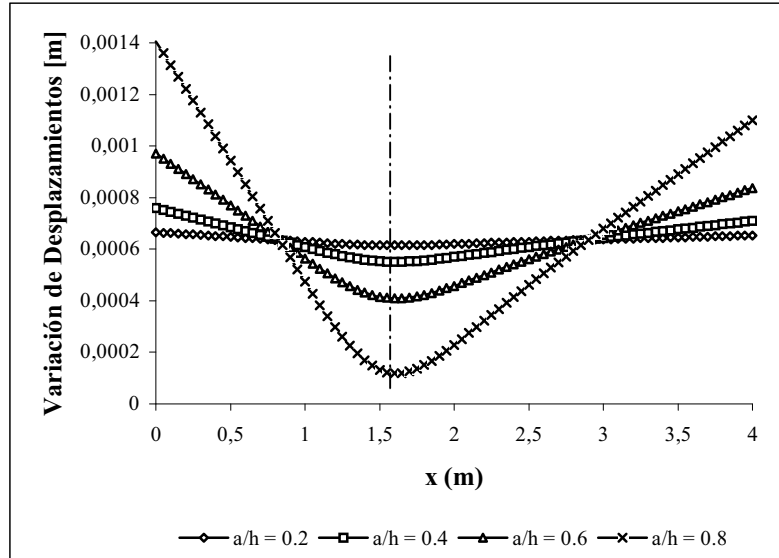


Figura 9: Variación de los Desplazamientos Verticales de una Viga de Fundación, con daño en  $x = 1.5\text{m}$ , medido sobre la placa.

En las Figuras 10 y 11 se representan las variaciones de los Desplazamientos Verticales, en la dirección del eje longitudinal, para una relación  $a/h = 0.6$  y distintas ubicaciones del daño en la viga, medidos sobre la viga (Figura 10) y sobre la placa (Figura 11).

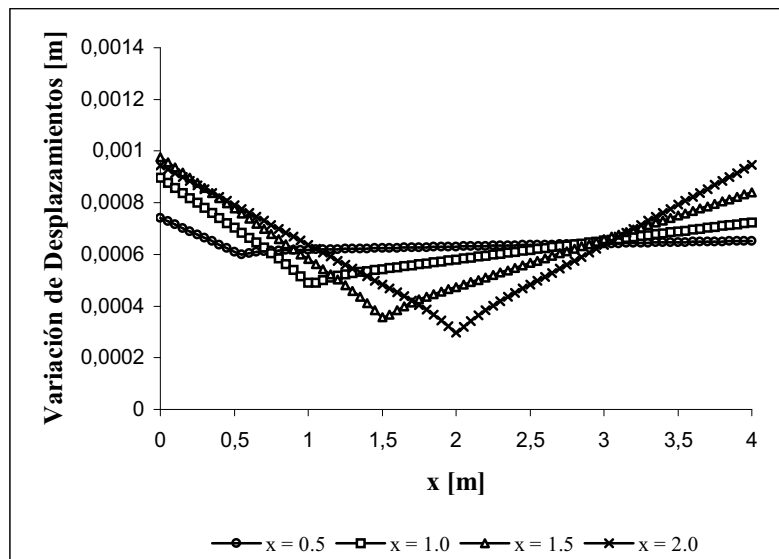


Figura 10: Desplazamientos Verticales de una Viga de Fundación con daño en la viga, en distintas ubicaciones y  $c/d = 0.6$ , medidos sobre la viga.

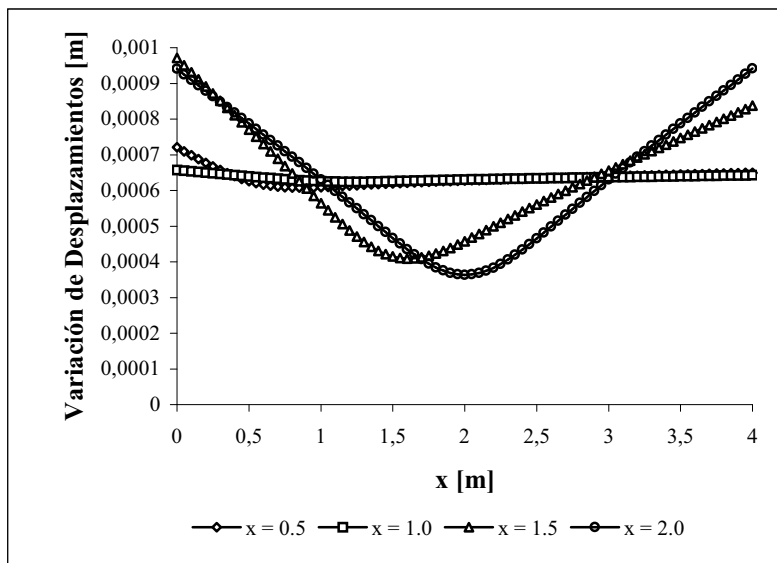


Figura 11: Variación de los Desplazamientos Verticales de una Viga de Fundación con daño en la viga, en distintas ubicaciones y  $c/d = 0.6$ , medido sobre la placa.

Es interesante destacar que si la fisura se encuentra ubicada en proximidades de los extremos, la medición de los Desplazamientos sobre la placa, no permite su identificación.

### 2.3.1.2 Análisis de resultados del modelo de Viga de Fundación con fisura en la placa

En la gráfica de la Figura 12 se representa la variación de los Desplazamientos Verticales, medidos sobre la viga, en función de la ubicación de cada punto de la malla, para una Viga de Fundación con daño en la placa, en la ubicación correspondiente a  $x = 2.5\text{m}$ . graficándose tres profundidades de fisuras,  $c/d = 0.4$ ,  $c/d = 0.6$  y  $c/d = 0.8$ . Aquí se puede apreciar que el cambio de pendiente se produce en el punto  $x = 2\text{m}$ , estando el mismo separado  $0.5\text{m}$  del lugar donde se encuentra la fisura. Observando las curvas de nivel (igual desplazamiento) de la Figura 13, surge que las mediciones realizadas sobre la viga corresponden a Desplazamientos Verticales que no coinciden en su ubicación con los Desplazamientos Verticales de la placa, por ende no resulta conveniente tratar de localizar el daño en la placa, realizando determinaciones sobre la viga.

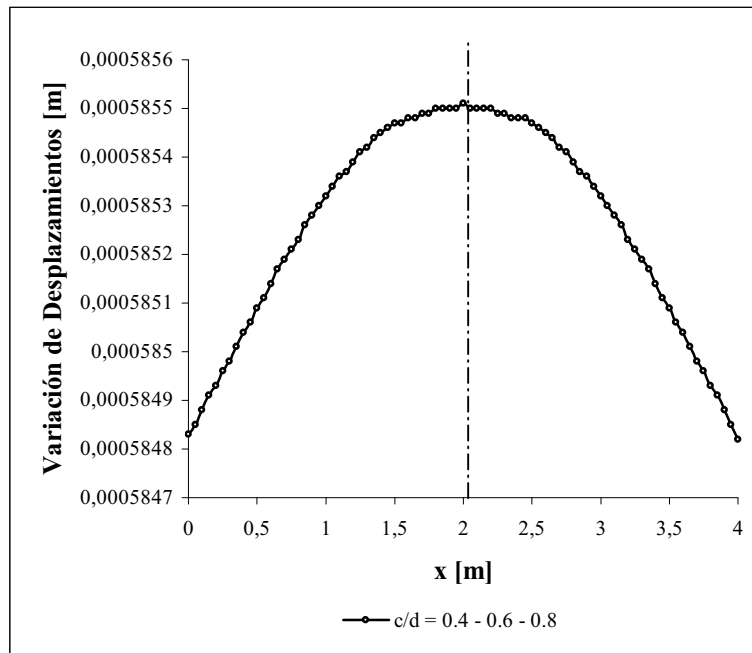


Figura 12: Variación de los Desplazamientos Verticales de una Viga de Fundación, con daño en la placa, en  $x = 2.5\text{m}$ , medido sobre la viga.

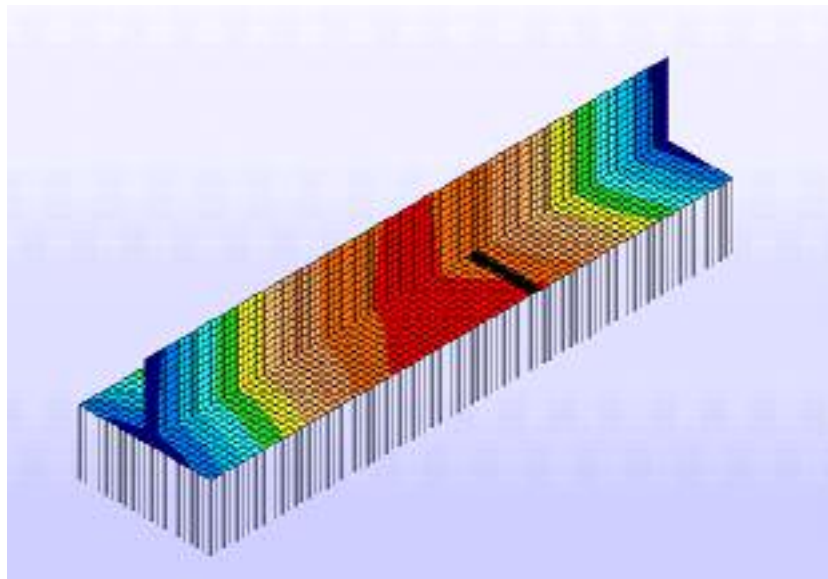


Figura 13: Curvas de nivel de los Desplazamientos Verticales de una Viga de Fundación, con daño en la placa, en  $x = 2.5\text{m}$ .

En la Figura 14 se representa la variación de los Desplazamientos Verticales, a lo largo de la Viga de Fundación, con daño en la placa en la ubicación correspondiente a  $x = 2.5\text{m}$ , graficándose dos profundidades de fisuras  $c/d = 0.4$  y  $c/d = 0.6$ . Aquí se puede apreciar que en el lugar donde está el daño, se produce el cambio de pendiente de las variaciones de los Desplazamientos Verticales y por consiguiente también varía el signo de la Curvatura de la Elástica. Es interesante destacar que los Desplazamientos Verticales fueron medido sobre la placa.

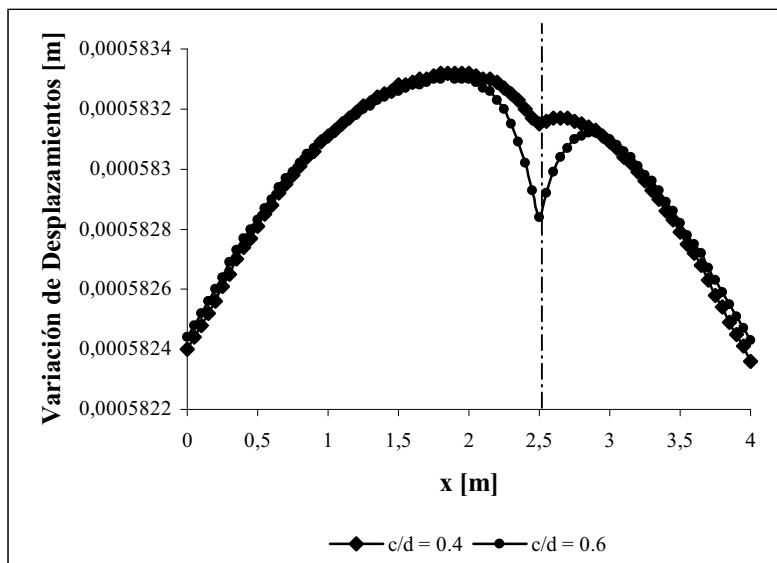


Figura 14: Variación de los Desplazamientos Verticales de una Viga de Fundación, con daño en la placa, en  $x/L = 2.5m$ , medido sobre la placa.

En las Figura 15 se representan las variaciones de los Desplazamientos Verticales, obtenidos como la diferencia entre los Desplazamientos de la estructura sana y fisurada. Estos desplazamientos están medidos desde la placa, en función del eje longitudinal, para una relación  $c/d = 0.8$  y distinta ubicación del daño en la placa.

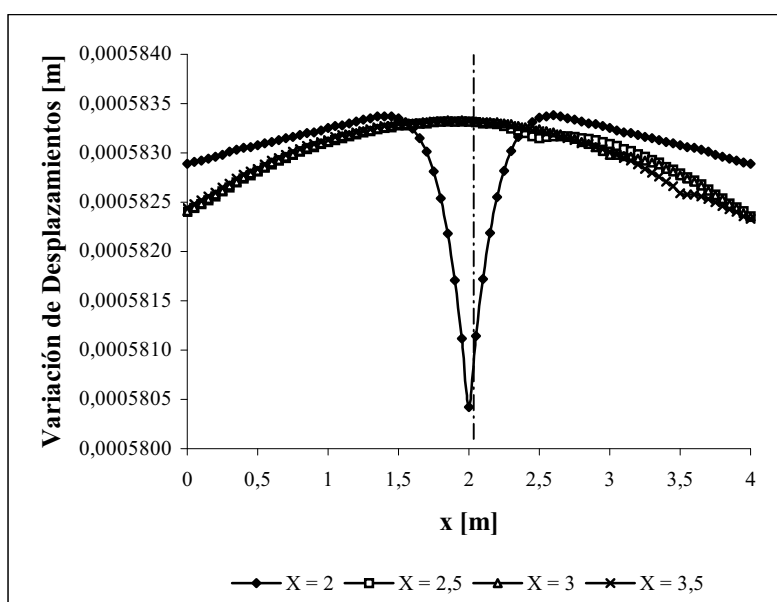


Figura 15: Variación de los Desplazamientos de una Viga de Fundación, con daño en la placa, en distintas ubicaciones y  $c/d = 0.8$ , medido sobre la placa.

En las Figura 16 se muestran tres de las curvas representadas en la Figura 15, utilizando una escala distinta, con la finalidad de apreciar que en el lugar donde está el daño, se produce un cambio de pendiente de las variaciones de los Desplazamientos Verticales y por consiguiente también varía el signo de la Curvatura de la Elástica.

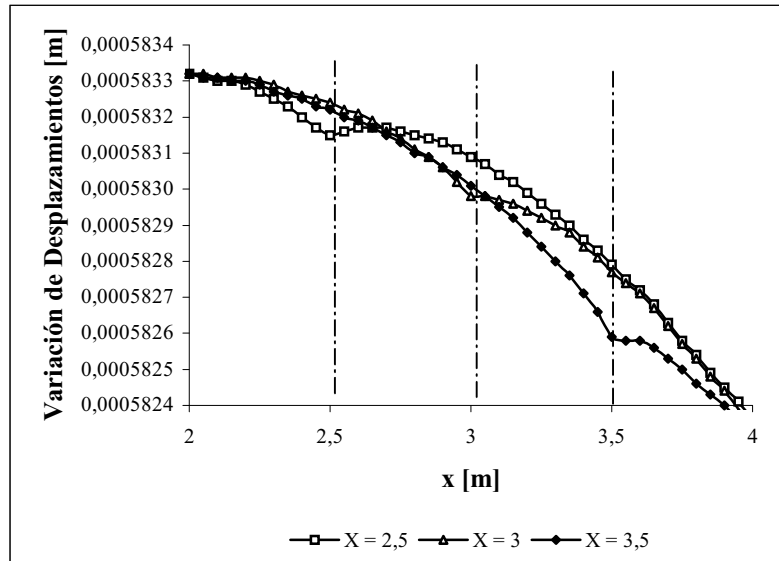


Figura 16: Variación de los Desplazamientos Verticales de una Viga de Fundación, con daño en la placa, en distintas ubicaciones y  $c/d = 0.8$ , medido desde la placa.

### 2.3.1.3 Análisis de los resultados del modelo de Viga de Fundación, con fisuras en la viga y en la placa simultáneamente

En este punto se trabajó con la Variación de los Desplazamientos Verticales, en función de la ubicación de cada punto de la malla, para una Viga de Fundación con daño en la viga, en la ubicación correspondiente a  $x = 1\text{m}$  y en la placa en la ubicación correspondiente a  $x = 3\text{m}$ , adoptando tres profundidades de fisura en la viga,  $a/h = 0.2$ ,  $a/h = 0.4$ ,  $a/h = 0.6$  y cuatro profundidades de fisuras en la placa  $c/d = 0.4$ ,  $c/d = 0.6$ ,  $c/d = 0.8$  y  $c/d = 1$ . Es interesante destacar que los Desplazamientos Verticales fueron medidos sobre la viga y sobre la placa, combinando cada uno de los casos de fisura descriptos.

En la Figuras 17 y 18 se representa la Variación de los Desplazamientos Verticales de una Viga de Fundación, con daño en una posición fija en la viga y en la placa, correspondiente al punto  $x = 1\text{m}$  y  $x = 3\text{m}$  respectivamente, en función del eje longitudinal, para  $a/h = 0.2$  y  $c/d = 0.8$ , efectuando la medición sobre la viga y sobre la placa, respectivamente.

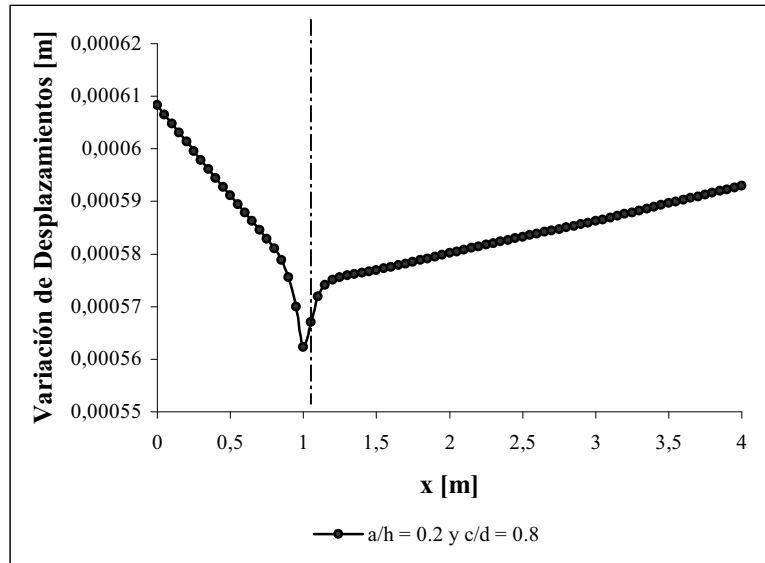


Figura 17: Variación de los Desplazamientos Verticales de una Viga de Fundación, con daño en la viga, en  $x = 1\text{ m}$  y  $a/h = 0.2$  y en la placa, en  $x = 3\text{ m}$  y  $c/d = 0.8$ , medidos desde la viga.

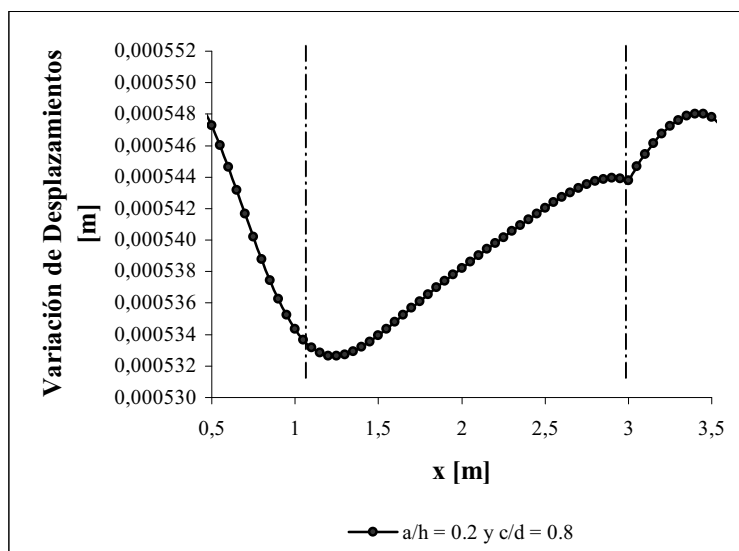


Figura 18: Variación de los Desplazamientos Verticales de una Viga de Fundación, con daño en la viga, en  $x = 1\text{ m}$  y  $a/h = 0.2$  y en la placa, en  $x = 3\text{ m}$  y  $c/d = 0.8$ , medidos sobre la placa.

Es interesante destacar que si se mide sobre la viga, solo se va a poder localizar fisuras que están en la viga, mientras que si se mide sobre la placa se va a poder localizar fisuras que están en la viga y en la placa. Para diferenciarlas, la curvatura cambia suavemente cuando el daño está en la viga, y presenta una discontinuidad cuando el daño está en la placa.

### 2.3.2 Método de la Curvatura de la Elástica

Los valores de los Desplazamientos Verticales obtenidos en determinados puntos de la estructura, ya sean mediante mediciones experimentales, o como en este caso, desarrollando una simulación numérica, se pueden utilizar para obtener la Curvatura de la estructura deformada, mediante una aproximación por Diferencias Finitas Centrales (Q. Lu, et al., 2002). De esta manera, la curvatura está dada por.

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{y_{i+1} - 2y_i + y_{i-1}}{h^2} \quad (2)$$

$$i = 2, \dots, n - 1$$

donde  $h$  es la distancia entre dos puntos adyacentes (paso), mientras que  $y$  es el Desplazamiento en un punto determinado y  $n$  es el número de puntos disponibles en la malla.

Es importante mencionar que, este método no depende de la información de la estructura sin daño, siendo esto una importante ventaja cuando no se dispone de la misma.

Para una estructura sin daño, el gráfico de la curvatura presenta una forma suave. Mientras que la aparición de un pico o una discontinuidad en su forma, indican una variación anormal de la rigidez o flexibilidad en esa ubicación, la que es producida por el daño; de esta manera una zona o zonas dañadas pueden ser localizadas usando estas mediciones.

#### 2.3.2.1 Análisis de resultados del modelo de Viga de Fundación con una fisura en la viga

En la Figura 19, se muestra la Curvatura de la Elástica, calculada según la Ec.(2), en función del eje longitudinal, para una Viga de Fundación con daño en la viga, en  $x = 1.5\text{m}$ , y cuya profundidad de fisura es  $a/h = 0.2$ . En esta gráfica se observa que en la zona dañada presenta un salto pronunciado, se aprecian además tres pequeños saltos, en la zona de aplicación de las cargas (columnas).

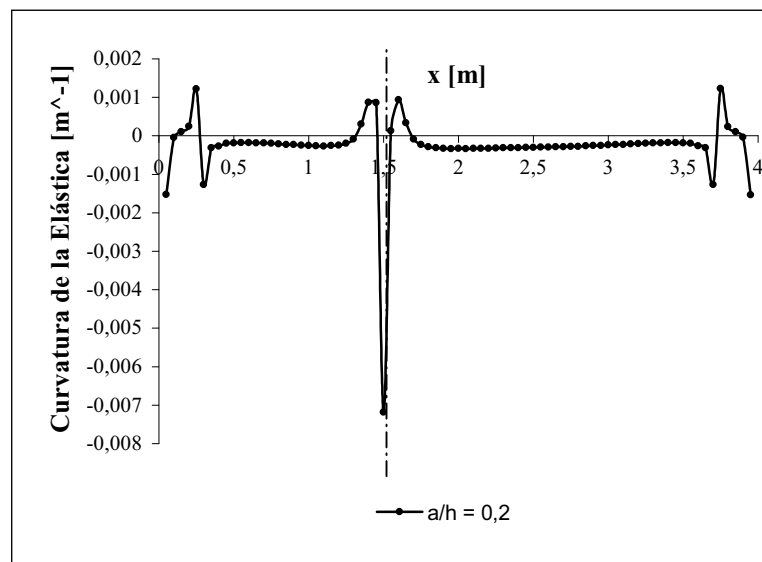


Figura 19: Curvatura de la elástica de una Viga de Fundación, con daño en la viga en  $x = 1.5\text{m}$  y con  $a/h = 0.2$ , medido sobre la viga.

En la Figura 20 se muestra la Curvatura de la Elástica, calculada según la Ec.(2), en función del eje longitudinal, para una Viga de Fundación dañada en la viga, en  $x = 1.5\text{m}$ , y cuya profundidad de fisura que varía desde  $a/h = 0.2$ , hasta  $a/h = 0.8$ .

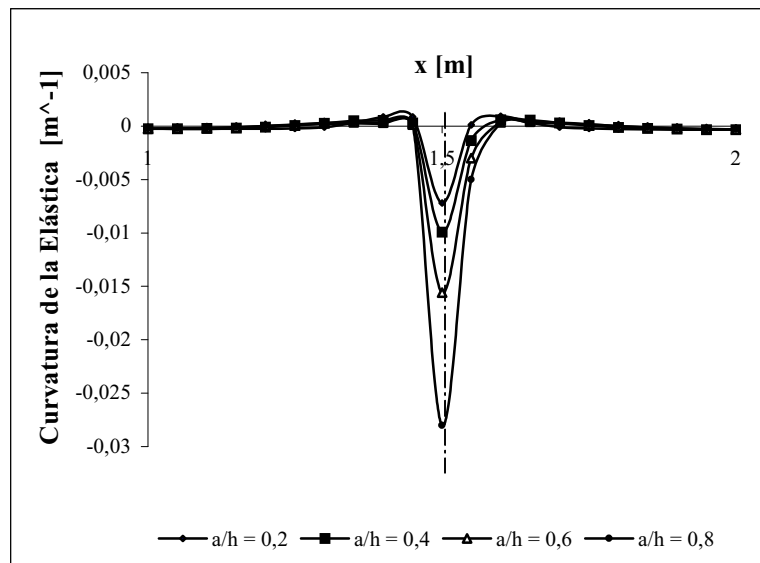


Figura 20: Curvatura de la Elástica de una Viga de Fundación, con daño en la viga en  $x = 1.5\text{m}$  y distintos  $a/h$ , medido sobre la viga.

En la Figura 21, se muestran Curvaturas de la Elástica, calculada según la Ec.(2), en función del eje longitudinal, para una Viga de Fundación dañada en la viga, en  $x = 0.5\text{m}$ ,  $x = 1\text{m}$ ,  $x = 1.5\text{m}$ ,  $x = 2\text{m}$  y con una profundidad de fisura de  $a/h = 0.6$ .

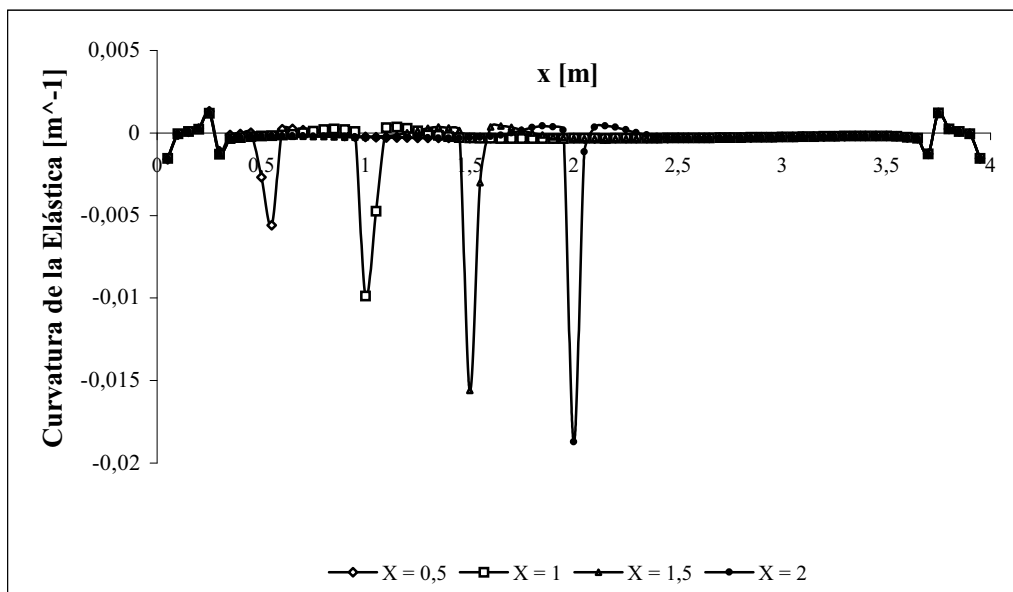


Figura 21: Curvatura de la Elástica de una Viga de Fundación, con daño en la viga en distintos  $x$ , con  $a/h = 0.6$ , medido sobre la viga.

La Figura 22, presenta la variación de la Curvatura de la Elástica, calculada según la Ec.(2), con los Desplazamientos Verticales medidos sobre la placa, en función del eje longitudinal, para una Viga de Fundación dañada en la viga, en  $x = 0.5\text{m}$ ,  $x = 1.5\text{m}$ ,  $x = 2\text{m}$  y con una profundidad de fisura  $a/h = 0.6$ .



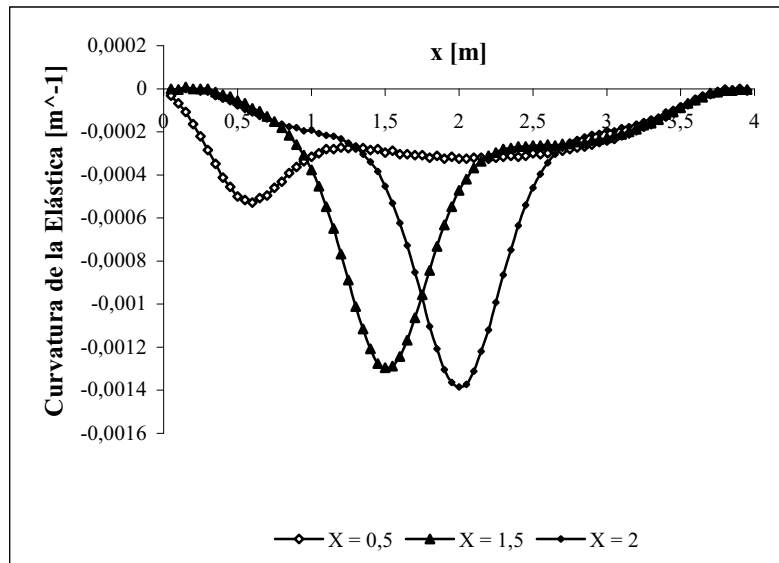


Figura 22: Curvatura de la Elástica de una Viga de Fundación, con daño en la viga en distintos  $x/L$ , con  $a/h = 0.6$ , medido sobre la placa.

De la observación de las Figuras 21 y 22 se puede decir que si se miden los Desplazamientos sobre la viga, el salto en la curvatura es más pronunciado.

## 2.4 Cuantificación del daño

Una vez localizado el daño mediante las técnicas anteriormente descriptas, la siguiente etapa es establecer la magnitud del mismo. Debido a que, aunque se pudiera visualizar externamente la zona afectada, existe incertidumbre sobre la magnitud de la afectación en especial en la parte interna del elemento. Para ello, se debe realizar un modelo numérico de la estructura, con el daño simulado en la ubicación determinada visualmente o con la técnica presentada en el punto 2.3 o con el empleo de alguna otra técnica experimental (por ejemplo, ultrasonidos).

En este trabajo, con el fin de cuantificar el daño se analizan numéricamente modelos con distintas ubicaciones y severidades de daño, obteniéndose gráficas en 3 dimensiones de los parámetros: ubicación, severidad y un tercero, vinculado con el comportamiento mecánico de la estructura dañada, por ej.: Desplazamientos Verticales, Deformaciones o Desplazamientos Volumétricos (S.I. Robles y N.F. Ortega, 2001). Luego se ingresa al gráfico realizado en 3D, con la ubicación del daño  $X$ , y con el desplazamiento medido u otro parámetro mecánico, obteniéndose el valor de  $a/h$  (severidad del daño).

En este estudio se utilizaron como parámetro mecánico a los Desplazamientos Volumétricos. Este parámetro está definido como la sumatoria del producto de los Desplazamientos Verticales en cada punto, por su área de influencia (N.F. Ortega, y J.V. Arias, 1998; S.I. Robles y N.F. Ortega, 2001). Presentan la ventaja de que tienen en cuenta un mayor volumen de información, tal que si se produce un error en alguna de las mediciones, la misma tendría una menor influencia.

En la gráfica de la Figura 23 se representa el Desplazamiento Volumétrico de una Viga de Fundación en función de los parámetros Profundidad de Fisura ( $a/h$ ) y Ubicación ( $X$ ). Mediante esta gráfica se puede determinar la severidad del daño, ingresando a la misma con el Desplazamiento Volumétrico y la ubicación del daño ( $X$ ), procediéndose de igual manera que lo descripto en los párrafos anteriores.

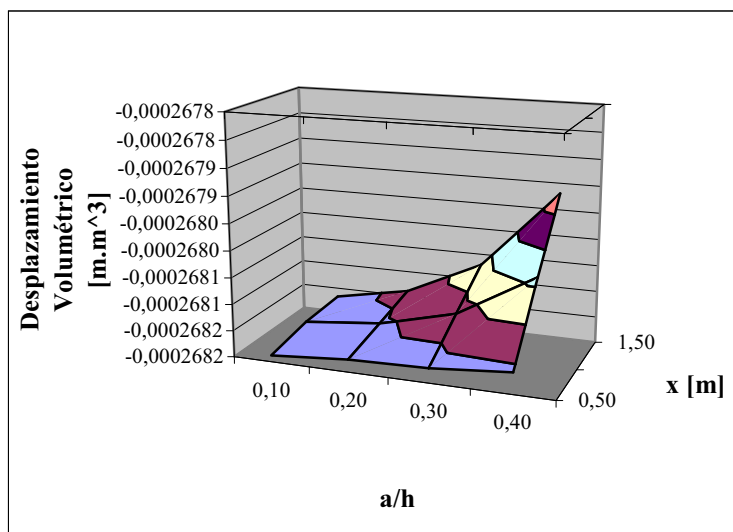


Figura 15: Desplazamientos Volumétricos, en función de la Ubicación ( $x$ ) y Severidad del Daño ( $a/h$ ).

### 3 CONCLUSIONES

La técnica aquí presentada es una importante herramienta, para ser empleada al estudiar patologías estructurales, tal que permite determinar la existencia de daño, localizarlo y cuantificarlo. Además, permite realizar un seguimiento de la evolución del daño que tiene una estructura (aumento de la profundidad de fisuración). Como se ha podido apreciar en la aplicación de esta técnica, se deben combinar modelos numéricos de análisis y mediciones experimentales (Desplazamientos Verticales), que no afectan a la integridad estructural, por estos motivos se la puede considerar como una técnica no destructiva de análisis.

Para los casos analizados se puede arribar a las siguientes conclusiones:

#### 3.1 Fisura en placa o fisura en viga

Realizando mediciones de los Desplazamientos Verticales sobre la viga se puede detectar y localizar fisuras que están tanto en la viga, como en la placa, debido a que el cambio en la Curvatura de los diagramas es suave, cuando el daño esta en la placa, y presenta una discontinuidad, cuando el daño esta en la viga.

Efectuando mediciones sobre la viga se puede detectar el entorno de la zona con daño, en la placa, siempre que las fisuras sean mayores que el 60% del espesor de la placa.

Midiendo los Desplazamientos Verticales sobre la placa se podrían detectar y localizar fisuras que están en la viga o en la placa, debido a que el cambio en la curvatura de los diagramas es suave, cuando el daño esta en la viga, y presentan una discontinuidad, cuando el daño esta en la placa.

Al medir los efectos de las fisuras en viga, sobre la placa, se observa que en cercanías de los extremos existe una distorsión en la ubicación de la fisura.

El seguimiento de las Variación del Desplazamiento Vertical en las zonas próximas a las columnas, es más sensible que el método de las Curvatura de la Elástica.

### 3.2 Fisuras en viga y en placa simultáneamente

Si se mide a los Desplazamientos Verticales sobre la viga, solo se podrá detectar fisuras que están en la viga, pasando casi inadvertidas las fisuras sobre la placa.

Cuando la medición se efectúa sobre la placa se pueden detectar fisuras que están en la viga y en la placa, se las diferencia gracias a que la curvatura cambia suavemente cuando el daño esta en la viga, y presenta una discontinuidad cuando el daño esta en la placa.

## 4 AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento al Departamento de Ingeniería y a la Secretaría General de Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional del Sur, por el apoyo brindado para el desarrollo de estas investigaciones.

## 5 REFERENCIAS

- P. Rizos, N. Aspragathos and A. Dimagoras, Identification of crack location and magnitude in a cantilever beam from the vibration modes, *Journal of Sound and Vibration*, 138(3), 381-388, 1990.
- A. Dimagoras. Vibration of cracked structures: a state of the art review, *Engineering Fracture Mechanics*, 55(5), 831-857, 1996.
- O. Salawu. Detection of structural damage through changes in frequency: a review article, *Engineering Structures*, 19(9), 718-723, 1997.
- X. Yang, S. Swamidas and R. Seshadri. Crack identification in vibrating beams using the energy method, *Journal of Sound and Vibration*, 244(2), 339-357, 2001.
- J. Kim and N. Stubbs. Crack detection in beam – type structures using frequency data. *Journal of Sound and Vibration*, 259(1), 145-160, 2003.
- G. Owolabi, A. Swamidas and R. Seshadri. Crack detection in beams using changes in frequencies and amplitudes of frequency response functions. *Journal of Sound and Vibration*, 256, 1-22, 2003.
- J. Chou and J. Ghaboussi. Genetic algorithm in structural damage detection, *Computers & Structures*, 79, 1335-1353, 2001.
- I. Choi et. al.. Development of elastic damage load theorem for damage detection in statically determinate beam, *Computers & Structures*, 82, 2483-2492, 2004.
- D. Maity and A. Saha. Damage assessment in structures from changes in static parameter using neural networks, *Sādhanā*, 29(3), 315-327, 2004.
- S. Suresh et. al.. Identification of crack location and depth in a cantilever beam using a modular neural network approach. *Smart Materials and Structures*, 13, 907-915, 2004.
- T. Sain Chandra and J. M. Kishen. Damage and residual life assessment of structures using fracture mechanics. *Procc. 16<sup>th</sup> ASCE Engineering Mechanics Conference*, University of Washington, Seattle, 2003.
- S. Caddemi and A. Morassi. A procedure for multiple damage identification in elastic beams. *Procc. World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization*, Río de Janeiro, Brazil, 2005.

- F. Jiang et al.. Crack length calculation for bend specimens under static and dynamic loading. *Engineering Fracture Mechanics*, 71, 1971-1985, 2004.
- Algor15 Professional Mech/VE, *Docutech, Linear Stress and Dynamics*, Reference Division. Pittsburgh, Pennsylvania, 2001.
- Q. Lu, G. Ren, Y. Zhao. Multiple damage location with flexibility curvature and relative frequency change for beam structure. *Journal of Sound and Vibration*, 253(5), 1101-1114, 2002.
- S.I. Robles and N.F. Ortega, "Study of Volumetric Displacements of Shells" *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*, 42(137), 139-147, 2001.
- N.F. Ortega, and J.V. Arias. Comparison of Mechanical Efficiency Between an Hyperbolic Paraboloid and a Experimental Model, *Procc. IV World Congress on Computational Mechanics*, Buenos Aires, 1998.