

DETECCION DE DAÑOS EN ELEMENTOS ESTRUCTURALES LINEALES

Sandra I. Robles, Néstor F. Ortega

Departamento de Ingeniería, Universidad Nacional del Sur
8000 Bahía Blanca, Argentina (nfortega@criba.edu.ar)

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

Resumen. *Una fisura en un elemento estructural produce cambios locales en la flexibilidad de la misma, que se traducen en variaciones de su comportamiento estático y dinámico. Cabe acotar que existen muchos trabajos en la literatura, relacionados con la detección de daño, basados en el análisis de parámetros vinculados con las propiedades dinámicas. En este trabajo se presenta una metodología, cuyo objetivo es la detección, localización y cuantificación del daño a través de los valores de desplazamientos, producidos por cargas estáticas. Con el fin de establecer la precisión de los resultados obtenidos en estructuras lineales, se realizaron simulaciones numéricas, analizándolas con el Método de los Elementos Finitos. Para la detección y localización del daño se presentan dos técnicas. La primera está relacionada con la variación de la flexibilidad de la estructura dañada, respecto de la misma estructura sin daño, considerando como parámetro, relacionado al cambio de la flexibilidad, los desplazamientos. La segunda técnica, se basa en la variación de la curvatura de la deformada; la cual se obtiene mediante el Método de Diferencias Finitas. Estas curvaturas presentan cambios abruptos en las secciones dañadas, permitiendo la localización de dichas zonas. Esta técnica tiene la ventaja que solamente requiere, para su análisis, valores de desplazamientos de la estructura dañada. Para la cuantificación del daño, se utilizaron modelos analizados con MEF, donde la fisura se modela geoméricamente, en una zona previamente identificada. Los datos que se disponen son los desplazamientos en distintos puntos y, con el aporte de las técnicas de localización de daño, la ubicación, determinándose la profundidad de fisura.*

Con la finalidad de estimar la sensibilidad de los parámetros considerados, tales como desplazamientos, desplazamientos volumétricos y deformaciones volumétricas, en la metodología de detección de daño aquí presentada, se realizaron simulaciones numéricas con MEF en distintos tipos de estructuras: vigas empotradas, simplemente apoyadas y pórticos, con fisuras de distinta profundidad y en diversas localizaciones.

1 INTRODUCCION

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. 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. Se debe hacer notar que la detección de daño, se puede efectuar mediante métodos basados en ensayos destructivos y no destructivos.

El interés, en ciertos tipos de estructuras, es disponer de una técnica que permita hacer un seguimiento continuo del estado de la estructura. 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, etc., debido a la presencia de daño, los mismos han sido tratados por diferentes investigadores y actualmente se encuentra una gran cantidad de publicaciones¹⁻⁶. Comparativamente, existen pocos trabajos sobre identificación de daño, basado en la respuesta estática de una estructura⁷⁻¹².

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 y las Deformaciones. 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 complementaria¹³.

Se debe mencionar que, un algoritmo de 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 de la estructura.

En este trabajo se presenta la aplicación de una metodología no destructiva para la detección de daño, basada en la respuesta estática (desplazamientos y deformaciones) de estructuras de acero lineales, tales como vigas y pórticos 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 como una fisura discreta, que altera la geometría o más específicamente, el Momento de Inercia de la zona de la estructura que esta 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 métodos numéricos.

Se realizaron dos tipos de modelos, representativos de la estructura con y sin daño, de viga simplemente apoyada, viga en voladizo y un pórtico biarticulado, los cuales fueron analizados mediante un software que emplea el Método de los Elementos Finitos, comercialmente conocido como, Algor15¹⁴, obteniéndose los valores de desplazamientos y deformaciones en distintos puntos.

Se debe tener presente que los valores de los desplazamientos y deformaciones 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.

2.1 Modelación numérica

En las Figuras 1, 2 y 3 se muestran los modelos utilizados en este trabajo con sus dimensiones, y las cargas aplicadas. La Figura 1 corresponde a una viga simplemente apoyada, la Figura 2 a una en voladizo y la Figura 3 a un pórtico biarticulado. Estos modelos fueron analizados considerando una formulación de Estado Plano de Tensiones en 2D, con elementos rectangulares de 4 nodos. El cambio de rigidez, debido al daño, fue modelado mediante la incorporación de una fisura discreta. Las propiedades del material con las que se realizaron los modelos de las Figuras 1 y 2 son: $E = 1.9 \cdot 10^{11}$ [N/m²]; $\mu = 0.29$ y $\rho = 7855$ [Kg/m³] correspondientes al acero. En el caso del pórtico biarticulado, Figura 3, las propiedades del hormigón armado son: $E = 2.06 \cdot 10^{10}$ [N/m²]; $\mu = 0.15$ y $\rho = 2405$ [Kg/m³].

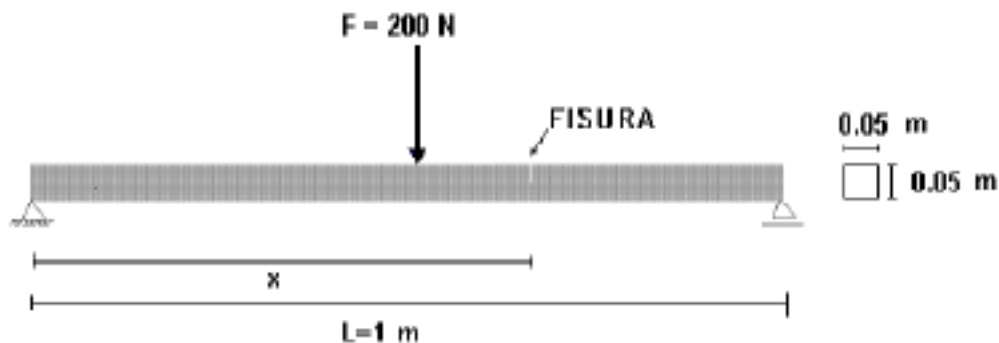


Figura 1: Modelo de viga simplemente apoyada

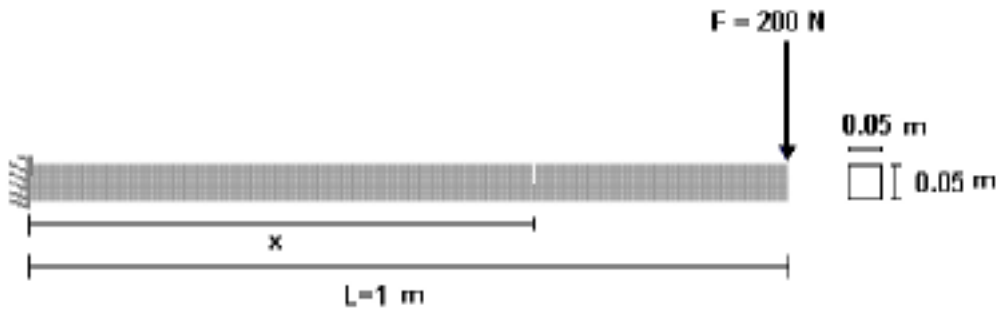


Figura 2: Modelo de viga en voladizo

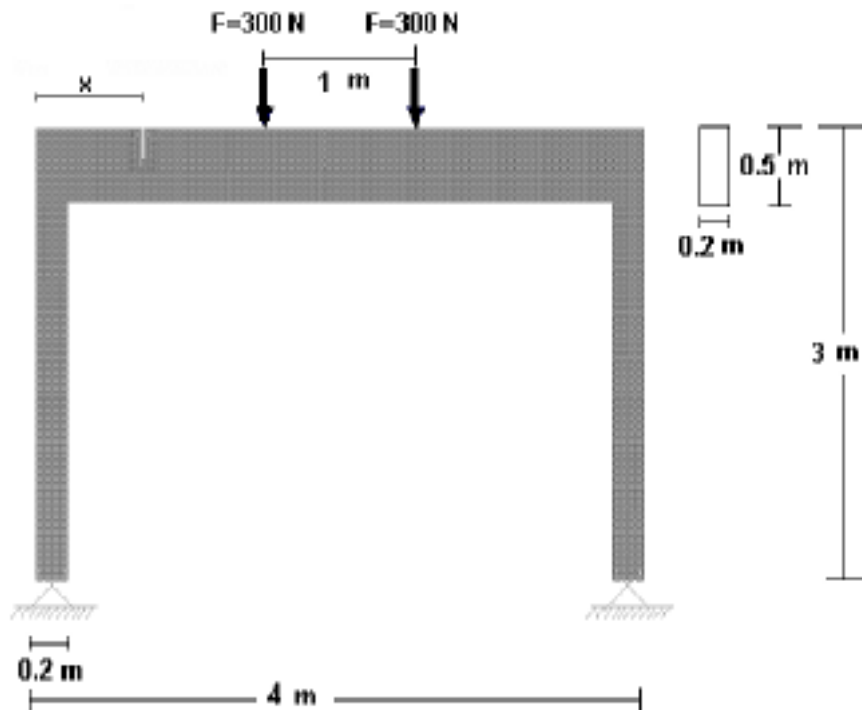


Figura 3: Modelo de pórtico biarticulado

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 ó las deformaciones, correspondientes a la estructura con y sin daño, empleándose estas variables como un índice de la presencia de daño.

2.2.1 Análisis de resultados del modelo de viga simplemente apoyada

En la Figura 4 se representan los desplazamientos de una viga simplemente apoyada, con daño en una posición fija, correspondiente al punto $x/L = 0.33$, (donde x es la coordenada de cada punto y L es la longitud total de la viga), 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). Además, se ha incluido en esta gráfica la curva correspondiente a los desplazamientos de la estructura sin daño. Como se puede observar en dicha figura, el máximo Desplazamiento ocurre en la zona central de la viga, con un corrimiento hacia la zona dañada. Además, a medida que la relación a/h se incrementa, es decir cuando el daño es más severo, la diferencia entre las curvas correspondientes a la estructura dañada y sana es mayor. Entre los casos de estudio, se aprecia que la curva correspondiente a la relación $a/h = 0.2$, difiere muy poco de la curva sin daño. De aquí que esto sería una primera limitación a este método, debido a que, con la magnitud de la carga aplicada, no se detectan diferencias significativas con la estructura sin daño. Una forma de salvar este inconveniente es aumentar el valor de la carga, para que se incrementen las Deformaciones. No obstante, desde el punto de vista práctico este incremento de la carga es limitado, debido a cuestiones de seguridad y de mayor costo de los ensayos.

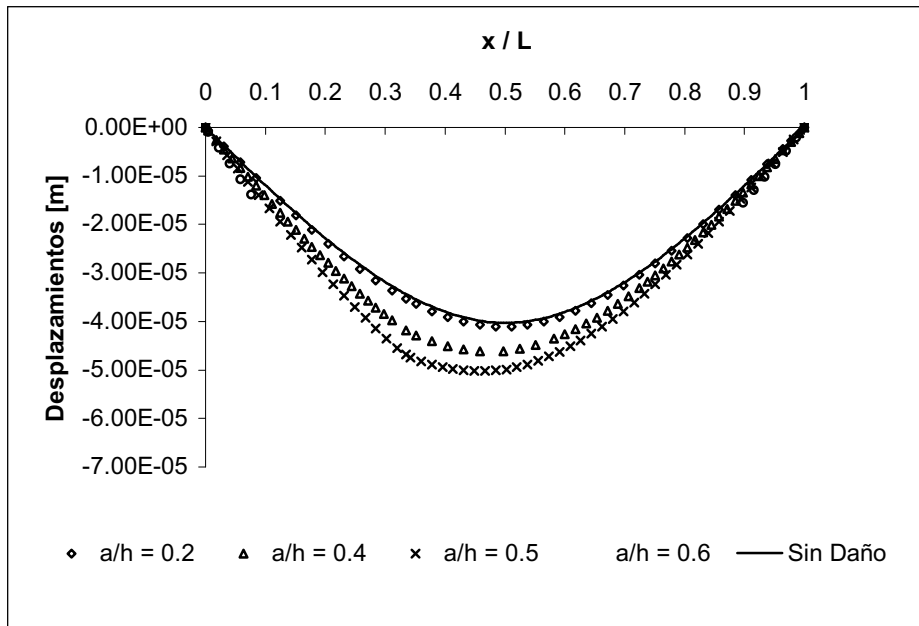


Figura 4: Desplazamiento de una viga simplemente apoyada con distintas severidades de daño en $x/L = 0.33$

En la Figura 5 se representan los desplazamientos, en función de la ubicación relativa de cada punto, para una relación $a/h = 0.4$ y distinta ubicación del daño, es decir distintos x/L (igual severidad y distinta ubicación). Como se puede observar en dicha figura, cuando la ubicación del daño coincide con la zona de máximos desplazamientos, la diferencia entre las

curvas correspondientes a estructura dañada y sana es máxima, como era de esperar. Aquí también se puede apreciar que el máximo de la curva sufre un corrimiento hacia la zona dañada. De esta manera este corrimiento puede dar una idea de donde se encuentra la zona dañada. Se debe notar que cuando el daño esta ubicado cerca del apoyo, zona de desplazamientos menores, la curva de los desplazamientos no presenta notables diferencias, respecto de la estructura sin daño. En otras palabras, el método pierde sensibilidad, en la medida que la zona dañada se aproxima a los apoyos, en forma similar a lo que ocurre cuando la profundidad de la fisura es reducida. En estos casos habría que aumentar el valor de la carga externa, pero esto es limitado, debido a que se corre el riesgo de superar la carga de rotura del elemento estructural analizado, o dejarlo, una vez descargado, con Deformaciones remanentes (deformaciones plásticas).

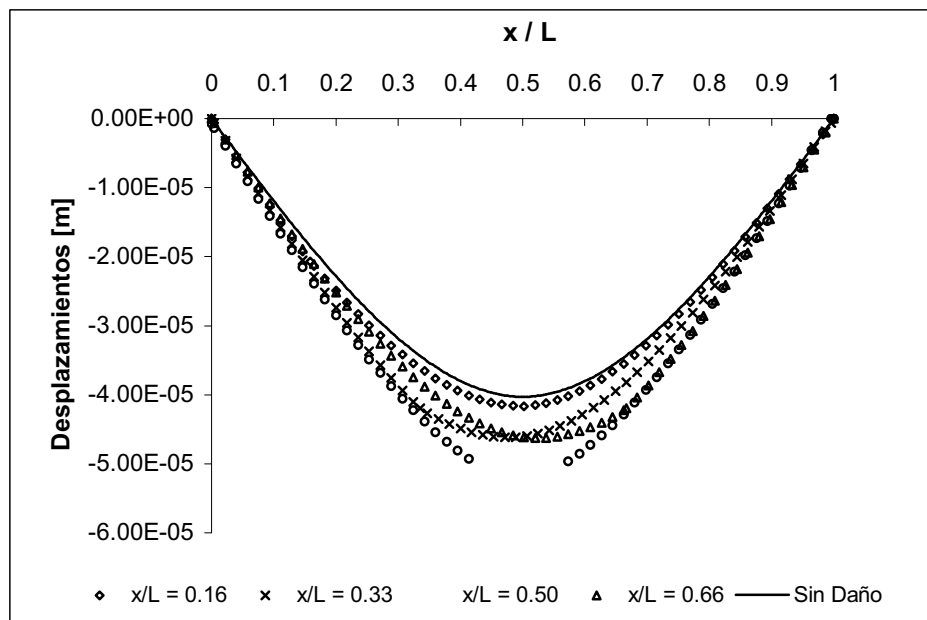


Figura 5: Desplazamiento de una viga simplemente apoyada con daño en distintas ubicaciones y $a/h=0.4$

En función de los errores que se presentan en el modelado numérico (modelado de la malla, propiedades mecánicas del material, etc.) y la sensibilidad, los errores del instrumental que se emplearía en las mediciones experimentales, y los errores del personal que realiza las mediciones, se podrán establecer dos zonas. Una en la que las diferencias entre el modelo numérico y las mediciones experimentales permite asegurar que existe un daño estructural y otra zona donde no se puede afirmar esto último. Cabe acotar que, esta observación es aplicable para cualquiera de las tres etapas de la técnica aquí presentada.

2.2.2 Análisis de los resultados del modelo de viga en voladizo

En la Figura 6 se representa el desplazamiento de una viga en voladizo, con daño en una posición fija, en este caso correspondiente al punto $x/L = 0.50$, para distintas relaciones de a/h . Además, se ha incluido en esta gráfica la curva correspondiente a los desplazamientos de la estructura sin daño. Como se puede observar en dicha figura, el máximo Desplazamiento ocurre en el extremo del voladizo. Además, a medida que la relación a/h se incrementa, es decir cuando el daño es más severo, la diferencia entre las curvas correspondientes a la estructura dañada y sin daño es mayor. Entre los casos de estudio, se aprecia que la curva correspondiente a la relación $a/h = 0.2$, difiere muy poco de la curva sin daño. De aquí que esto sería una limitación a este método, debido a que, con la magnitud de la carga aplicada, no se detectan diferencias significativas con la estructura sin daño.

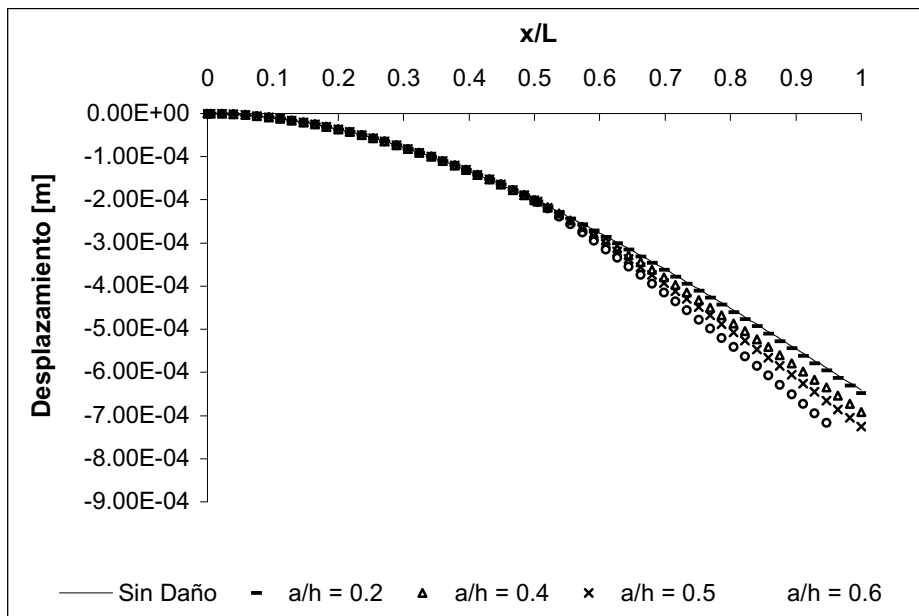


Figura 6: Desplazamientos de una viga en voladizo con distintas severidades de daño en $x/L = 0.5$

En la Figura 7 se representan los desplazamientos en función de la ubicación relativa de cada punto de la viga, para una relación $a/h = 0.4$ y distinta ubicación del daño, es decir diferentes x/L . Como se puede observar en dicha figura, cuando el daño está ubicado cerca del empotramiento, la curva de desplazamientos presenta las mayores diferencias respecto de la estructura sin daño, por el contrario cuando el daño se ubica cercano al extremo libre, las diferencias son menores. Se observa que el método pierde sensibilidad, en la medida que la zona dañada se aproxima al extremo libre de la viga empotrada.

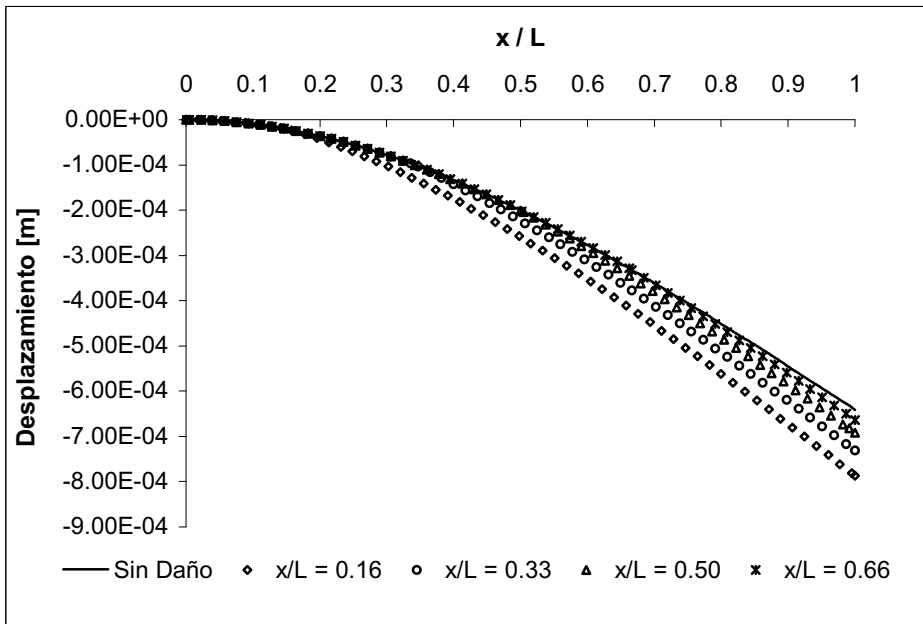


Figura 7: Desplazamientos de una viga en voladizo, con daño en distintas ubicaciones x/L y $a/h = 0.4$

2.2.3 Análisis de resultados del modelo de pórtico biarticulado

En la Figura 8 se representa el Desplazamiento del dintel de un pórtico biarticulado, con daño en la parte superior del dintel, en una posición fija, correspondiente al punto $x/L = 0.5$.

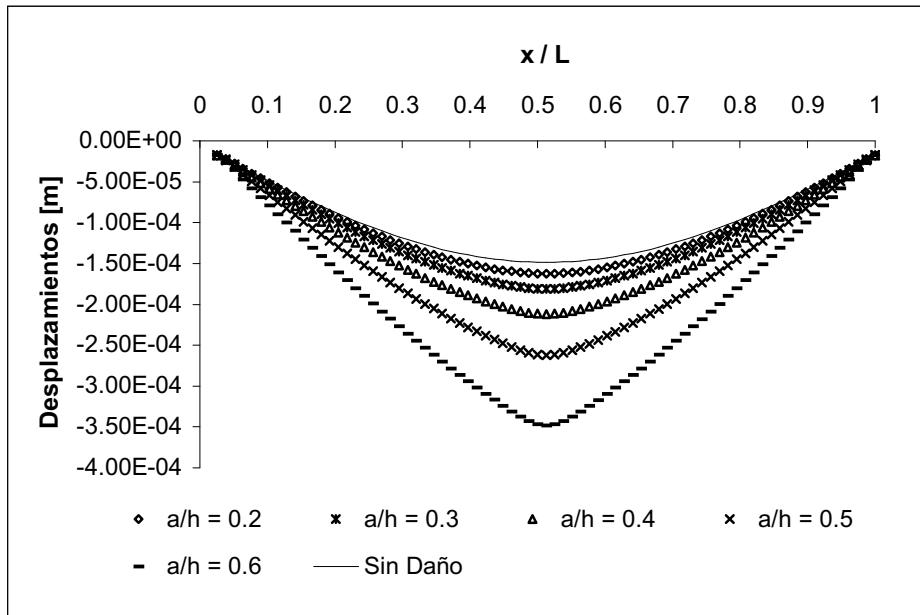


Figura 8: Desplazamientos del dintel de un pórtico biarticulado, con distintas severidades de daño en $x/L = 0.5$

En la figura anterior se representan distintas relaciones de a/h , donde a es la profundidad del daño y h es la altura total del dintel. Además, como en los casos anteriores, se ha incluido en esta gráfica la curva correspondiente a los desplazamientos de la estructura sana, medidos en la cara inferior del dintel del pórtico. El comportamiento que se observa en este caso, es similar al de la viga simplemente apoyada presentada en el punto 2.2.1, siendo válidas las observaciones realizadas en ese punto.

En la Figura 9 se representan los desplazamientos, en función de la ubicación relativa de cada punto, para una relación $a/h = 0.5$ y distinta ubicación del daño, es decir diferentes x/L .

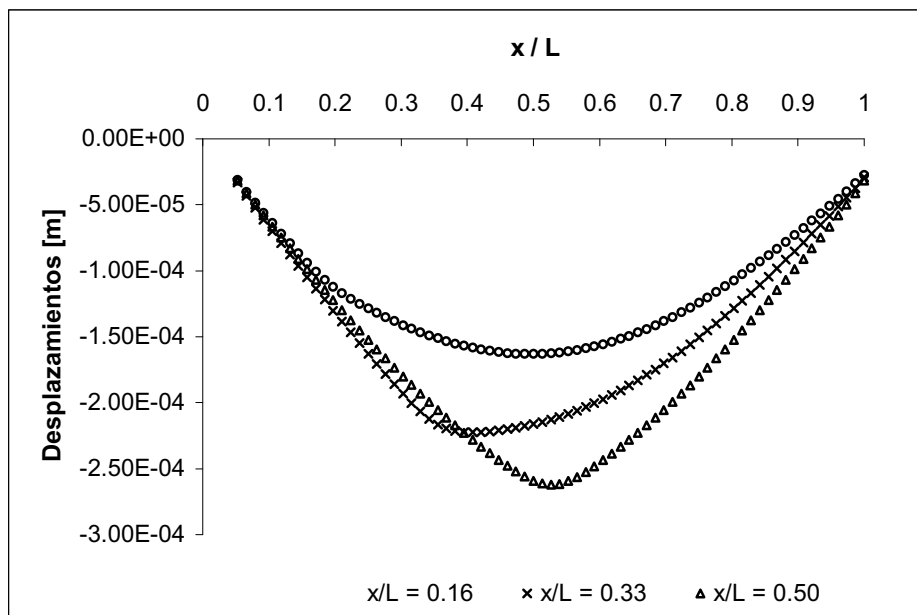


Figura 9: Desplazamientos del dintel de un pórtico biarticulado, con daño en distintas ubicaciones y $a/h = 0.5$

Nuevamente aquí se observa que el máximo de la curva se desplaza hacia la zona dañada. Se debe hacer notar que si las fisuras se encuentran sobre las columnas del pórtico las mismas se podrían detectar.

2.3 Localización de daño

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

- Método de la variación de los desplazamientos
- Método de la curvatura de la elástica.

2.3.1 Método de la variación de los desplazamientos

Este método se basa en la realización de la gráfica de la diferencia existente entre el Desplazamiento correspondiente a la estructura sin daño y el 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 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.

2.3.1.1 Análisis de resultados del modelo de viga simplemente apoyada

En la gráfica de la Figura 10 se representa la variación de los desplazamientos, en función de la ubicación de cada punto de la malla, para una Viga Simplemente Apoyada con daño en la ubicación correspondiente a $x/L = 0.16$, graficándose dos profundidades de fisuras $a/h = 0.2$ y $a/h = 0.5$. Aquí se puede apreciar que en el lugar donde está el daño, se produce el cambio de pendiente de las variaciones de los desplazamientos y por consiguiente también varía el signo de la curvatura.

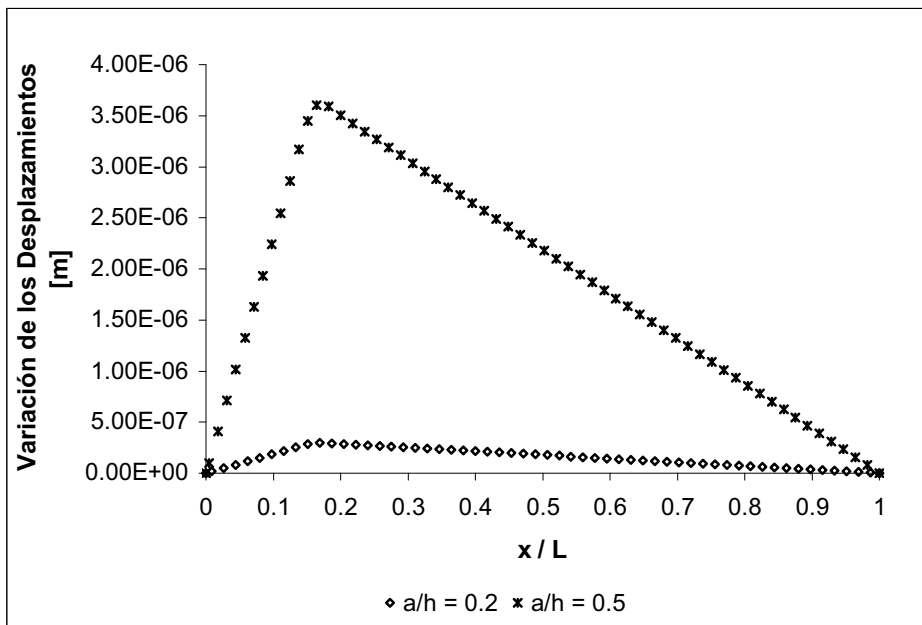


Figura 10: Variación de los desplazamientos de una viga simplemente apoyada, con daño en $x/L = 0.16$

2.3.1.2 Análisis de resultados del modelo de viga en voladizo

La gráfica de la Figura 11 representa la variación de los desplazamientos para el caso de una Viga en Voladizo, en función de la ubicación de cada punto de la malla, para una estructura con daño en diversas ubicaciones correspondientes a $x/L = 0.16$; 0.33 ; 0.50 y 0.66 , con una profundidad de fisura tal que $a/h = 0.5$. Aquí se puede apreciar que hasta la ubicación de la falla la diferencia entre el valor de los Desplazamiento para la viga dañada e intacta es aproximadamente cero, aumentando dicho valor a partir de la ubicación del daño, donde se produce el cambio de pendiente de la curva.

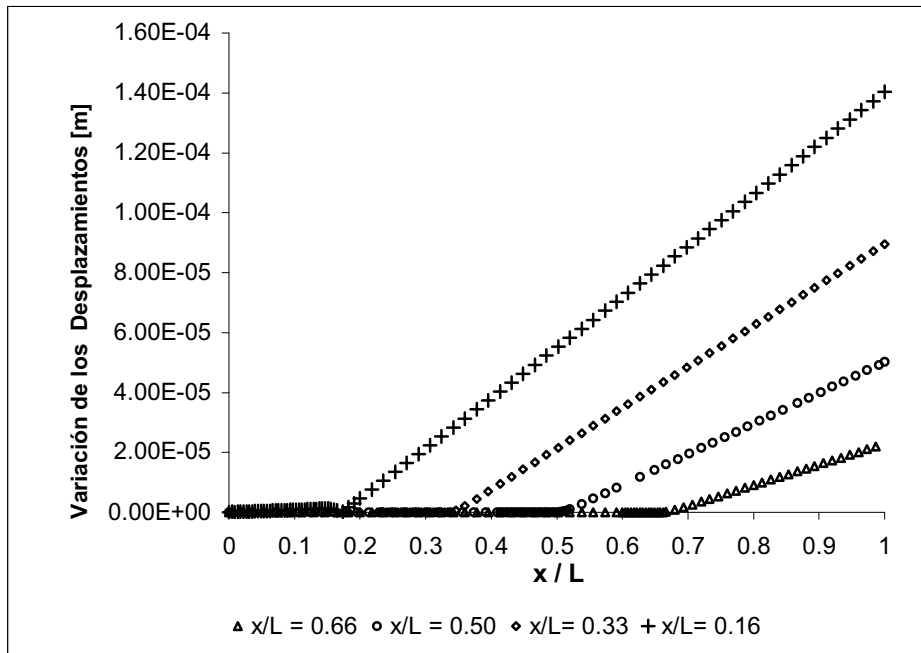


Figura 11: Variación de los desplazamientos para una viga en voladizo con profundidad de fisura $a/h = 0.5$

2.3.1.3 Análisis de resultados del modelo de pórtico biarticulado

En la gráfica de la Figura 12 se representa la variación de los desplazamientos, en función de la ubicación de cada punto de la malla, para el caso del dintel de un Pórtico Biarticulado con daño en las ubicaciones, $x/L = 0.16$, 0.33 y 0.50 , para una profundidad de fisuras $a/h = 0.5$. Aquí se puede apreciar que en el lugar donde está el daño, se produce el cambio de pendiente de las variaciones de los desplazamientos y por consiguiente también varía el signo de la curvatura.

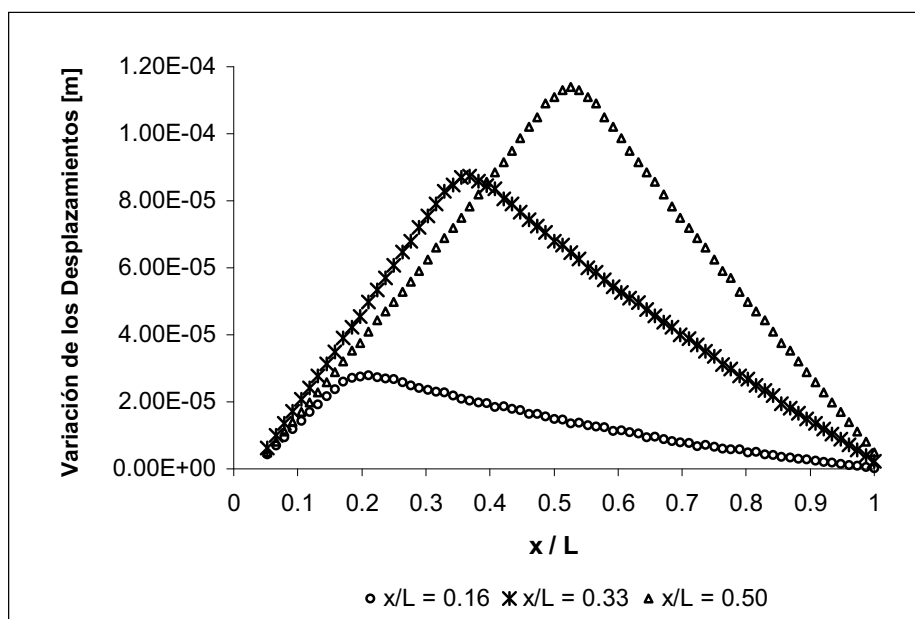


Figura 12: Variación de los desplazamientos para un pórtico biarticulado con profundidad de fisura $a/h = 0.5$

Aquí se puede apreciar que en el lugar donde está el daño, se produce el cambio de pendiente de las variaciones de los desplazamientos y por consiguiente también varía el signo de la curvatura.

2.3.2 Método de la curvatura de la elástica

Los valores de los desplazamientos 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 de la estructura deformada, mediante aproximación por Diferencias Finitas Centrales. De esta manera, la curvatura está dada por¹⁵:

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

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

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 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 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 simplemente apoyada

En la Figura 13, se muestra la curvatura de la elástica, calculada según la Ec.(2), en función de la ubicación de cada punto de la malla, para una estructura dañada en $x/L = 0.33$, y cuya profundidad de fisura es $a/h = 0.5$. 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 la carga puntual, punto medio de la viga y en la ubicación de los apoyos. Estos pequeños saltos se pueden minimizar perfeccionando el modelado de la viga analizada.

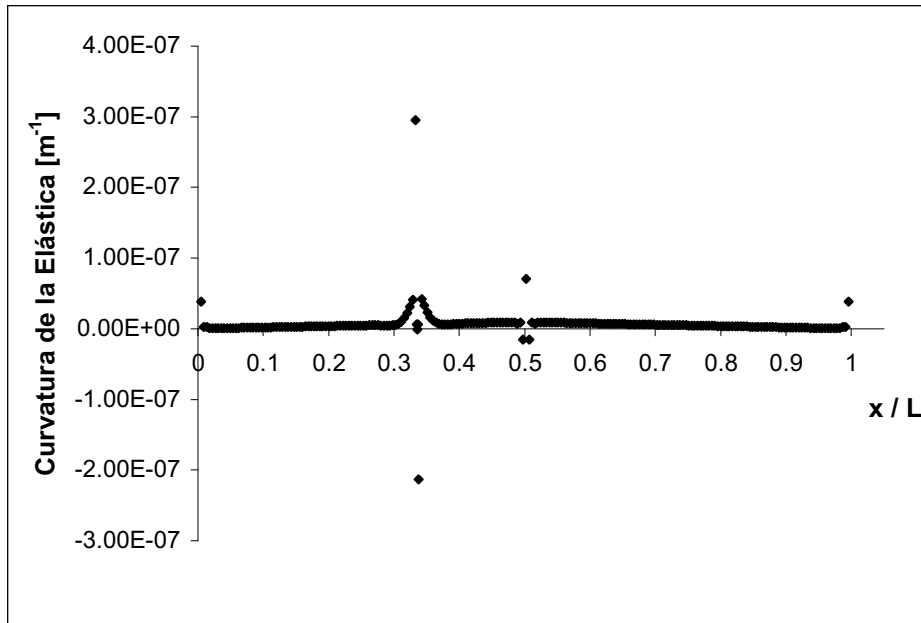


Figura 13: Curvatura de la elástica de una viga simplemente apoyada, con daño en $x/L = 0.33$ y con $a/h = 0.5$

2.3.2.2 Análisis de los resultados del modelo de viga en voladizo

En la Figura 14, se muestra la curvatura de la elástica en función de la ubicación de cada punto de la malla, para el caso de una Viga en Voladizo, con daño en la ubicación correspondiente a $x/L = 0.5$ y con $a/h = 0.5$. En esta gráfica se observa que en la zona dañada presenta un salto pronunciado, mientras que en la zona de aplicación de la carga, (extremo libre de la viga) y en la ubicación del empotramiento sólo se observa una muy pequeña perturbación.

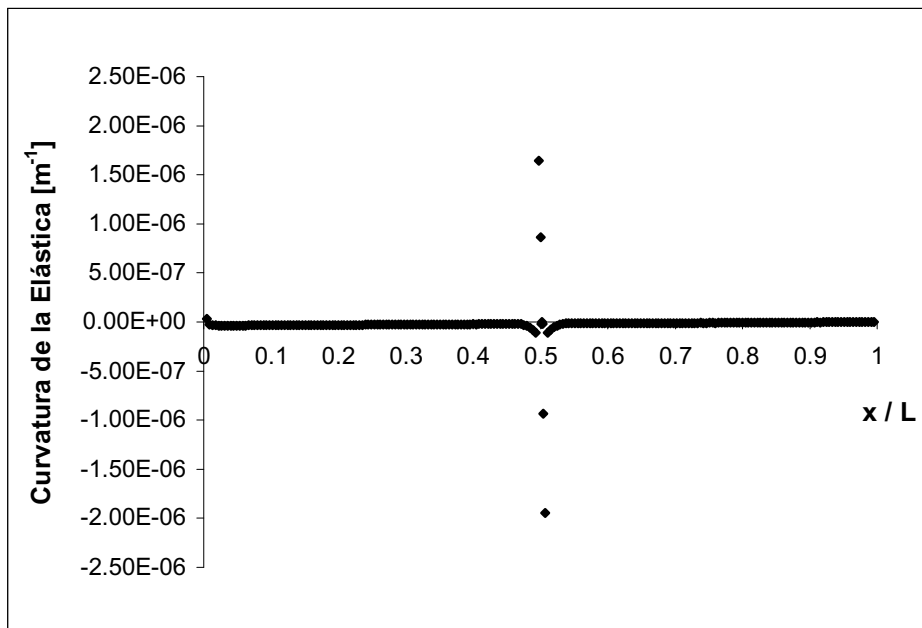


Figura 14: Curvatura de la elástica de una viga en voladizo, con daño en $x/L = 0.5$ y con $a/h = 0.5$

2.3.2.3 Análisis de resultados del modelo de pórtico biarticulado

En la Figura 15, se muestra la curvatura de la elástica en función de la ubicación de cada punto de la malla, para el caso del dintel de un Pórtico Biarticulado sometido a la acción de dos cargas puntuales sobre el dintel (Figura 3), con daño sobre la zona superior del dintel en la ubicación correspondiente a $x/L = 0.33$ y con $a/h = 0.5$. En este caso se vuelve a observar que en la zona dañada se presenta un salto pronunciado. Se observa también que en la zona cercana a las columnas aparecen importantes perturbaciones.

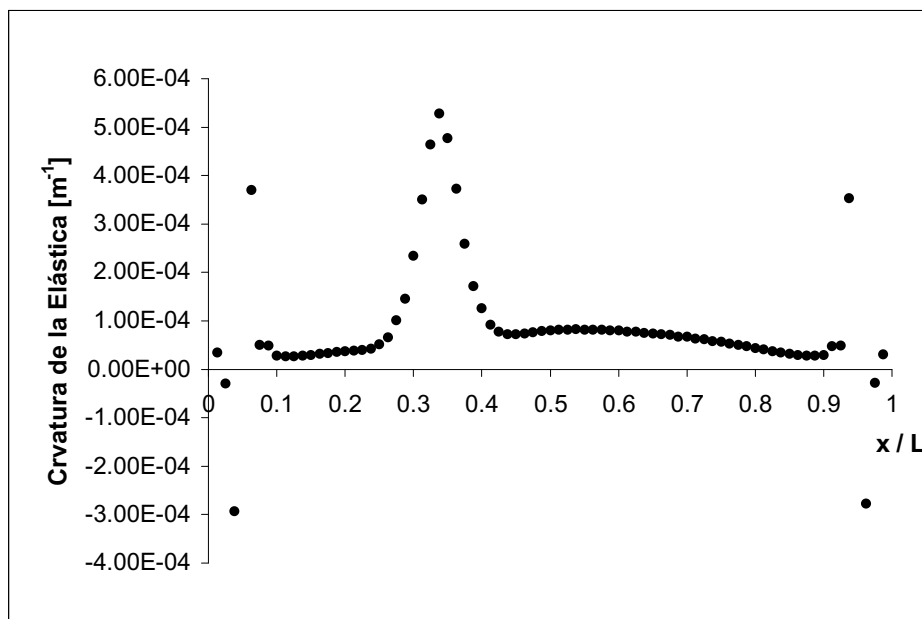


Figura 15: Curvatura de la elástica del dintel de un pórtico biarticulado, con daño en $x/L = 0.33$ y con $a/h = 0.5$

2.4 Cuantificación del daño

Una vez localizado el daño mediante las técnicas anteriormente descritas, 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 la técnica presentada en el punto 2.3 o con el empleo de alguna 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 o deformaciones. Luego se ingresa al gráfico realizado en 3D, con la ubicación del daño x/L , 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, los desplazamientos volumétricos y deformaciones volumétricas¹⁶, con la finalidad de evidenciar cual de ellos es más sensible a la severidad de daño. Respecto de los dos últimos parámetros mencionados, los mismos tienen en cuenta la variación, ya sea de los desplazamientos o las deformaciones, en toda la estructura. Estos parámetros se definen como la sumatoria de los desplazamientos / deformaciones en cada punto, multiplicados por su área de influencia¹⁷. 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.

2.4.1 Análisis de los resultados de la cuantificación del daño, para una viga simplemente apoyada

En la Tabla 1 se muestran los valores correspondientes a los parámetros desplazamientos volumétricos, deformaciones volumétrica y desplazamientos en el punto medio de la viga simplemente apoyada, en función de las distintas relaciones utilizadas: x/L (ubicación) y a/h (severidad), calculados para una carga puntual aplicada en el punto medio de la viga (Figura 1). Analizando la misma se concluye que, los desplazamientos y los desplazamientos volumétricos presentan una variación porcentual similar, en el rango de severidades aquí analizadas, independientemente de la ubicación del daño. Por esta razón, se puede afirmar que se puede aplicar cualquiera de estos dos parámetros. No obstante, puede resultar conveniente emplear los desplazamientos volumétricos debido a que en su determinación se usan mayor cantidad de información, por lo que un error en la medición experimental podría amortiguarse, igualmente los desplazamientos que aquí se emplean son los que sirven para localizar la fisura.

Tabla 1: Desplazamiento del punto medio, Desplazamiento Volumétrico y Deformación Volumétrica de una Viga Simplemente Apoyada en función de la ubicación (x/L) y severidad del daño (a/h).

	Desplazamiento Punto Medio (m)			Desplazamiento Volumétrico (m.m ³)			Deformación Volumétrica (m.m ³)		
	x/L			x/L			x/L		
a/h	0.16	0.33	0.50	0.16	0.33	0.50	0.16	0.33	0.50
0.75	5.26 E ⁻⁵	9.39E ⁻⁵	1.59E ⁻⁴	1.66E ⁻⁶	2.84E ⁻⁶	4.00E ⁻⁶	7.74E ⁻⁷	8.60E ⁻⁷	9.80E ⁻⁷
0.60	4.39E ⁻⁵	5.62E ⁻⁵	7.55E ⁻⁵	1.31E ⁻⁶	1.49E ⁻⁶	1.69E ⁻⁶	7.31E ⁻⁷	7.80E ⁻⁷	8.49E ⁻⁷
0.50	4.25E ⁻⁵	4.98E ⁻⁵	6.14E ⁻⁵	1.26E ⁻⁶	1.47E ⁻⁶	1.68E ⁻⁶	7.19E ⁻⁷	7.56E ⁻⁷	8.10E ⁻⁷
0.40	4.16E ⁻⁵	4.60E ⁻⁵	5.31E ⁻⁵	1.22E ⁻⁶	1.35E ⁻⁶	1.49E ⁻⁶	7.09E ⁻⁷	7.38E ⁻⁷	7.78E ⁻⁷
0.33	4.11E ⁻⁵	4.36E ⁻⁵	4.78E ⁻⁵	1.30E ⁻⁶	1.28E ⁻⁶	1.36E ⁻⁶	7.02E ⁻⁷	7.22E ⁻⁷	7.55E ⁻⁷
0.20	4.05E ⁻⁵	4.11E ⁻⁵	4.21E ⁻⁵	1.19E ⁻⁶	1.20E ⁻⁶	1.23E ⁻⁶	6.91E ⁻⁷	4.00E ⁻⁷	7.17E ⁻⁷
Variación % Mín y Máx	30	128	277	40	136	225	12	23	36

En la gráfica de la Figura 16 se representa la Deformación Volumétrica en función de los parámetros Profundidad de Fisura (a/h) y Ubicación (x/L). Mediante esta gráfica se puede determinar la severidad del daño, ingresando a la misma con el Desplazamiento Volumétrico y la ubicación del daño x/L , procediéndose de igual manera que la descrita en el punto 2.4.

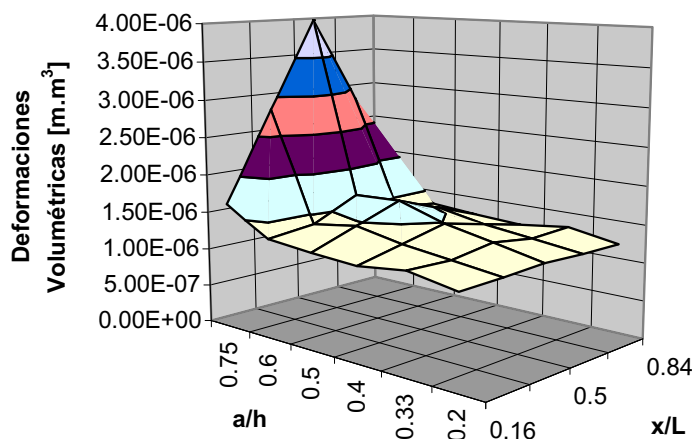


Figura 16: Deformaciones Volumétricas en función de la ubicación y severidad del daño

2.4.2 Análisis de los resultados de cuantificación del daño para una viga en voladizo

En la Tabla 2 se muestran los valores correspondientes a los parámetros desplazamientos volumétricos, deformaciones volumétrica y desplazamientos en el extremo libre de la viga en voladizo, en función de las distintas relaciones utilizadas: x/L (ubicación) y a/h (severidad). Analizando la misma se concluye que, como en el caso anterior, los desplazamientos y los desplazamientos volumétricos presentan una variación porcentual similar, en el rango de severidades aquí analizadas, independientemente de la ubicación del daño.

Tabla 2: Desplazamiento del punto extremo, Desplazamiento Volumétrico y Deformación Volumétrica de una Viga en Voladizo en función de la ubicación (x/L) y severidad del daño (a/h).

	Desplazamiento Punto Extremo (m)			Desplazamiento Volumétrico (m.m ³)			Deformación Volumétrica (m.m ³)		
	x/L			x/L			x/L		
a/h	0.16	0.33	0.50	0.16	0.33	0.50	0.16	0.33	0.50
0.75	2.00E ⁻³	1.48E ⁻³	1.11E ⁻³	4.63 E ⁻⁵	2.98 E ⁻⁵	2.07 E ⁻⁵	1.19E ⁻⁴	1.07E ⁻⁴	1.03E ⁻⁴
0.60	1.04E ⁻³	8.92 E ⁻⁴	7.82 E ⁻⁴	2.34 E ⁻⁵	1.85 E ⁻⁵	1.59 E ⁻⁵	1.04E ⁻⁴	9.66E ⁻⁵	9.44E ⁻⁵
0.50	8.82 E ⁻⁴	7.91 E ⁻⁴	7.26 E ⁻⁴	1.95 E ⁻⁵	1.66 E ⁻⁵	1.51 E ⁻⁵	9.77E ⁻⁵	9.46E ⁻⁵	9.15E ⁻⁵
0.40	7.86 E ⁻⁴	7.32 E ⁻⁴	6.91 E ⁻⁴	1.72 E ⁻⁵	1.55 E ⁻⁵	1.46 E ⁻⁵	9.44E ⁻⁵	9.07E ⁻⁵	8.94E ⁻⁵
0.33	7.25 E ⁻⁴	6.93 E ⁻⁴	6.70 E ⁻⁴	1.57 E ⁻⁵	1.47 E ⁻⁵	1.43 E ⁻⁵	9.14E ⁻⁵	8.85E ⁻⁵	8.77E ⁻⁵
0.20	6.67E ⁻⁴	6.51E ⁻⁴	6.47 E ⁻⁴	1.42E ⁻⁵	1.41E ⁻⁵	1.40E ⁻⁵	8.68E ⁻⁵	8.51E ⁻⁵	8.49E ⁻⁵
Variación % Mín y Máx	67	56	42	69	53	37	37	26	22

2.4.3 Análisis de los resultados de cuantificación del daño para el dintel de un pórtico biarticulado

En la Tabla 3 se muestran los valores correspondientes a los parámetros desplazamientos volumétricos, deformaciones volumétrica y desplazamientos en el punto medio del dintel de un Pórtico Biarticulado, en función de las distintas relaciones utilizadas: x/L (ubicación) y a/h (severidad). En este caso se observa que los desplazamientos volumétricos presentan una variación porcentual mayor que los otros dos parámetros, independientemente de la ubicación del daño.

Tabla 3: Desplazamiento del punto Medio, Desplazamiento Volumétrico y Deformación Volumétrica del dintel de un Pórtico Biarticulado en función de la ubicación (x/L) y severidad del daño (a/h).

	Desplazamiento Punto Medio (m)			Desplazamiento Volumétrico (m.m ³)			Deformación Volumétrica (m.m ³)		
	x/L			x/L			x/L		
a/h	0.16	0.33	0.50	0.16	0.33	0.50	0.16	0.33	0.50
0.60	1.54E ⁻⁴	2.17 E ⁻⁴	2.86 E ⁻⁴	3.10E ⁻⁴	6.16E ⁻⁴	7.29E ⁻⁴	2.92E-5	3.24E-5	3.34E-5
0.50	1.47 E ⁻⁴	1.83 E ⁻⁴	2.23 E ⁻⁴	3.08E ⁻⁴	4.59E ⁻⁴	5.25E ⁻⁴	2.82E-5	3.05E-5	3.11E-5
0.40	1.43 E ⁻⁴	1.62 E ⁻⁴	1.85 E ⁻⁴	2.74E ⁻⁴	3.66E ⁻⁴	4.05E ⁻⁴	2.73E-5	2.87E-5	2.92E-5
0.33	1.40 E ⁻⁴	1.50 E ⁻⁴	1.62 E ⁻⁴	2.49E ⁻⁴	3.03E ⁻⁴	3.27E ⁻⁴	2.67E-05	2.75E-5	2.77E-5
0.20	1.39 E ⁻⁴	1.43 E ⁻⁴	1.47 E ⁻⁴	2.31E ⁻⁴	2.62E ⁻⁴	2.75E ⁻⁴	2.62E-5	2.65E-5	2.67E-5
Variación % Mín y Máx	10	34	48	26	58	62	10	18	20

3 CONCLUSIONES

La técnica aquí presentada puede ser una importante herramienta, para ser empleada al estudiar patologías en estructuras de acceso limitado, tal que permite determinar la existencia de daño, localizarlo y cuantificarlo. Permite realizar un seguimiento de la evolución del daño que tiene una estructura, tanto sea metálica como de hormigón armado, con el transcurrir del tiempo, para establecer la capacidad portante residual del elemento afectado. Como se ha podido apreciar en la aplicación de esta técnica, se deben combinar modelos numéricos de análisis y mediciones experimentales (deformaciones y desplazamientos), que no afectan a la integridad estructural, por estos motivos se la puede considerar como una técnica no destructiva de análisis.

4 REFERENCIAS

1. 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).
2. A. Dimagoras, "Vibration of cracked structures: a state of the art review", *Engineering Fracture Mechanics*, **55(5)**, 831-857, (1996).

3. O. Salawu, "Detection of structural damage through changes in frequency: a review article", *Engineering Structures*, **19(9)**, 718-723, (1997).
4. 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).
5. J. Kim and N. Stubbs, "Crack detection in beam – type structures using frequency data" *Journal of Sound and Vibration*, **259(1)**, 145-160, (2003).
6. 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).
7. J. Chou and J. Ghaboussi, "Genetic algorithm in structural damage detection", *Computers & Structures*, **79**, 1335-1353, (2001).
8. I. Choi et. al., "Development of elastic damage load theorem for damage detection in statically determinate beam", *Computers & Structures*, **82**, 2483-2492, (2004).
9. D. Maity and A. Saha, "Damage assessment in structures from changes in static parameter using neural networks", *Sādhanā*, **29(3)**, 315-327, (2004).
10. 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).
11. T. Sain Chandra and J. M. Kishen, "Damage and residual life assessment of structures using fracture mechanics", *Procc. 16th ASCE Engineering Mechanics Conference*, University of Washington, Seattle, (2003).
12. S. Caddemi and A. Morassi, "A procedure for multiple damage identification in elastic beams" *Procc. World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization*, Rio de Janeiro, Brasil, (2005).
13. F. Jiang et al. "Crack length calculation for bend specimens under static and dynamic loading", *Engineering Fracture Mechanics*, **71**, 1971-1985, (2004).
14. Algor15 Professional Mech/VE, *Docutech, Linear Stress and Dynamics*, Reference Division. Pittsburgh, Pennsylvania, (2001).
15. Lu Q., Ren G., Zhao Y., Multiple damage location with flexibility curvature and relative frequency change for beam structure. *Journal of Sound and Vibration*, **253(5)**, 1101-1114, (2002).
16. 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).
17. 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).