

## DETECCIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE DAÑO EN ESTRUCTURAS LAMINARES

**Sandra I. Robles, Néstor F. Ortega**

Departamento de Ingeniería  
Universidad Nacional del Sur  
Av. Alem 1253, 8000 Bahía Blanca, Argentina  
e-mail: nfortega@criba.edu.ar

**Palabras Claves:** Estructuras Laminares, Detección de Daño, Desplazamientos, Cargas Estáticas.

**Resumen.** Los Desplazamientos de una estructura son una función de su geometría, de las propiedades del material y de las cargas actuantes. La presencia de fisuras en las estructuras origina cambios en la flexibilidad local de la misma, que se traducen en variaciones de su comportamiento estático y dinámico. En este trabajo se presenta una metodología, cuyo objetivo es la detección de daño a través de los valores de Desplazamientos, producidos por la acción de cargas estáticas.

Se estudia el comportamiento mecánico, de una estructura laminar cilindro-parabólica de hormigón armado, pretendiendo ubicar la zona afectada y cuantificar el daño. Para ello se realizaron simulaciones numéricas, con modelos analizados por el Método de los Elementos Finitos, donde el daño que afecta a la rigidez de la zona deteriorada, se modela considerando alteraciones del Momento de Inercia. Para estos análisis se emplean varios parámetros, tal es el caso de los Desplazamientos Verticales, los Desplazamientos Volumétricos, la Curvatura de la Elástica, y la Variación de la Curvatura de la Elástica, estudiándose la sensibilidad de cada uno de ellos, en función de la ubicación y magnitud del daño (superficie y profundidad de la zona afectada). Se debe tener presente que los valores de los Desplazamientos pueden obtenerse en forma experimental, ya sea medidos en la estructura real o bien en un modelo experimental, o mediante el uso de modelos numéricos.

Para la detección y localización del daño se presentan tres técnicas. La primera está relacionada con la variación de la flexibilidad de la estructura afectada, respecto de la misma estructura sin daño, considerando como parámetro, relacionado al cambio de flexibilidad, los Desplazamientos Verticales. La segunda técnica, se basa en la Curvatura de la Elástica, y la tercera, en la Variación de la Curvatura de la Elástica, en estas dos últimas técnicas se utiliza el Método de Diferencias Finitas para calcular las curvaturas. Estas curvaturas presentan cambios abruptos en las secciones dañadas, permitiendo la localización de dichas zonas.

## 1 INTRODUCCION

La definición de daño estructural esta relacionada a los cambios en las propiedades materiales y/o geométricas de los sistemas, incluyendo las variaciones en las condiciones de borde y en la conectividad del sistema, que afectan adversamente su futuro rendimiento. Una estructura se puede dañar por diversas causas, sobrecargas accidentales que excedan aquellas para las cuales la estructura fue diseñada, por el cambio o deterioro de sus propiedades físicas o mecánicas en el tiempo, por la influencia del medio ambiente, entre otras. La posibilidad de prevenir la ocurrencia de fallas por afectaciones que puedan surgir luego de la construcción de la estructura, a través de una detección temprana de los mismos, ha motivado a los investigadores a desarrollar métodos de evaluación, basados en ensayos destructivos y no destructivos, que permitan conocer la condición de los elementos estructurales.

Entre los métodos no destructivos, están aquellos que se basan en establecer el cambio de la respuesta dinámica de la estructura, los que consideran las variaciones de las propiedades dinámicas, es decir sus frecuencias naturales, modos de vibración, respuesta en frecuencias, etc., debido a la presencia de daño, basados en esta metodología hay una extensa cantidad de trabajos de investigación publicados (Rizos, Aspragathos and Dimagoras, 1990; Dimagoras, 1996; Salawu, 1997; Yang, Swamidas and Seshadri, 2001; Kim and Stubbs, 2003; Owolabi, Swamidas and Seshadri, 2003). Comparativamente, existen pocos trabajos sobre identificación de daño, basado en la respuesta estática de una estructura (Chou and Ghaboussi, 2001; Choi et. al., 2004; Maity and Saha, 2004; Suresh et. al., 2004; Chandra Kishen, 2003; Caddemi and Morassi, 2005), pese a que, normalmente, el diseño y análisis de la mayoría de las estructuras civiles, se realiza con este tipo de cargas.

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, las Deformaciones, etc. Dependiendo de la estructura que se analiza y del equipamiento disponible para realizar las mediciones in-situ, será más conveniente uno u otro método y en algunos casos ambos, usados en forma complementaria (Jiang et al, 2005)

Se debe mencionar que, un algoritmo de identificación de daño incluye cuatro etapas diferentes del análisis: la determinación de la presencia de daño, la localización, la cuantificación y por último, la predicción de la vida y/o resistencia residual de la estructura.

En este trabajo se presenta la aplicación de una metodología no destructiva para la identificación de daño, basada en la respuesta estática de estructuras laminares de hormigón armado, trabajándose con las tres primeras etapas, detección, localización y cuantificación del daño estructural.

## 2 DETECCIÓN LOCALIZACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE DAÑO

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

Los Desplazamientos y las Deformaciones de una estructura son funciones de su geometría, de las propiedades del material y de las cargas actuantes. El daño puede presentarse como un cambio en las propiedades del material o bien un cambio en su geometría. En este trabajo, el daño se modela mediante un cambio en la geometría, a través de la alteración del espesor de la lámina en la zona deteriorada, con lo cual se afecta al Momento de Inercia de la misma. Se presentan tres métodos que pueden ser utilizados para detectar y

localizar daño en estructuras, basados en el análisis de su respuesta estática, en este caso la variable medida son los Desplazamientos Verticales. Además, se presenta un método que permite la cuantificación del daño, sin que provea una solución explícita al problema inverso, debido a que está basada en métodos numéricos.

Se realizaron modelos representativos de la estructura con y sin daño, de una lámina cilindro-parabólica de hormigón armado, los cuales fueron analizados mediante un software que emplea el Método de los Elementos Finitos (Algor15; 2002), obteniéndose los valores de los Desplazamientos Verticales en distintos puntos de su superficie.

Se debe tener presente que los valores de los Desplazamientos pueden obtenerse en forma experimental, ya sea medidos en la estructura real o bien en un modelo experimental a escala, o mediante el uso de modelos numéricos. Por ello, en función de los errores que se presentan en el modelado numérico (modelado de la malla, propiedades mecánicas del material, materialización de vínculos, etc.) y la sensibilidad de la medición in-situ, es decir, los errores del instrumental que se emplearía en las mediciones experimentales, y los errores humanos al realizar las mediciones, se podrán presentar dos situaciones, una en la que las diferencias entre el modelo numérico y las mediciones experimentales, permite asegurar que existe un daño estructural y otra donde no se puede afirmar esto último. Cabe acotar que, esta observación es aplicable para cualquiera de las tres etapas de las técnicas aquí presentadas.

## 2.1 Modelado numérico

En la Figura 1, se muestra el modelo utilizado en este trabajo con sus dimensiones. La geometría representada corresponde al plano medio de la lámina analizada. La luz, cuya dirección coincide con el eje "x", tiene una magnitud de 15 m. El largo, cuya dirección coincide con la del eje "y", tiene una magnitud total de 40 m, separada en cuatro tramos de 10 m. El espesor de la lámina (h), es de 0.10 m. En la zona próxima a las columnas en la dirección del largo, el espesor se incrementa gradualmente hasta llegar a 0.30 m. Los bordes extremos, en la dirección x, son bordes libres, con el mismo espesor que el resto de la lámina.

El modelo fue construido con elementos rectangulares plate/shell, representando la lámina; en las zonas de encuentro con las columnas y tensores se densificó la malla, empleando elementos triangulares. Para las columnas se utilizaron elementos beam y elementos truss, para representar los tensores. El total de elementos fue de aproximadamente 8500. El estado de cargas aplicada corresponde al peso propio de la estructura más una sobrecarga vertical de  $1000 \text{ N/m}^2$ . Las propiedades del material con las que se realizaron los modelos son:  $E = 2.0684 \text{ E}+10 \text{ [N/m}^2\text{]}$ ;  $\mu = 0.15$  y  $\rho = 2404.6 \text{ [Kg/m}^3\text{]}$  correspondientes a un hormigón de resistencia media.

En virtud de que las láminas poseen muy buen comportamiento mecánico y en general, son poco sensibles a la aparición de afectaciones, de dimensiones reducidas sobre su superficie, se modelaron distintos tamaños de zonas afectadas (cuyas dimensiones mínimas son  $0.40\text{m} \times 0.40\text{m}$ ), mediante la disminución de la rigidez de la misma, variando su espesor. De esta manera se simuló las condiciones que se presentan en una zona fisurada de la lámina, cuyo origen podría estar vinculado con la aparición de alguna carga concentrada no prevista y/o con los efectos producidos por la corrosión de las armaduras de la lámina, por ejemplo por no tener una adecuada aislación hidrófuga.

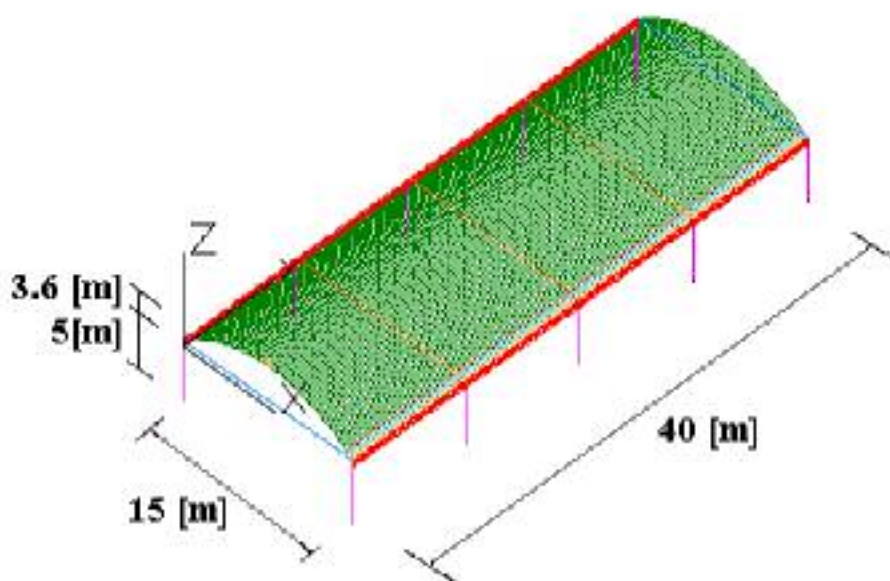


Figura 1: Modelo de la estructura laminar cilindro-parabólica de hormigón armado

## 2.2 Detección y localización de daño en estructuras laminares cilindro-parabólica

El análisis de las curvas que representan el Desplazamiento Vertical de una estructura con alguna afectación y su comparación con la curva correspondiente a la misma estructura sin daño, metodología ya aplicada por los autores (Robles and Ortega, 2005), permite una fácil detección del deterioro en estructuras planas. En estructuras laminares, que es el objeto central de estudio en este trabajo, las curvas de Desplazamientos Verticales no resultan ser un buen indicador de la presencia de daño, debido a que los Desplazamientos Verticales, por la eficiencia de la forma adoptada, son pequeños. Por ese motivo, se ha recurrido a otras metodologías de mayor confiabilidad y sensibilidad. En estructuras laminares, la detección y localización de daño se realiza en forma conjunta. En este tipo de estructuras, dependiendo de la ubicación de la zona afectada, algunos de los métodos que se presentan a continuación, solo permiten evaluar la presencia del daño, sin poder localizarlo. Los métodos que se presentan son:

- Variación de los Desplazamientos Verticales;
- Curvatura de la Elástica; y
- Variación de la Curvatura de la Elástica.

### 2.2.1 Método de la Variación de los Desplazamientos

Este método se basa en la realización de una gráfica donde se representan las diferencias existentes 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 de la misma, y se lo define como:

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

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

Si se dispone de estos datos en varios puntos, la gráfica de los mismos permite tanto detectar o estimar la localización del daño.

### 2.2.1.1 Análisis del modelo con daño en el borde libre

En las Figuras 2 a 4 se representa la variación de los Desplazamientos Verticales de una estructura laminar cilindro-parabólica con daño de dimensiones de 0.80x0.80 m, ubicado en el borde libre. En este caso se representan tres escenarios de daño en las siguientes ubicaciones,  $x = 7.4$  m (Figura 2);  $x = 14$  m (Figura 3) y  $x = 11$  m (Figura 4). Se consideraron distintas severidades de daño (relaciones de  $a/h$ , donde “a” es la profundidad del daño y “h” es el espesor total de la lámina, en este caso de 0.1 m).

Se encontró que en el lugar donde está el daño, se produce el cambio de pendiente en las Variaciones de los Desplazamientos Verticales y por consiguiente también varía el signo de la curvatura.

Como se puede observar en las Figuras 2 y 3, la máxima diferencia ocurre en la zona de la afectación. Además, a medida que la relación  $a/h$  se incrementa, es decir cuando el daño es más severo, esta diferencia es mayor.

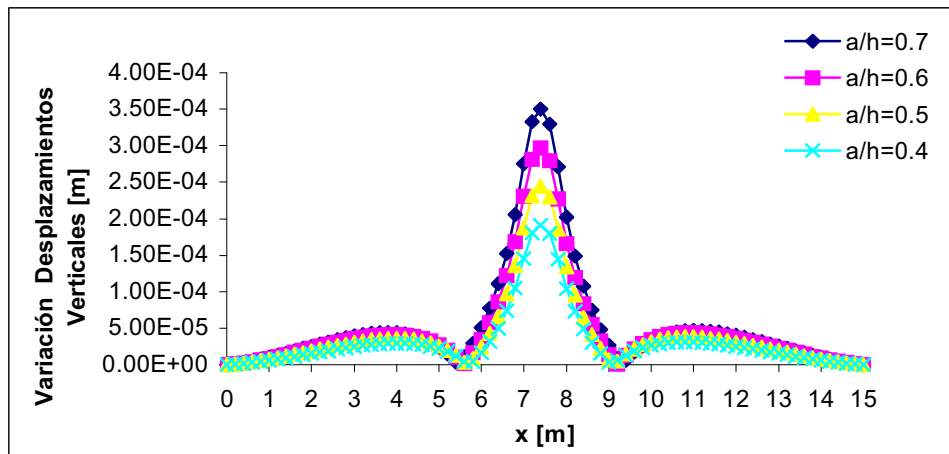


Figura 2: Variación de los Desplazamientos Verticales con daño de distintas severidades en  $x = 7.4$  m,  $y = 0$  m

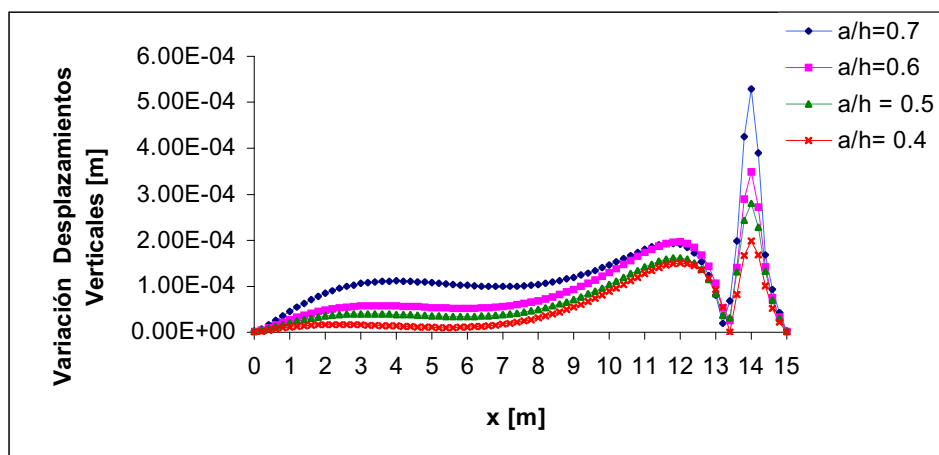


Figura 3: Variación de los Desplazamientos Verticales con daño de distintas severidades en  $x = 14$  m,  $y = 0$  m

Se debe notar que cuando el daño esta ubicado en  $x = 11$  m, si bien las curvas en ese punto presentan un cambio de pendiente de las Variaciones de los Desplazamientos Verticales y por consiguiente también varía el signo de la curvatura, lo cual permite localizar la zona dañada, las diferencias entre las curvas que representan las diferencias de los Desplazamientos

Verticales en función de la magnitud del daño, son mínimas en esa zona, incrementándose al alejarse de la misma. En otras palabras, el método pierde sensibilidad, para realizar la estimación de la severidad del daño, en la medida que la zona afectada se encuentra en la zona conocida como el “riñón del arco”.

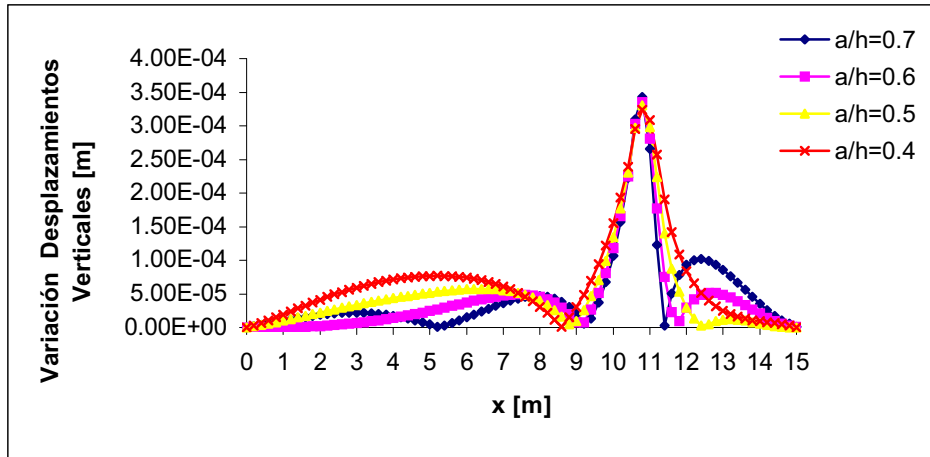


Figura 4: Variación de los Desplazamientos Verticales con daño de distintas severidades en  $x = 11$  m,  $y = 0$  m

### 2.2.1.2 Análisis del modelo, con daño en el medio del tramo

Las Figura 5, 6 y 7 muestran las gráficas de la variación de los Desplazamientos Verticales cuando el daño está ubicado en el medio de uno de los tramos, según la dirección del largo de la estructura, es decir en la dirección del eje “y”, en distintas ubicaciones en la dirección de la luz, eje “x”. En estas figuras se aprecia que en la zona afectada aparece una leve perturbación, que se puede llegar a confundir con las variaciones que tienen este parámetro en las zonas no afectadas. Por ello, se puede concluir que, esta metodología si bien es un buen índice para detectar la existencia de daño, en general, no es muy sensible para la localización del mismo cuando está ubicado en esta zona.

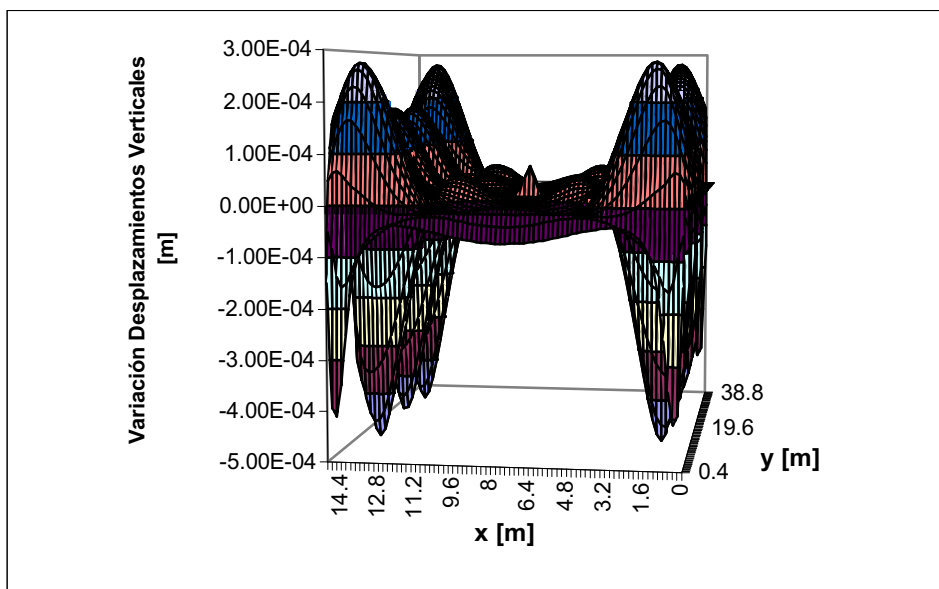


Figura 5: Variación de los Desplazamientos Verticales, con daño en  $x = 7.4$  m,  $y = 15$  m,  $a/h = 0.5$

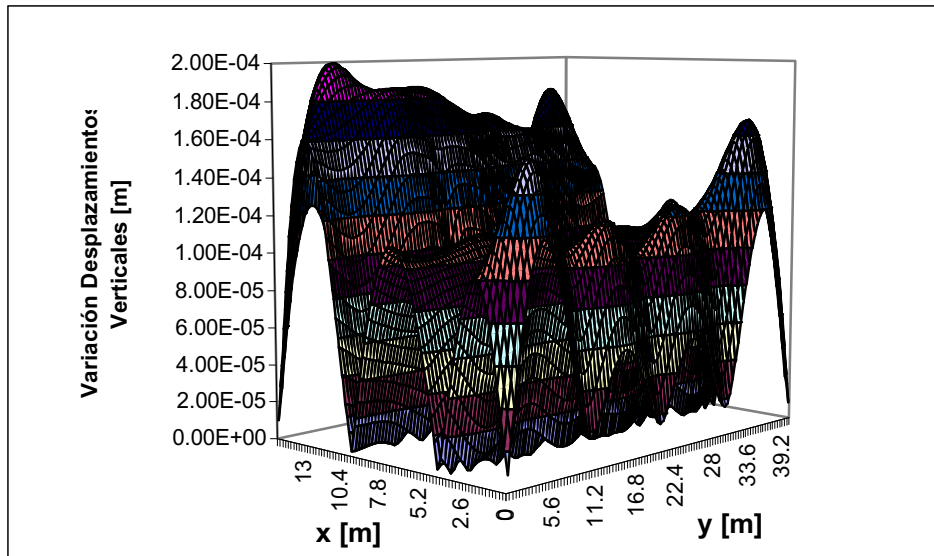


Figura 6: Variación de los Desplazamientos Verticales, con daño en  $x = 11$  m,  $y = 15$  m,  $a/h = 0.5$

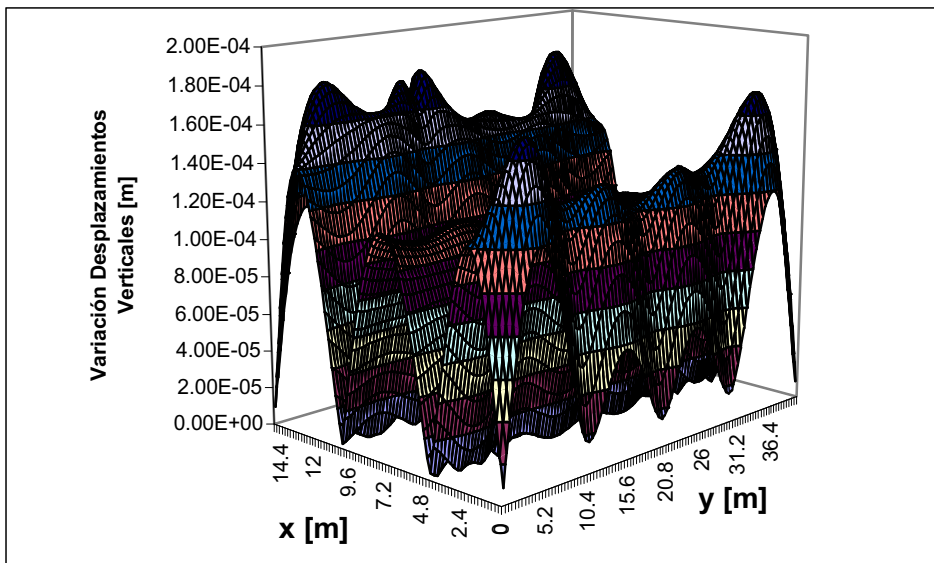


Figura 7: Variación de los Desplazamientos Verticales, con daño en  $x = 14$  m,  $y = 15$  m,  $a/h = 0.5$

### 2.2.1.3 Análisis del modelo, con daño en la zona sobre el tensor

Las Figuras 8, 9 y 10 representan la Variación de los Desplazamientos Verticales, cuando la afectación se encuentra sobre el tensor, zona de unión de los tramos, y en distintas ubicaciones según la dirección de la luz de la estructura, en la dirección del eje "x". En las mismas se observa que cuando la afectación tiene estas ubicaciones, el gráfico varía abruptamente, por ello esta técnica se puede usar tanto para detectar, como para localizar el daño en la estructura.

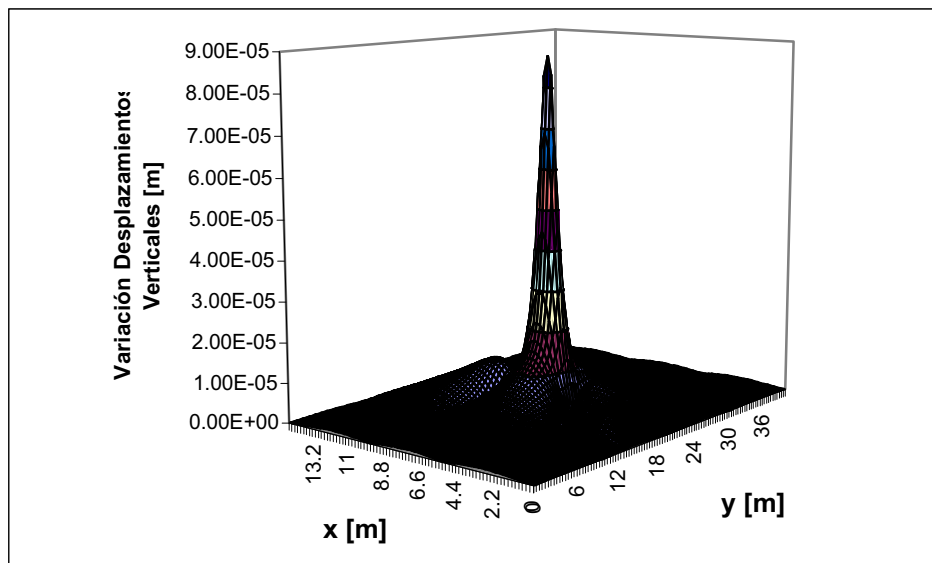


Figura 8: Diferencia de Desplazamientos Verticales, daño ubicado en  $x = 7.4$  m,  $y = 20$  m,  $a/h = 0.5$

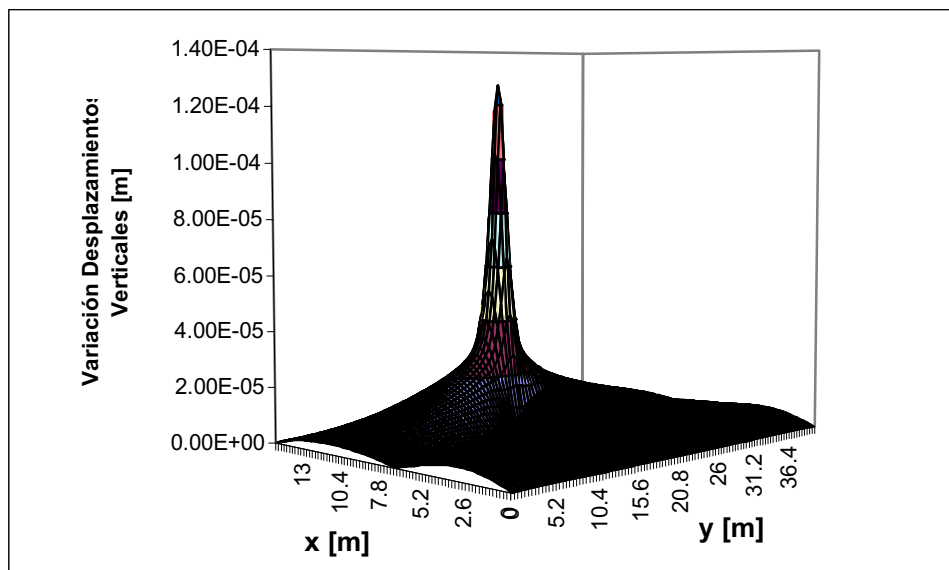


Figura 9: Diferencia de Desplazamientos Verticales, daño ubicado en  $x = 11$  m,  $y = 20$  m,  $a/h = 0.5$



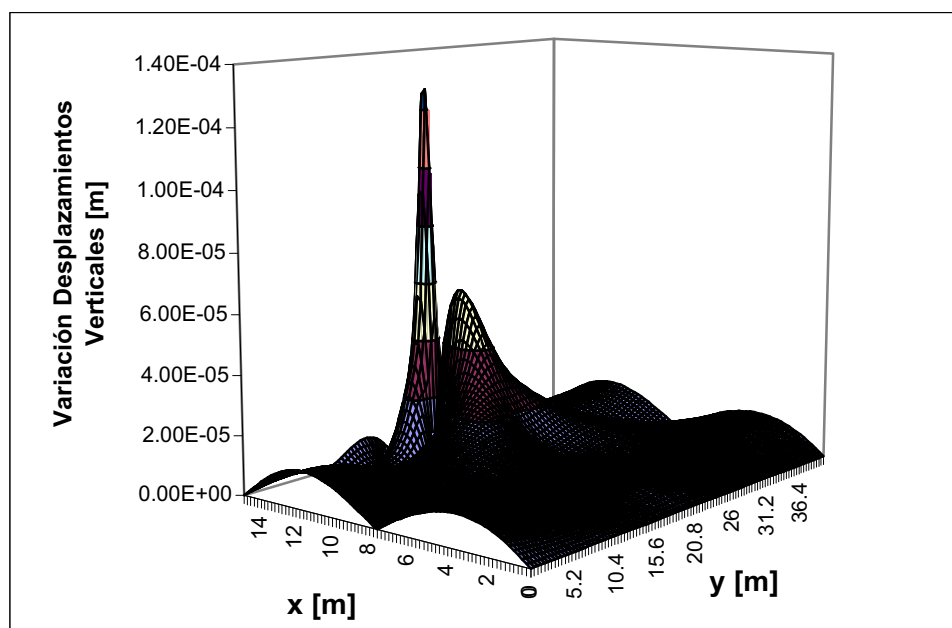


Figura 10: Variación de los Desplazamientos Verticales, daño ubicado en  $x = 14$  m,  $y = 20$  m,  $a/h = 0.5$

Del análisis de los resultados presentados en los Puntos 2.2.1.1 al 2.2.1.3, se puede concluir que la metodología basada en la Variación de los Desplazamientos Verticales, en el caso de estructuras laminares, es de utilidad en la detección del daño. Para la localización no resulta ser un buen índice, debido a que la sensibilidad de este parámetro, depende fuertemente de la ubicación de la afectación.

## 2.2.2 Método de la Curvatura de la Elástica

Los valores de los Desplazamientos Verticales obtenidos en determinados puntos de la estructura, ya sea mediante medición experimental, o como en este caso, mediante simulación numérica, se pueden utilizar para obtener la Curvatura en distintos puntos de la estructura deformada, mediante una aproximación por Diferencias Finitas Centrales. De esta manera, la Curvatura de la Elástica está dada por (Lu, Ren and Zhao, 2002):

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

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

donde  $h$  es la distancia entre dos puntos adyacentes (paso), mientras que  $y$  es el Desplazamiento Vertical 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 ventaja cuando no se dispone de la misma.

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

### 2.2.2.1 Análisis del modelo con el daño en el borde

En la Figura 11, se muestra la Curvatura de la Elástica, calculada según la Ecuación (2), para cada punto de la malla, con el daño en  $x = 7.4$  m y cuya severidad es  $a/h = 0.5$ . En dicha

figura se observa, en la zona dañada un salto, igual comportamiento se presenta cuando el daño esta ubicado en la zona del centro de la luz. En el caso de tener la afectación en la zona cerca de la viga no se visualiza dicho salto.

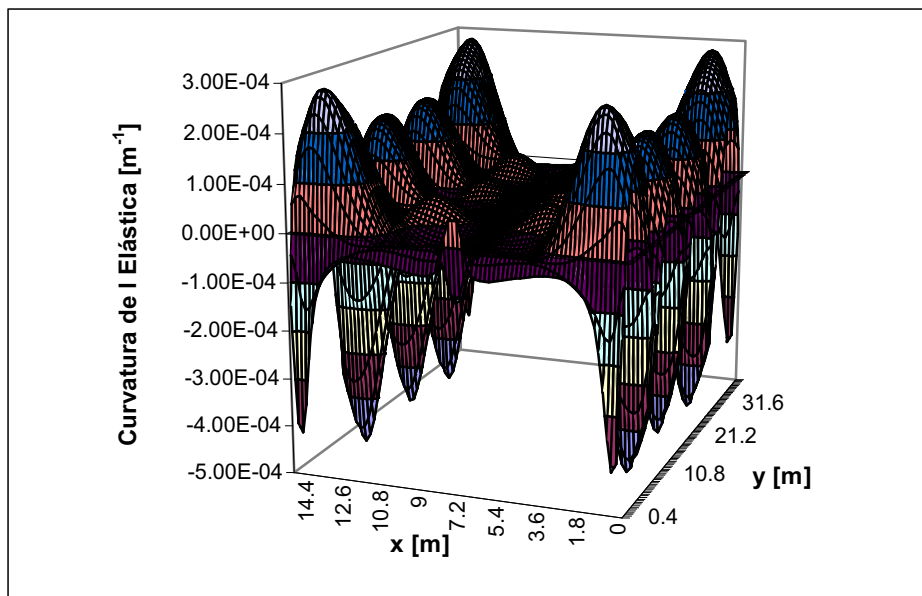


Figura 11: Curvatura de la Elástica, con daño en  $x = 7.4$  m,  $y = 0$  m,  $a/h = 0.5$

### 2.2.2.2 Análisis del modelo con el daño en el medio de uno de los paños

Analizando la Figura 12, donde se muestra la Curvatura de la Elástica en función de la ubicación de cada punto de la malla, con daño en la ubicación correspondiente a  $x = 14$  m y con  $a/h = 0.5$ , se observa que en la zona dañada presenta un salto pronunciado. Cuando la zona dañada esta ubicada, en la zona central o en el riñón del arco no se comporta de esta manera, presentando variaciones relativas mucho menores. Por ello en estos casos, es muy difícil poder individualizar la existencia del daño.

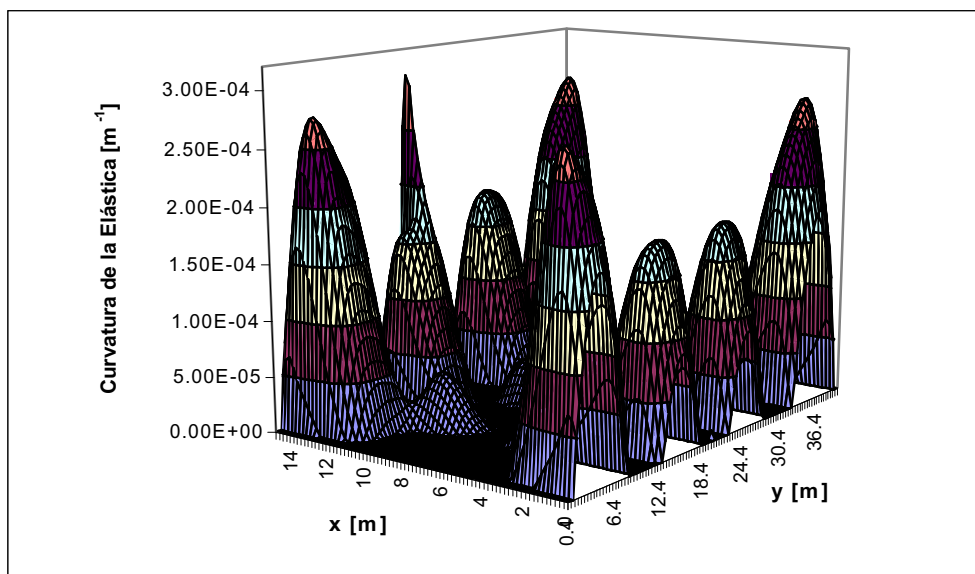


Figura 12: Curvatura de la Elástica de, con daño en  $x = 14$  m ,  $y = 15$  m,  $a/h = 0.5$

### 2.2.2.3 Análisis del modelo con el daño sobre el tensor

Cuando el daño se encuentra sobre el tensor, por ejemplo en  $x = 11$  m, con una severidad  $a/h = 0.5$ , se analiza la Curvatura de la Elástica en función de la ubicación de cada punto de la malla (Figura 13) observándose que en la zona dañada presenta un salto pronunciado; este mismo comportamiento se aprecia cuando la zona afectada se encuentra en la zona central. Cuando la zona dañada esta ubicada, según la dirección del ancho de la estructura, cerca de la viga no se comporta de esta manera, presentando una discontinuidad difícil de individualizar.

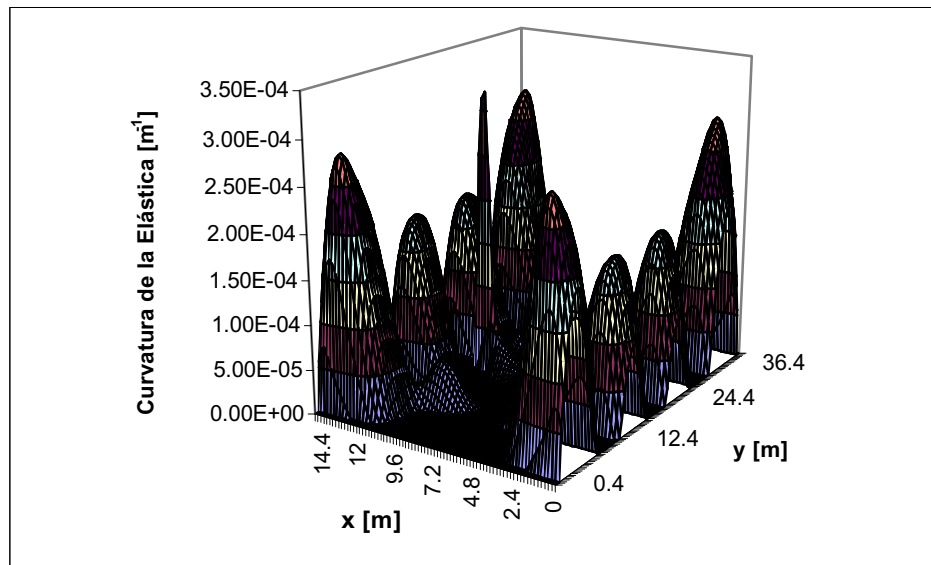


Figura 13: Curvatura de la Elástica con daño en  $x = 11$  m,  $y = 20$  m,  $a/h = 0.5$

### 2.2.2 Método de la Variación de la Curvatura de la Elástica

Los valores de los Desplazamientos Verticales obtenidos en determinados puntos de la estructura con daño y sin daño, ya sea determinados mediante mediciones experimentales, o como en este caso, con una simulación numérica, se pueden utilizar para obtener la Curvatura de la estructura deformada con daño y sin daño, aplicando una aproximación por Diferencias Finitas Centrales empleando la Ecuación (2).

Lo que se propone en este trabajo, es utilizar la diferencia entre la Curvatura de la estructura deformada con daño (cd) y la correspondiente sin daño (sd), como parámetro para la localización de daño, es decir:

$$\text{Variación de la Curvatura de la Elástica} = \left[ \left( \frac{d^2 y}{dx^2} \right)_{cd} - \left( \frac{d^2 y}{dx^2} \right)_{sd} \right] \quad (3)$$

Es importante mencionar que, aunque este método depende de la información de la estructura sin daño, es el que presenta mayor sensibilidad para la localización del daño, en el caso de la estructura laminar aquí estudiada, independientemente de la ubicación y severidad del daño.

En las estructuras laminares debido a la forma de la curva que representa a los Desplazamientos Verticales en función de las coordenadas del punto, correspondientes a la estructura sin daño, el gráfico de la curvatura no presenta una forma suave, por ello al realizar la diferencias entre ambas curvas, con y sin daño, nos aseguramos que 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 este parámetro.

### 2.2.2.1 Análisis del modelo con el daño en el borde

En la Figura 14, se muestra la Variación de la Curvatura de la Elástica en función de la ubicación de cada punto de la malla, con daño en la ubicación correspondiente a  $x = 11$  m y con  $a/h = 0.5$ . En esta gráfica se observa que en la zona dañada presenta un salto pronunciado; este mismo comportamiento se aprecia cuando la zona afectada se encuentra en  $x = 7.2$  m y en  $x = 14$  m.

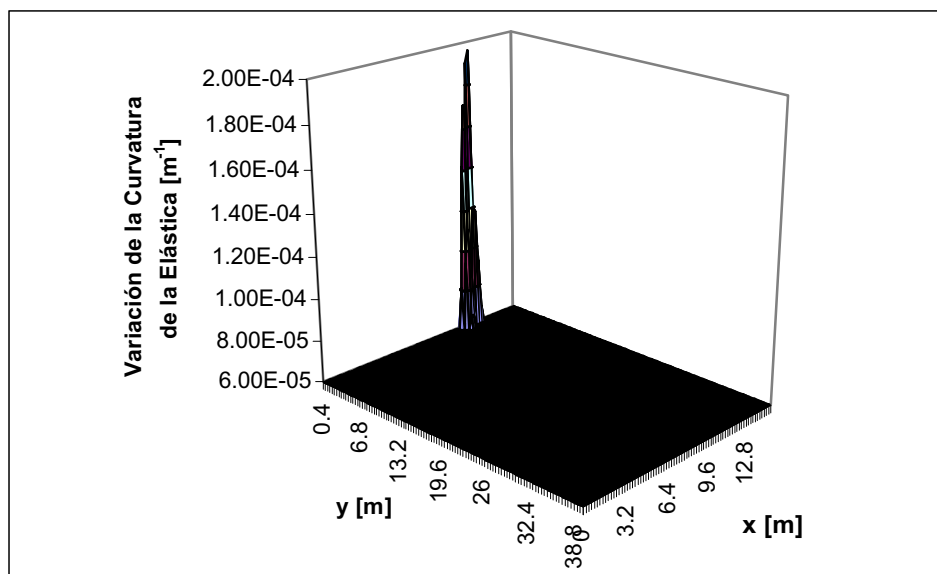


Figura 14: Variación de la Curvatura de la Elástica con daño en  $x = 11$  m,  $y = 0$  m,  $a/h = 0.5$

### 2.2.2.2 Análisis del modelo con el daño en el medio de uno de los paños

Estudiando la Figura 15, donde se muestra la Variación de la Curvatura de la Elástica en función de la ubicación de cada punto de la malla, con daño en la ubicación correspondiente a  $x = 11$  m y con  $a/h = 0.5$ , se observa que la zona dañada presenta un salto pronunciado. Cabe acotar que este mismo comportamiento se aprecia cuando la zona afectada se encuentra en  $x = 7.2$  m y en  $x = 14$  m.

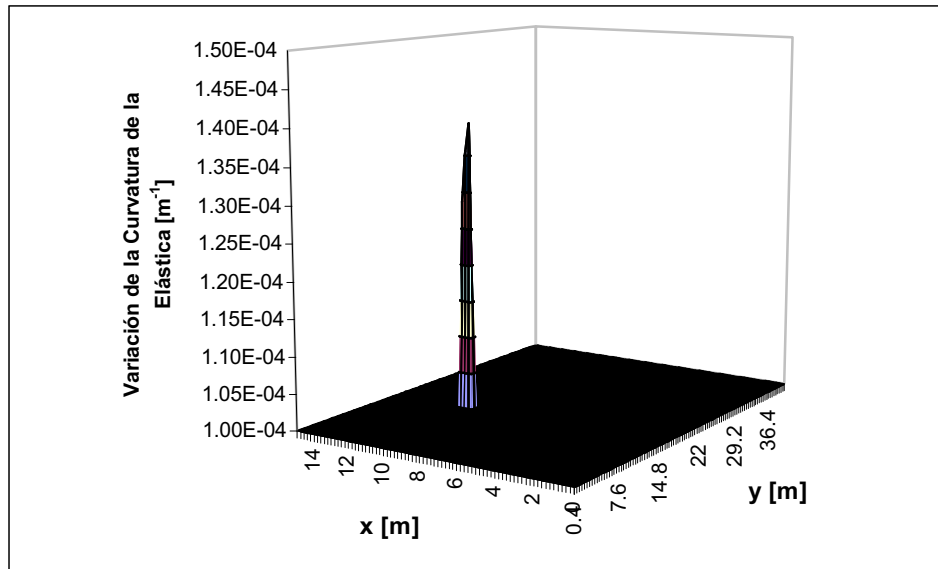


Figura 15: Variación de la Curvatura de la Elástica con daño en  $x = 11\text{ m}$ ,  $y = 15\text{ m}$ ,  $a/h = 0.5$

### 2.2.2.3 Análisis del modelo con el daño en sobre el tensor

En la Figura 16, se muestra la Variación de la Curvatura de la Elástica en función de la ubicación de cada punto de la malla, con daño en la ubicación correspondiente a  $x = 11\text{ m}$  y con  $a/h = 0.5$ . En esta gráfica se tiene que la zona dañada presenta un salto pronunciado; este mismo comportamiento se aprecia cuando la zona afectada se encuentra en  $x = 7.2\text{ m}$  y en  $x = 14\text{ m}$ .

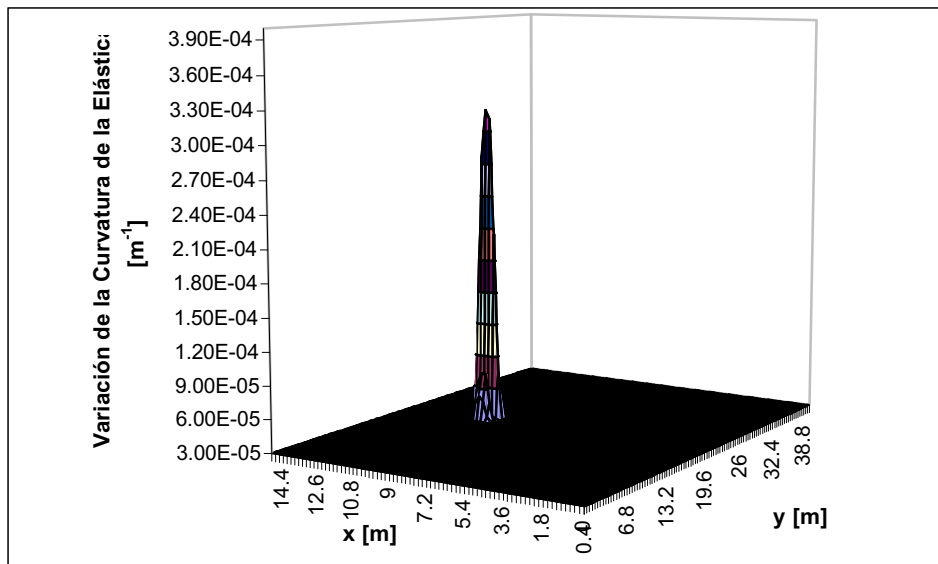


Figura 16: Variación de la Curvatura de la Elástica con daño en  $x = 11\text{ m}$ ,  $y = 20\text{ m}$ ,  $a/h = 0.5$

## 2.3. Análisis de los resultados de las técnicas de detección y localización en estructuras laminares cilindro-parabólica

En la Tabla 1, se muestra a manera de resumen, el potencial de las distintas técnicas presentadas, para ser aplicadas como metodología de localización de daño o simplemente para

la detección del mismo, en función de la ubicación de la afectación. En la misma, se aprecia que la técnica de localización con mejor sensibilidad y aplicabilidad, es la correspondiente a la Variación de la Curvatura de la Elástica, la cual provee buenos resultados independientemente de la ubicación de la zona dañada.

Tabla 1: Técnicas presentadas y su aplicabilidad como técnica de detección (D) o localización (L), en función de la ubicación de la afectación

UBICACIÓN SEGÚN LA DIRECCIÓN Y	METODOLOGÍA	UBICACIÓN SEGÚN LA DIRECCIÓN X		
		7.2 m	11 m	14 m
BORDE	Diferencia de Desplazamientos Verticales	L	L	L
	Curvatura de la Elástica	L	L	D
	Diferencia de la Curvatura de la Elástica	L	L	L
MEDIO	Diferencia de Desplazamientos Verticales	L	D	D
	Curvatura de la Elástica	L	D	D
	Diferencia de la Curvatura de la Elástica	L	L	L
TENSOR	Diferencia de Desplazamientos Verticales	L	L	L
	Curvatura de la Elástica	L	L	D
	Diferencia de la Curvatura de la Elástica	L	L	L

En vista de los resultados obtenidos, la técnica que presenta mayor sensibilidad, Variación de la Curvatura de la Elástica, depende de los valores de los Desplazamientos Verticales de la estructura sin daño. Por ello, con la finalidad de cuantificar los errores que se cometerían, si no se dispusiera de las propiedades del hormigón con el cual se construyó la estructura laminar, debido a que poseen una superficie importante, no siempre se puede asegurar que en toda su extensión se mantengan constantes las mismas propiedades mecánicas del hormigón, y no siempre se puede determinar in-situ, con precisión el verdadero valor del Módulo de Elasticidad. Se analizaron modelos con tres valores distintos del Módulo de Elasticidad, en un rango que se corresponde con los valores máximos ( $E = 3.00 \text{ E}+10 \text{ N/m}^2$ ), medio ( $E = 2.0684 \text{ E}+10 \text{ N/m}^2$ ) y mínimos ( $E = 1.50 \text{ E}+10 \text{ N/m}^2$ ) que normalmente posee este material. Las diferencias en los valores de los Desplazamientos Verticales según estos tres modelos, difieren en menos de un 10 %. De esta manera nos aseguramos que en el caso en que los valores de los Desplazamientos Verticales, correspondientes a la estructura sin daño, sean obtenidos numéricamente, el error que se cometería es aceptable, y no altera significativamente los resultados del proceso para la detección, localización y cuantificación del daño.

## 2.4 Cuantificación del daño

Una vez localizado el daño, mediante algunas de 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 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 algunas de

las técnicas presentadas en los puntos anteriores o con el empleo de mediciones experimentales (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 la variación de los parámetros: ubicación, severidad y un tercero, vinculado con el comportamiento mecánico de la estructura dañada por ej.: Desplazamientos Verticales. Luego se ingresa al gráfico, realizado en 3D, con la ubicación del daño  $x/L$ , y con el Desplazamiento medido u otro parámetro mecánico empleado, obteniéndose el valor de  $a/h$  (severidad del daño).

En este estudio se utilizaron como parámetro mecánico a las variaciones en la Curvatura de la Elástica y los Desplazamientos Volumétricos (Robles and Ortega, 2001), con la finalidad de evidenciar cual de ellos es más sensible a la severidad del daño. Respecto del último parámetros mencionado, se puede decir que el mismo tiene en cuenta la variación de los Desplazamientos Verticales, en toda la estructura. Este parámetro se define como la sumatoria de los Desplazamientos Verticales en cada punto, multiplicados por su área de influencia (Ortega and Arias, 1998). Este parámetro presenta 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 el resultado final.

#### 2.4.1 Análisis de los resultados para la cuantificación del daño

En la Tabla 2, se muestran los valores correspondientes a los parámetros Desplazamientos Volumétricos y Variación de la Curvatura de la Elástica, en función de las distintas relaciones utilizadas:  $x/L$  (ubicación) y  $a/h$  (severidad). Analizando la misma se concluye que, la Variación de la Curvatura de la Elástica presenta una variación porcentual importante, en el rango de severidades aquí analizadas, independientemente de la ubicación del daño.

Respecto de los Desplazamientos Volumétricos, como se aprecia en la Tabla 2, las variaciones son muy reducidas, por ello teniendo en cuenta los errores que pueden existir en las mediciones, se considera que la sensibilidad de los Desplazamientos Volumétricos es muy baja para poder cuantificar el daño, ni siquiera se lo recomienda para realizar la detección del daño.

Tabla 2: Variación de la Curvatura de la Elástica, y Desplazamiento Volumétrico en función de la ubicación y severidad del daño (para daño en el borde libre)

	Variación de la Curvatura de la Elástica [m <sup>-1</sup> ]			Desplazamiento Volumétrico [m.m <sup>3</sup> ]		
	x/L			x/L		
a/h	7.4 / 15	11 / 15	14 / 15	7.4 / 15	11 / 15	14 / 15
0.7	1.165E-4	4.031E-4	7.888E-4	1.446E-01	1.4453E-1	1.4525E-1
0.6	1.165E-4	2.663E-4	3.945E-4	1.4459E-1	1.4456E-1	1.4507E-1
0.5	1.1620E-4	1.959E-4	3.312E-4	1.4458E-1	1.4459E-1	1.4494E-1
0.4	8.125E-5	1.388E-4	2.612E-4	1.4458E-1	1.4463E-1	1.4485E-1
Variación % Mín y Máx	30.25	65.56	66.78	0.013	0.069	0.27

En la gráfica de la Figura 17, se representan las Variaciones en la Curvatura de la Elástica en función de los parámetros Profundidad de Fisura ( $a/h$ ) y Ubicación del Daño ( $x/L$ ). Mediante esta gráfica se puede determinar la severidad del daño, ingresando a la misma con la

Variación de la Curvatura de la Elástica y la Ubicación del Daño  $x/L$ , procediéndose de igual manera que la descripta en el Punto 2.4.

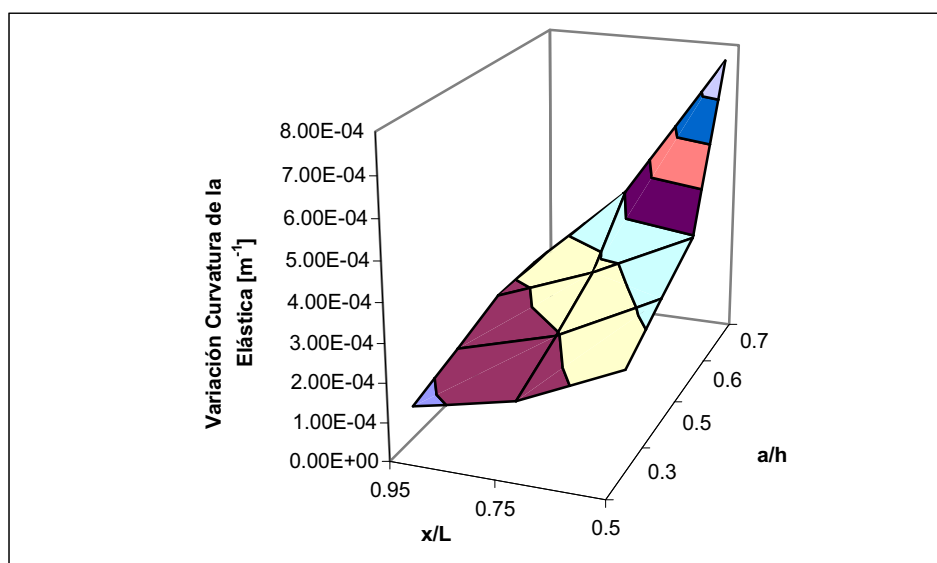


Figura 17: Variación de la Curvatura de la Elástica en función de la ubicación y severidad del daño.

### 3. CONCLUSIONES

Las metodologías para la detección, localización y cuantificación de daño aquí presentadas pueden ser una importante herramienta, para ser empleada al estudiar patologías en estructuras laminares de acceso limitado. Permite además hacer un seguimiento en el tiempo, de la evolución del daño en láminas de hormigón armado, para establecer la Capacidad Portante Residual del elemento afectado.

Es importante destacar que para la detección de daño son aplicables las tres metodologías aquí presentadas, “Diferencia de desplazamientos verticales, Curvatura de la Elástica y Diferencia de la curvatura de la elástica”. En cuanto a la localización, la que tiene una aplicación más generalizada es la que estudia la diferencia de la curvatura de la elástica.

### 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.

### REFERENCIAS

- P. Rizos, N. Aspragathos and A. Dimagoras. Identification of crack location and magnitud 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. *Sadhana* 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, and J.M. Chandra Kishen. Damage and residual life assessment of structures using fracture mechanics. 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. World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization, Río de Janeiro, Brasil, 2005.
- F. Jiang et al. Crack length calculation for bend specimens under static and dynamic loading. *Engineering Fracture Mechanics* 71:1971-1985, 2005.
- Algor15 Professional Mech/VE. Docutech, Linear Stress and Dynamics, Reference Division. Pittsburgh, Pennsylvania. 2001.
- S. Robles, and N. Ortega. Detección de daños en elementos estructurales lineales. *ENIEF 2005. Mecánica Computacional*. 24: 2759-2777, 2005.
- T. Lu, Q. Ren, and G. 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. Robles, and N. Ortega. Study of Volumetric Displacements of Shells. *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures, IASS*, 42(137):139-147, 2001.
- N. 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.