

Análisis comparativo de detección de daño en  
estructuras mediante la transformada Wavelet y  
parámetros clásicos

Realizado por: Miguel A. Feberero Moreno

Tutor: Mario Solís Muñiz

Sevilla, Mayo 2012

# ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1. Objetivos del proyecto.....	1
1.2. Descripción de las estructuras a analizar.....	1
<b>2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....</b>	<b>3</b>
2.1. Caracterización de las propiedades dinámica de la estructura.....	4
2.1.1. Análisis modal clásico y análisis modal operacional.....	4
2.1.2. Extracción de parámetros modales: Combined Subspace Identification Method.....	5
2.2. Métodos de detección y/o identificación de daños.....	6
2.2.1 Parámetros modales clásicos.....	6
2.2.1.1. Variación de las frecuencias naturales.....	7
2.2.1.2. Variación de los modos de vibración.....	7
2.2.1.3. Variación en la matriz de flexibilidad y rigidez.....	7
2.2.1.4. Stubbs.....	8
2.2.1.5. Variación de la curvatura de los modos de vibración.....	9
2.2.1.6. MAC.....	10
2.2.2. Método híbrido basado en transformada wavelet.....	10
<b>3. ANÁLISIS MODAL VIGAS METÁLICAS.....</b>	<b>12</b>
3.1. Descripción del ensayo.....	12
3.2. Obtención de parámetros modales de las vigas.....	16
3.2.1. Análisis de influencia en el número de orden.....	16
3.2.2. Análisis de la variación de la ventana temporal.....	22

3.2.3. Conclusiones.....	26
<b>4. IDENTIFICACIÓN DE DAÑO EN VIGAS METÁLICA.....</b>	<b>27</b>
4.1. Parámetros modales clásicos de detección de daño.....	27
4.1.1. Variación de las frecuencias naturales.....	28
4.1.1.1. Daño 0.5L.....	28
4.1.1.2. Daño 0.25L.....	31
4.1.1.3. Daño borde.....	34
4.1.2. Variación de los modos de vibración.....	34
4.1.2.1. Daño 0.5L.....	35
4.1.2.2. Daño 0.25L.....	43
4.1.2.3. Daño borde.....	50
4.1.3. Variación de curvaturas.....	53
4.1.3.1. Daño 0.5L.....	53
4.1.3.2. Daño 0.25L.....	54
4.1.3.3. Daño borde.....	55
4.1.4. Método de la matriz de flexibilidad.....	55
4.1.4.1. Análisis del método de la matriz de flexibilidad.....	56
4.1.4.2. Daño 0.5L.....	58
4.1.4.3. Daño 0.25L.....	62
4.1.4.4. Daño borde.....	65
4.1.5. Stubbs.....	66
4.1.5.1. Daño 0.5L.....	67
4.1.5.2. Daño 0.25L.....	70
4.1.5.3. Daño borde.....	71
4.1.6. MAC.....	72
4.1.6.1. Daño 0.5L.....	73

4.1.6.2. Daño 0.25L.....	75
4.1.6.3. Daño borde.....	77
4.1.7 Análisis de suavizado de los modos de vibración.....	77
4.1.7.1. Resultados sobre modos experimentales.....	77
4.1.7.1.1. Daño 0.5L.....	78
4.1.7.1.2. Daño 0.25L.....	94
4.1.7.1.3. Daño borde.....	109
4.1.7.2. Resultados sobre modos numéricos.....	114
4.1.7.2.1. Daño 0.5L.....	114
4.1.7.2.2. Daño 0.25L.....	132
4.1.7.2.3. Daño borde.....	149
4.1.8 Conclusiones.....	155
4.2 Método híbrido basado en transformada wavelet.....	161
4.2.1. Variación del número de muestras.....	161
4.2.2. Resultados sobre modos experimentales.....	173
4.2.2.1. Daño 0.5L.....	173
4.2.2.2. Daño 0.25L.....	175
4.2.2.3. Daño borde.....	177
4.2.3. Resultados sobre modos numéricos.....	177
4.2.3.1. Daño 0.5L.....	178
4.2.3.2. Daño 0.25L.....	180
4.2.3.3. Daño borde.....	182
4.2.4. Conclusiones.....	183
<b>5. CONCLUSIONES.....</b>	<b>185</b>
<b>6. DESARROLLOS FUTUROS.....</b>	<b>187</b>

<b>7. REFERENCIAS.....</b>	<b>188</b>
----------------------------	------------

# 1. INTRODUCCIÓN

Es común, dentro del campo ingenieril de las estructuras, encontramos con defectos en algunos elementos. Sin embargo, debido a los múltiples factores que intervienen en las estructuras durante su construcción y vida útil, es imposible encontrar una libre de daño. Para ello, se realizan comprobaciones verificando el estado en la cual se encuentra, y así, realizar estimaciones sobre la vida útil de ésta.

El presente proyecto estudia y analiza técnicas de detección de daños que puedan estar presentes en estructuras. De esta forma, si nos encontramos frente a una irregularidad, mediante los métodos que se describen en este texto, se podrá detectar, localizar y en algunos casos cuantificar la severidad del daño.

Por todo ello, se presenta una potente herramienta con la que se podrá caracterizar el estado de la estructura y de esta forma, dar un paso hacia delante en la seguridad estructural.

## 1.1. Objetivos del proyecto

Los objetivos que persigue este proyecto se resume en los siguientes puntos:

- ✓ Obtención de los parámetros modales de una estructura con distintas severidades de daño y sin daño.
- ✓ Aplicación de diversos métodos de detección de daño basados en analizar las propiedades dinámicas obtenidas previamente a modelos simples.
- ✓ Comparación entre métodos y estudiar posibles mejoras.

## 1.2. Descripción de las estructuras

Para el análisis de las distintas técnicas que emplearemos para la identificación de daños se ha hecho uso de vigas IPE 100 de una longitud de 127 cm.

En total se han empleado ocho vigas para este estudio. Siete de ellas presentaban un daño, y una estaba intacta. El daño que presentan no es más que una fisura practicada en el ala del perfil. En función de la localización de la fisura, podemos clasificar las vigas en cuatro grupos:

- Viga intacta: Se trata de la viga ensayada que no presenta grieta alguna. Va a ser pues, nuestra referencia en todos los análisis.
- Viga dañada en su sección intermedia: Se trata de un conjunto de tres vigas a las cuales se le han practicado fisuras de distinta longitud en su centro geométrico. Así, según la severidad del daño, nos referiremos a estas mediante las

expresiones “severidad leve”, “severidad media” y “severidad máxima”. La longitud de las fisuras son las siguientes:

- Severidad máxima: 30 mm de longitud. Se encuentra dañado el ala más parte del alma.
  - Severidad media: 10 mm de longitud. Se encuentra dañado el ala más parte del alma.
  - Severidad leve: 20 mm de longitud en cada lado del ala. El alma permanece intacta.
- 
- Viga dañada a 0.25 de su longitud total (L): Al igual que la anterior, se trata de un conjunto de tres vigas con las tres severidades de daño presentes. La diferencia es que se presentan a una cuarta parte de la longitud total de la viga.
  - Viga dañada en borde: Solo representa una viga. El daño se localiza próximo a uno de los bordes del perfil. Su severidad es máxima.

## 2. FUNDAMENTOS TEÓRICO

Los métodos para la identificación, localización y cuantificación del daño están actualmente en continua evolución. Son muchos los autores interesados en estas técnicas imprescindibles para estimar el periodo de vida de estructuras, por lo que se trata de un campo con mucho camino aún por recorrer.

Así, el auge de estas técnicas data en la década de los 70 y 80. Previamente, se utilizaban otras como la inspección visual o el uso de radiografías industriales [1]. Sin embargo, estas técnicas abarcan poca superficie en cada análisis, por lo que en grandes estructuras, es complicado encontrar algún desperfecto a menos que de antemano se tenga conocimientos de la localización aproximada de ésta.

Es debido a la industria petrolífera y a sus estructuras offshore el interés despertado por estos métodos. Posteriormente se incluirían en la industria aeronáutica, siendo uno de los pilares fundamentales en el campo aeroespacial.

La identificación del daño se basa en cuatro niveles [2]:

- Nivel 1: Determinación de la existencia del daño.
- Nivel 2: Localización geométrica del daño.
- Nivel 3: Cuantificación del daño.
- Nivel 4: Predicción de la vida en servicio restante de la estructura.

El nivel 4 queda fuera del alcance de este proyecto, por lo que nos centraremos en los tres primeros.

Mediante los parámetros modales de la estructura a analizar (modos de vibración, frecuencias naturales y amortiguamientos), somos capaces de detectar, localizar y cuantificar un daño presente en ésta. Si bien, para el primer nivel, haciendo uso directamente de los modos y frecuencias naturales, somos capaces de determinar la existencia del daño con una breve inspección de sus valores y formas geométricas que representan los primeros. El principio básico en el que se rige todo ello, es la reducción en la rigidez que causa el daño en la estructura y la consiguiente influencia directa en sus propiedades dinámicas.

Para los demás niveles, es necesario apoyarnos en otras teorías, todas ellas basadas en las propiedades dinámicas de la estructura, mediante las cuales podremos acercarnos a nuestros objetivos descritos previamente.

## 2.1. Caracterización de las propiedades dinámica de la estructura

El primer paso para poder aplicar los métodos de detección de daños aquí descritos, consiste en la obtención de los parámetros modales de la estructura, es decir, sus propiedades dinámicas.

Gracias al desarrollo de las tecnologías, este punto no resulta extremadamente complejo, y mediante poca tecnología somos capaces hoy en día de recoger toda la información necesaria sobre las propiedades dinámicas de una estructura.

Como todo primer paso en un estudio, resulta decisivo y fundamental que durante la caracterización no haya error alguno pues, de existir, todo análisis posterior sería erróneo e incongruente.

Tal y como sabemos, los parámetros modales que obtenemos son las frecuencias naturales, los modos de vibración y amortiguamiento. A partir de estos datos, vamos a ser capaces de descubrir la existencia o no de grietas y fisuras en la estructura, por lo que es necesario prestar especial atención durante dicha caracterización.

Existen, principalmente, dos metodologías para obtener estas propiedades dinámicas: el análisis modal clásico y el análisis modal operacional.

Una tercera surge de la combinación de las anteriores denominada *Combined Subspace Identification Method* (CSI) que será la que emplearemos en este proyecto.

### 2.1.1. Análisis modal clásico y análisis modal operacional

El análisis clásico consiste en excitar la estructura artificialmente siendo conocedores de la fuerza de excitación que estamos aplicando, y además, como es lógico, de la respuesta de la estructura ante esta fuerza. Para obtener los parámetros modales se trabaja con la función de respuesta en frecuencia.

La función de respuesta en frecuencia se define como la fracción de la respuesta del sistema entre la fuerza excitadora. Planteando la ecuación del movimiento de un sólido de masa  $m$  con una rigidez  $k$  y a la que se le ha sometido una fuerza  $F$ :

$$m\ddot{x} + kx = F$$

La FRF será por tanto:

$$\frac{X}{F} = \frac{1}{-m\omega^2 + k}$$

El análisis modal operacional obtiene las propiedades dinámicas a partir de la estructura trabajando con sus cargas de servicio. En lugar de trabajar con la FRF, lo hace con la función de densidad espectral de la respuesta.

La gran ventaja que presente este método respecto al análisis modal clásico, es que no se necesita conocer la fuerza de excitación. Esto permite trabajar con grandes estructuras, las cuales resultaría imposible ensayarlas artificialmente, y de este modo, sería inútil en estas ocasiones el análisis modal clásico.

### **2.1.2. SPICE. Combined Subspace Identification**

El análisis modal en estructuras consiste en tres pasos: recogida de datos, identificación del sistema y estimación de los parámetros modales. SPICE nos ofrece la posibilidad de aplicar los dos últimos pasos, por tanto, es necesario exportar los datos obtenidos en el ensayo al programa. Además, presenta amplias herramientas para la visualización y procesado de los datos medidos, para la identificación del sistema y determinación y visualización de los parámetros modales de la estructura.

Así, el programa permite realizar las siguientes operaciones:

- ✓ Definir geometrías mediante la unión de nodos creados.
- ✓ Procesado de la señal convirtiéndola a *mcsignal*, mediante la cual todas las operaciones de procesado tienen lugar.
- ✓ Identificación del sistema. El programa presenta múltiples métodos como son *Stochastic Subspace Identification (SSI)*, *poly-reference Least Squares Complex Frequency domain (pLSCF)*, *Combined Subspace Identification (CSI)* y *Peak Picking*. Como hemos comentado, se trabajará con el método CSI.
- ✓ Análisis modal. El programa integra un diagrama de estabilización mediante el cual se facilita los criterios de estabilización. Permite definir rangos de frecuencias y amortiguamiento para esta tarea. Permite a su vez observar los modos de vibración

en el plano complejo una vez escogido un polo en las frecuencias naturales presentes. La visualización animada de los modos de vibración también es posible.

La identificación del sistema juega un importante papel en la calidad de los parámetros modales de la estructura y en el número de parámetros que podamos obtener.

En el análisis modal operacional, donde sólo conocemos la respuesta, el escalado absoluto de los modos de vibración no es posible y el contenido en frecuencia de las fuerzas ambientales puede ser limitado, por lo que solo se puede conseguir un limitado número de modos. Esto conlleva al desarrollo de métodos donde la excitación ambiental y artificial puedan confluir de modo que la amplitud de la excitación artificial sea menor comparado con la excitación ambiental.

El método para la identificación del sistema” *Combined Subspace Identification*” es una herramienta robusta para esta tarea, el cual permite hacer la identificación conociendo solo parte de la excitación.

## **2.2. Métodos de detección y/o identificación de daños**

A continuación se expondrá una breve explicación sobre los distintos métodos empleados para la identificación y detección de daños.

Éstos, se pueden dividir en dos bloques: aquellos pertenecientes al programa DIbEMA [3] y el que emplea la metodología de Wavelet.

Ambos son potentes herramientas en continuo desarrollo, y aunque el objetivo que persiguen ambos es el mismo, vamos a trabajar con ellos a la vez a modo de comparación y así sacar conclusiones sobre su viabilidad en futuros proyectos.

### **2.2.1. DIbEMA**

El programa DIbEMA (*Damage Identification by Experimental Modal Analysis*) es desarrollado por el Grupo de Estructuras de la Escuela Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla [3]. Consiste en un software que implementa diversos métodos para la detección, localización y cuantificación del daño a partir de los datos de entradas de las frecuencias naturales y modos de vibración presentes en la estructura. El código empleado en la programación es elaborado mediante el programa MATLAB.

Los métodos empleados son: variación de las frecuencias naturales, variación de las frecuencias naturales, variación en la matriz de flexibilidad y rigidez, Stubbs, variación de la curvatura de los modos de vibración y método de MAC.

### **2.2.1.1. Variación de las frecuencias naturales**

Como se comentó anteriormente, la existencia de un daño en la estructura condiciona a su rigidez, la cual disminuirá. Esto acarreará la disminución de sus frecuencias naturales, a mayor grado mientras más severo sea el daño.

Por tanto, se trata de un método que nos permite determinar la existencia de daño y, en algunos casos, podremos aproximarnos en conocer a modo groso la severidad del daño.

Así, es un método que se podría utilizar como punto de partida en una estructura bajo examen, debido a su sencilla base y a su eficacia en cuanto a detección de daño, puesto que si las frecuencias de la estructura sin daño no coinciden con otra con las mismas características, nos encontramos con un daño en esta última.

### **2.2.1.2. Variación de los modos de vibración**

A su vez, la presencia de un daño puede alterar los modos de vibración de la estructura. Al disminuir la rigidez, la estructura tiene mayor libertad para desplazarse, por lo que afecta a la forma de sus modos.

Sin embargo, no todos los modos de vibración se ven afectados por la presencia del daño, ya que, por ejemplo, si éste se encuentra en un nodo del modo, éste nunca va a estar afectado por dicho daño.

Además, los modos afectados los estarán en las zonas próximas al fallo, así pues, se puede realizar una primera observación, aunque en ningún caso definitivo, sobre la localización del daño.

### **2.2.1.3. Variación en la matriz de flexibilidad y rigidez**

La matriz de flexibilidad puede aproximarse mediante la siguiente expresión [4]:

$$F \cong \sum_{i=1}^m \frac{1}{\omega_i^2} \phi_i \phi_i^T$$

donde  $\omega_i$  es la frecuencia natural i-ésima,  $\phi_i$  el modo de vibración i-ésimo y  $m$  el número de modos total analizados.

El método consiste en realizar una comparación entre las matrices dañadas y sin daño, y donde exista la mayor variación es donde el fallo se encontrará. Así, definida la matriz de flexibilidad sin daño, definimos otra para la estructura dañada:

$$F^d \cong \sum_{i=1}^m \frac{1}{\omega_i^{d2}} \phi_i^d \phi_i^{dT}$$

La resta entre ambas matrices nos ofrece los resultados que estamos buscando:

$$\Delta F = F^d - F$$

Debido a que la flexibilidad aumenta en la estructura dañada, según la expresión anterior, donde se encuentre el máximo estará el daño.

La matriz de rigidez se define como la inversa de la matriz de flexibilidad:

$$K = \sum_{i=1}^m \omega_i^2 \phi_i \phi_i^T$$

Definimos de igual manera la matriz de rigidez para la estructura dañada:

$$K^d = \sum_{i=1}^m \omega_i^{d2} \phi_i^d \phi_i^{dT}$$

La variación entre matrices será por tanto:

$$\Delta K = K - K^d$$

Expresado de esta manera, al disminuir la rigidez en la estructura dañada, el fallo se encontrará donde se localice el máximo de las diferencias de las matrices.

#### 2.2.1.4. Stubbs

El método Stubbs tiene su principio en la disminución de la energía modal entre los grados de libertad estudiados.

Se define un parámetro  $\beta_p$  que mide el daño en el elemento  $p$  de la estructura. Este parámetro queda definido como:

$$\beta_p = \frac{\sum_{i=1}^m \mu_{ip}^d}{\sum_{i=1}^m \mu_{ip}^u}$$

donde  $d$  representa el estado dañado y  $u$  el de referencia.

$\mu_p^d$  y  $\mu_p^u$  se definen mediante la curvatura de los modos según las siguientes expresiones:

$$\mu_p^u = \frac{\int_a^b [(\phi^u(x))'']^2 + \int_0^L [(\phi^u(x))'']^2}{\int_0^L [(\phi^u(x))'']^2}$$

$$\mu_p^d = \frac{\int_a^b [(\phi^d(x))'']^2 + \int_0^L [(\phi^d(x))'']^2}{\int_0^L [(\phi^d(x))'']^2}$$

$a$  y  $b$  son los extremos del elemento  $p$ , y  $L$  la longitud total de la estructura a analizar.

Mientras mayor sea el parámetro  $\beta_p$ , mayor será el daño en la estructura.

### 2.2.1.5. Variación de la curvatura de los modos de vibración

La variación que experimenta la curvatura de los modos de vibración puede ser no sólo una buena indicación de si existe un daño, sino también de dónde se encuentra exactamente el daño [5].

Dicha curvatura se calcula según el método de las diferencias centradas tomando los grados de libertad como nodos equidistantes:

$$\phi(x)'' = \frac{\phi(x_{i+1}) + \phi(x_{i-1}) - 2 \cdot \phi(x)}{h^2}$$

siendo  $h$  la distancia entre cada nodo.

### 2.2.1.6. MAC

El parámetro MAC (Modal Assurance Criterion) es un comparador entre modos de vibración.

Se define como:

$$MAC = \frac{(\phi_u^T \cdot \phi_d)^2}{(\phi_d^T \cdot \phi_d) \cdot (\phi_u^T \cdot \phi_u)}$$

Mientras más cercano a la unidad sea el parámetro, más semejante serán los modos de vibración.

### 2.2.2. Método híbrido basado en transformada wavelet

La transformada Wavelet es una evolución de la transformada de Fourier con ventana deslizante o transformada de Garbor, donde la señal era dividida en segmentos de tiempo en los que puede considerarse cuasi-estacionaria.

Las Wavelets  $\Psi_s$  son construidas a través de una “Wavelet madre  $\Psi$ ” [6]:

$$\Psi_{u,s}(x) = \frac{1}{\sqrt{s}} \Psi\left(\frac{x-u}{s}\right)$$

donde  $s$  corresponde a la escala y aporta información de la frecuencia, mientras que  $u$  corresponde a la translación y da información acerca del tiempo-espacio. Las Wavelets se definen en una posición  $x$ , y tanto ésta como la variable que define la translación  $u$  pueden ser definidas en términos de espacio o tiempo.

La transformada continua Wavelet de una función  $f(x)$  se define como:

$$CWT_f(u, s) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \Psi^*\left(\frac{x-u}{s}\right) dx$$

donde  $\Psi^*$  es el complejo conjugado de la función Wavelet  $\Psi$ .

$CWT_f$  son los coeficientes de la transformada continua Wavelet de la función  $f$  para la Wavelet  $\Psi$ . Estos coeficientes indican como de similar es  $f$  respecto a  $\Psi$  para cada escala y en cada posición. Así, si existe algún cambio en alguna localización, se producirá también un cambio en el contenido en frecuencia de la señal en esa localización. Esto afectará directamente a dichos coeficientes que se verán alterados por la discontinuidad.

Para aplicar esta metodología a la detección y localización de daños en estructuras, en primer lugar necesitaremos obtener los modos de vibración de la estructura sin daño  $\phi_u$  y con daño  $\phi_d$ , así como las frecuencias naturales  $\omega_u, \omega_d$ .

Definimos la siguiente función a la cual le aplicaremos la transformada:

$$\phi_{diff} = (\phi_d - \phi_u) \cdot \left(1 - \frac{\omega_u}{\omega_d}\right)^2$$

Los coeficientes  $CWT\phi_{diff}$  serán los indicadores de la existencia de algún daño en la estructura.

### 3. ANÁLISIS MODAL VIGAS METÁLICAS

La obtención de los parámetros modales de las vigas bajo estudio es el primer paso del presente proyecto, por tanto, es importante certificar que los datos obtenidos durante los ensayos sean los correctos, así como su posterior manejo en el software.

Para ello, a la hora de procesar la señal se ha realizado algunos análisis para conseguir unos resultados lo más exacto y limpios posibles. Estos análisis afectan al número de orden y a la ventana temporal en las operaciones con las señales recogidas durante el ensayo.

#### 3.1. Descripción del ensayo

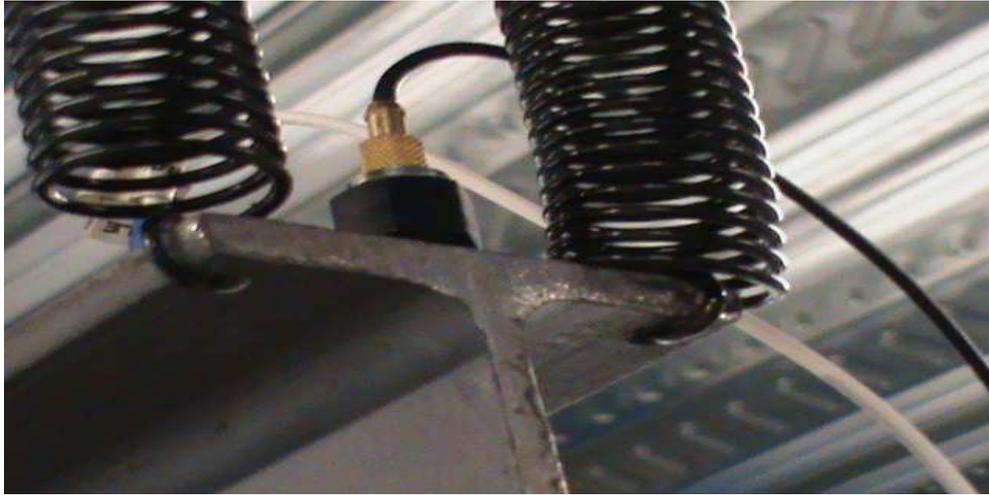
El ensayo no es más que hacer vibrar a una viga y recoger las aceleraciones que esta experimenta en múltiples puntos. A más puntos mejor va a ser los resultados posteriores, por tanto, no hay que escatimar en ello.

En primer lugar vamos a describir los equipos y materiales empleados en el transcurso del ensayo:

- Viga: Como ya se comentó, los métodos de detección de daño se aplicarán a vigas de acero IPE 100. Su longitud es de 127 cm. Las condiciones de contorno a las que está expuesta son similares a una condición libre-libre. Para ello, la viga se encuentra suspendida y soportada por cuatro muelles en sus extremos.



*Figura 1. Viga durante el ensayo*



*Figura 2. Apoyo con muelles para simular una condición de contorno libre-libre*

- Muelles: Poseen una rigidez muy baja para aproximar las condiciones a libre-libre.



*Figura 3. Muelles*

- Acelerómetros piezoeléctricos: Las aceleraciones de los distintos puntos los recogeremos con un total de 11 acelerómetros. Esto no implica que sólo vayamos a conocer las aceleraciones de 11 localizaciones de la estructura, puesto que los iremos desplazando hasta cubrir un total de 65 localizaciones distintas repartidas por toda la viga.

Los acelerómetros van roscados a tuercas que se encuentran pegadas sobre la superficie de la viga.



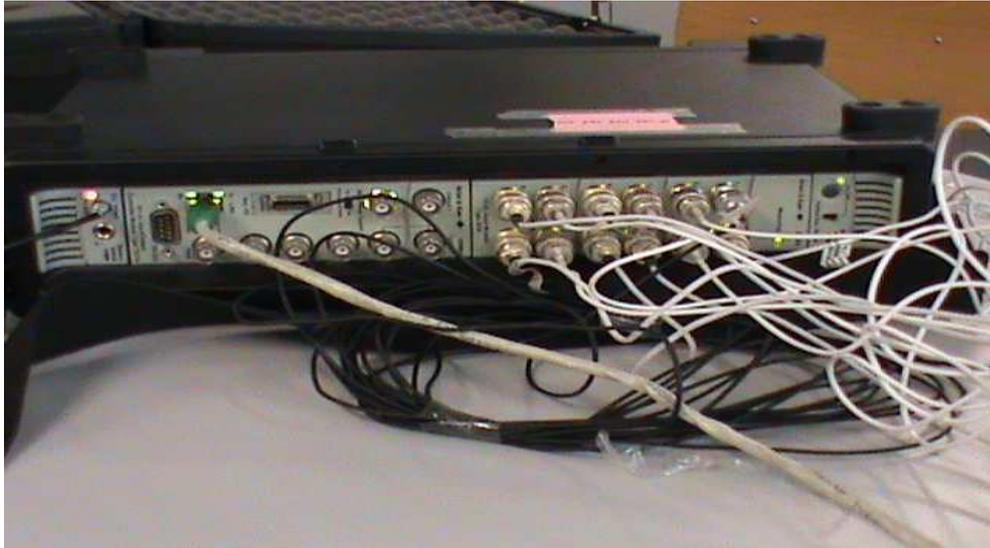
*Figura 4. Acelerómetro piezoeléctrico roscado a tuerca*

- Martillo instrumental: Lo emplearemos para excitar la viga. La fuerza que aplicaremos será registrada para poder trabajar con el análisis modal clásico o con la metodología CSI.



*Figura 5. Martillo experimental*

- Equipo de registro: Registraremos las señales provenientes de los acelerómetros y los enviaremos al ordenador para poder trabajar con ellas.



*Figura 6. Equipo de registro*

### Desarrollo del ensayo

Colocamos los acelerómetros repartidos equidistantemente por la viga. Éstos irán conectados a su canal correspondiente en el equipo de adquisición. Haremos lo propio con el martillo instrumental, teniendo un total de 12 señales de entrada.

Colocamos la viga de modo que quede suspendida con cuatro muelles en sus extremos.

Golpeamos la viga por uno de sus extremos intentando en la medida de lo posible evitar rebotes del martillo, lo cual alterará el desarrollo del ensayo. Es preferible, si esto sucediera, volver a repetir el ensayo de tal manera que sólo exista una excitación limpia. Realizaremos un total de 5 martillazos procesando 30 segundos todas las señales de entrada en cada martillazo. El motivo de un proceso repetitivo en la obtención de datos es que realizaremos una promediación de las señales en estas cinco excitaciones con el fin de suavizar posibles irregularidades en algunas de ellas.

Desplazaremos los 9 acelerómetros centrales en el mismo sentido una séptima parte de la distancia que le separa con el acelerómetro contiguo, dejando fijos durante toda la experimentación los dos acelerómetros extremos. Repetiremos el ensayo de nuevo, y volveremos a desplazar los acelerómetros en el mismo sentido movido anteriormente y cubriendo la misma distancia. Llegamos a trasladar hasta siete veces los nueve acelerómetros centrales, cubriendo un total de 63 posiciones que más los dos correspondientes a los acelerómetros extremos, tendremos un total de 65 localizaciones de la viga de las cuales conocemos sus desplazamientos. Teniendo en cuenta que posee una longitud de 127 cm, significa que conocemos sus movimientos en intervalos menores de 2 cm.

En la configuración del software hemos de destacar que hemos empleado un filtro de paso alto de 7 Hz y una promediación lineal de los cinco ensayos que se realizan en cada configuración.

## **3.2. Obtención de parámetros modales de las vigas**

Empleamos el analizador portátil tipo PULSE de Brüel & Kjaer para posteriormente hallar los parámetros modales mediante la rutina SPICE perteneciente al programa MATLAB.

SPICE procesa e identifica los parámetros modales de los archivos provenientes de PULSE, previamente convertidos a formato texto, y permite ciertas variaciones durante su procesamiento como son el tipo de identificación del sistema, número de orden en el análisis, tamaño de la ventana temporal, decimación, frecuencia de muestreo, etc.

Para la identificación del sistema utilizaremos la opción de “Combined Subspace Identification Method”. En cuanto al orden y al tamaño de la ventana temporal es necesario realizar un análisis de qué valor es el idóneo tomar para que los resultados obtenidos sean los mejores posibles.

### **3.2.1. Análisis de influencia en el número de orden**

El programa SPICE nos ofrece un diagrama de estabilización en el que se representan polos a distinto número de orden para cada frecuencia natural. La elección de un polo u otro puede acarrear grandes dificultades si el que se toma no es lo suficientemente estable, y nos proporcionará un modo de vibración impreciso. Por eso, hay que escoger un orden para el cual todos los polos que se encuentren en éste sean estables, y si no es posible, escoger un número de orden diferente para cada frecuencia natural si fuese preciso.

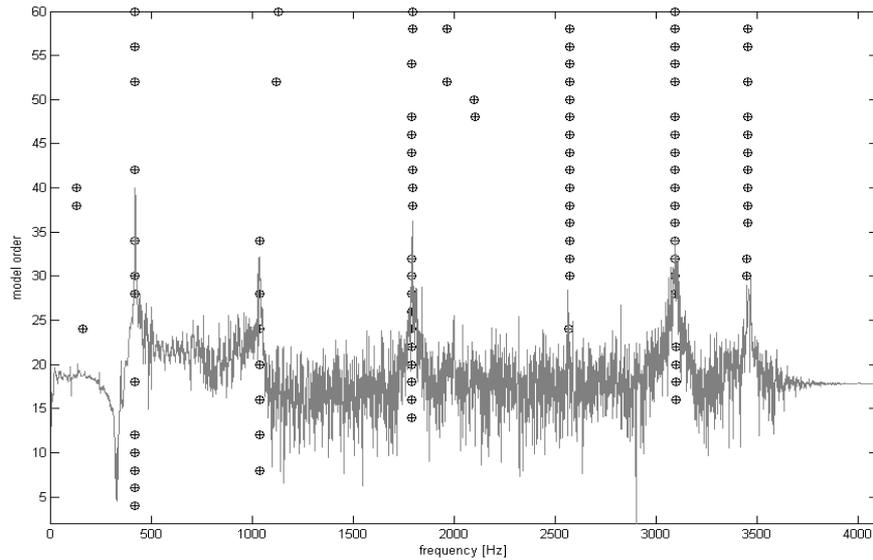


Figura 7. Diagrama de estabilización

En este apartado vamos a realizar un análisis de la influencia que tienen en los modos de vibración el número de orden en el que nos encontremos, quedándonos con aquel cuyos resultados sean los más idóneos.

Los resultados mostrados son de la viga con daño en el borde. Se ha realizado el análisis de seis números de órdenes distintos (10, 20, 30, 40, 50, 60). Todos los análisis poseen los mismos parámetros exceptuando el número de orden en la elección de polos estables.

Los parámetros del análisis se recogen en la siguiente tabla:

Viga IPE 100 daño en el borde	
Análisis modal	CSI
Frecuencia de muestreo	16384
Decimación	2
Nº muestras de la ventana temporal	15424

Tabla 1. Parámetros de entrada en SPICE

Los cinco primeros modos de vibración para cada número de orden se representan a continuación:

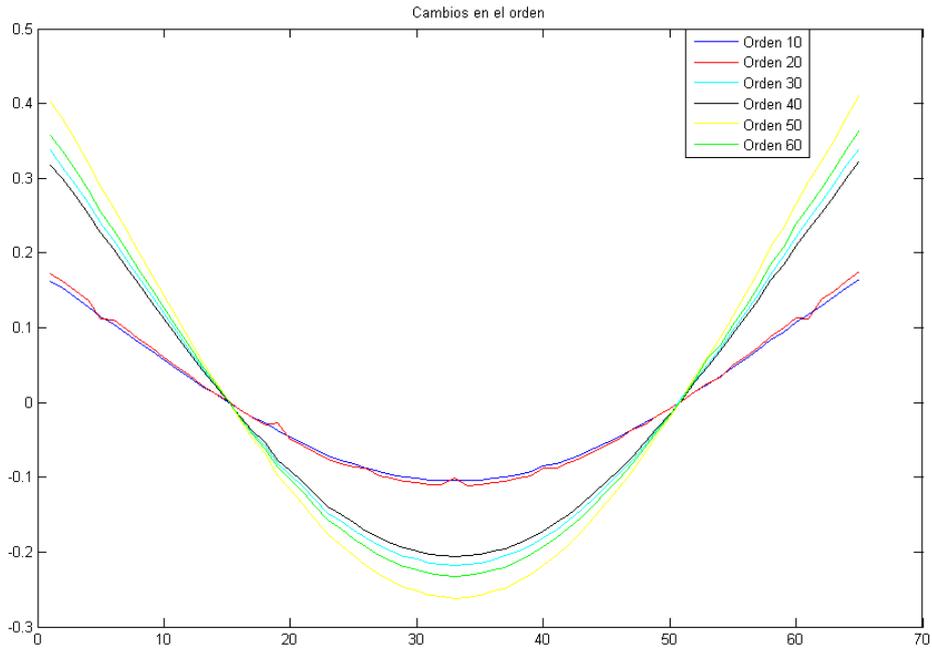


Figura 8. Primer modo de vibración. Daño borde

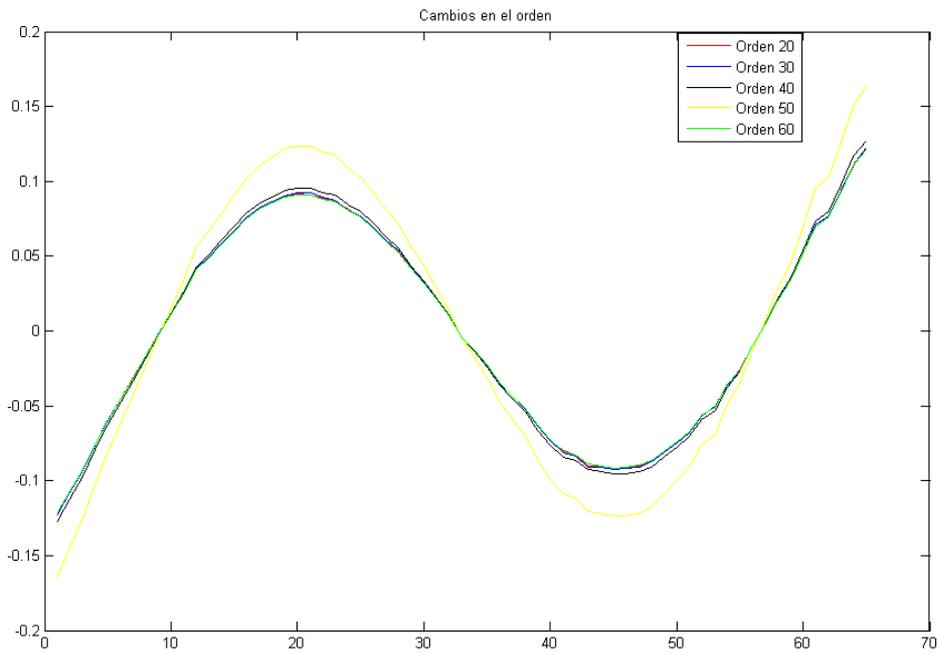
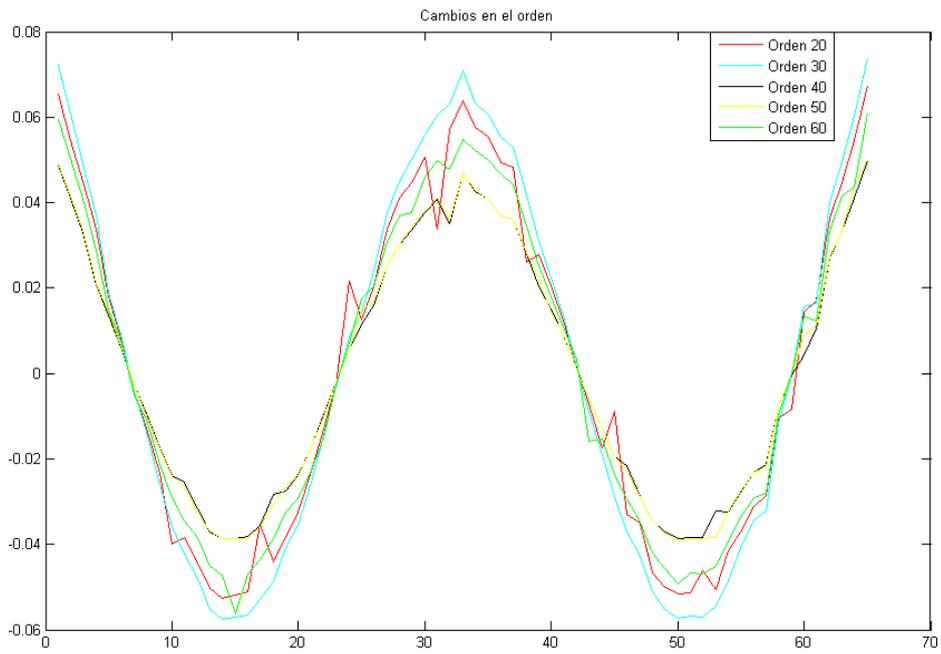
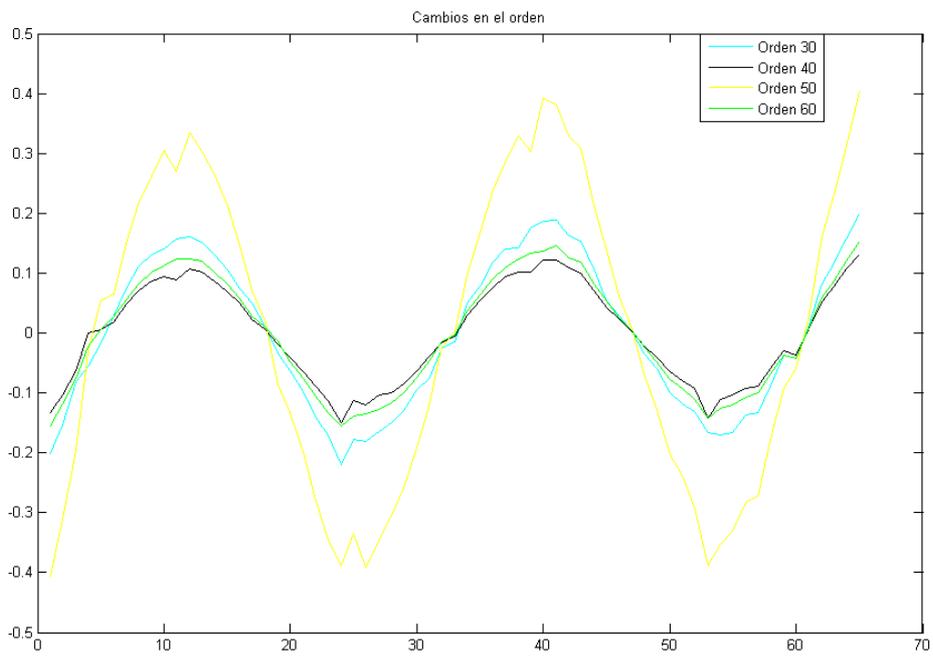


Figura 9. Segundo modo de vibración. Daño borde



*Figura 10. Tercer modo de vibración. Daño borde*



*Figura 11. Cuarto modo de vibración. Daño borde*

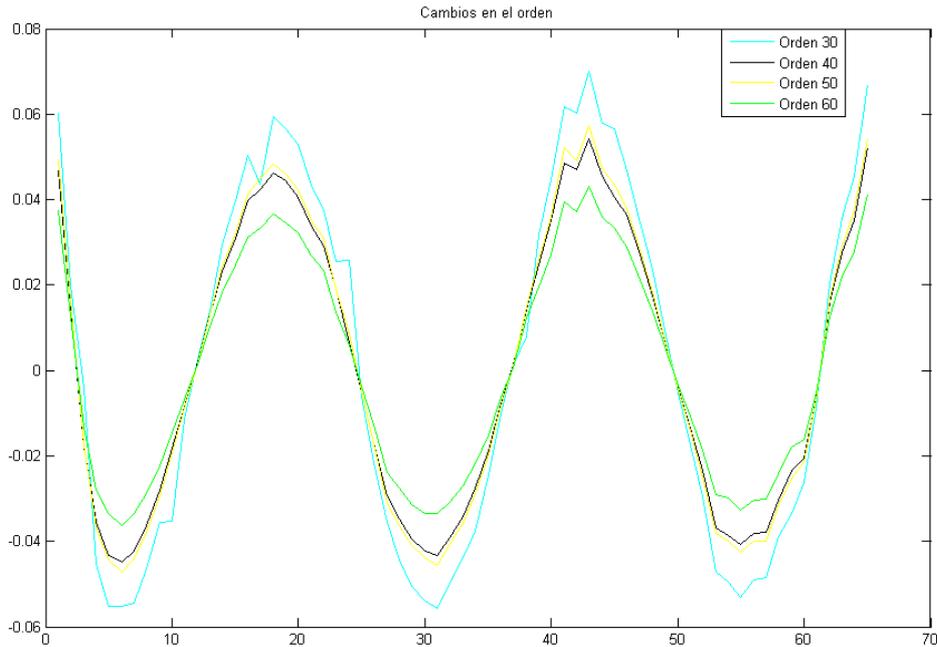


Figura 12. Quinto modo de vibración. Daño borde

Para un orden de 10 sólo se ha encontrado el primer modo de vibración, y para un orden 20, los tres primeros. Éstos son por tanto un orden demasiado pequeño para hacer un análisis con al menos 5 modos.

Para el resto, a simple vista sólo se puede corroborar que para un número de orden 30, el quinto modo resulta inadecuado.

Para tener otra visión aproximada de la calidad de los modos, aparte de las representaciones de éstos, se ha recurrido a calcular el tamaño de algunas imperfecciones y su proporción con el tamaño del modo al que pertenece. Esto es, la diferencia entre el valor en ordenadas de la posición que falla y el valor en ordenadas de la siguiente posición, todo ello dividido entre la amplitud máxima del modo.

Todo ello multiplicado por cien, nos da un porcentaje del tamaño de la imperfección respecto al modo

$$\text{Proporción de la imperfección} == \frac{y - y_{+1}}{\text{amplitud máxima del modo}} \times 100$$

Donde  $y$  es el valor en ordenadas de la posición donde existe el fallo,  $y_{+1}$  es el valor en ordenadas de la posición posterior.

Los modos que presentan una mayor irregularidad en una de sus localizaciones son el cuarto y el quinto en las localizaciones 25 y 42 respectivamente.

La proporción de éstas para los distintos números de orden se muestran en las siguientes tablas:

MODO 4		
Orden polos	de	Proporción de la imperfección (%)
30		10.238
40		14.133
50		6.947
60		5.898

*Tabla 2. Proporción de las imperfecciones del cuarto modo*

MODO 5		
Orden polos	de	Proporción de la imperfección (%)
30		7.853
40		7.264
50		7.950
60		7.478

*Tabla 3. Proporción de las imperfecciones del quinto modo*

A mayor orden mejor va a ser la calidad de los modos de vibración. Aunque, generalmente, los polos considerados como estables por el programa SPICE, son muy parecidos para una misma frecuencia natural, a la vista de los resultados, a un nivel superior, los polos son, en principio, más estables.

Sin embargo, no es una regla estricta, pues puede verse en la figura para el tercer modo, para un orden de 60, el modo es muy irregular. Esto es debido a que el polo de este nivel en la 3ª frecuencia natural, no es tan estable como desearíamos.

Observando los valores de proporción de las imperfecciones, nos refuerza en la teoría de que un mayor orden disminuye las irregularidades, defecto clave en el estudio de dónde se encuentra el daño, puesto que si estas imperfecciones son debidas a un error en el ensayo de laboratorio (como es este caso), es posible que algunos métodos den resultados incorrectos motivados por los “picotazos” presentes en los modos.

El análisis de modos de vibración con órdenes excesivamente bajos, trae además un grave problema como es la imposibilidad en encontrar polos a frecuencias altas. De esta manera, sólo se podrán obtener los primeros modos de vibración, y además, es posible que con polos inestables tal y como nos ocurre para el orden 20, por lo que se tendrá que desechar dichos modos.

### 3.2.2 Análisis de la variación de la ventana temporal

El número de puntos tomado para el análisis dinámico puede ser decisivo en la calidad de los modos, puestos que si nos quedamos excesivamente cortos de puntos, estaremos perdiendo información necesaria. Por otro lado, un exceso de puntos se traduce en un elevado costo experimental, así que habrá que llegar a un compromiso entre ambas.

Se ha realizado un análisis con distintas ventanas temporales, obteniendo los modos de vibración para cada una de ellas. En total se han recurrido a 12 ventanas temporales (15424, 20000, 30000, 40000, 50000, 60000, 62500, 65000, 67500, 70000, 72500 y 75000 puntos)

Los parámetros del análisis se recogen en la siguiente tabla:

Viga IPE 100 daño en el borde	
Análisis modal	CSI
Frecuencia de muestreo	16384
Decimación	2
Orden de todos los polos	46

Tabla 4. Parámetros de entrada en SPICE

Los cinco primeros modos de vibración para cada ventana temporal se representan a continuación:

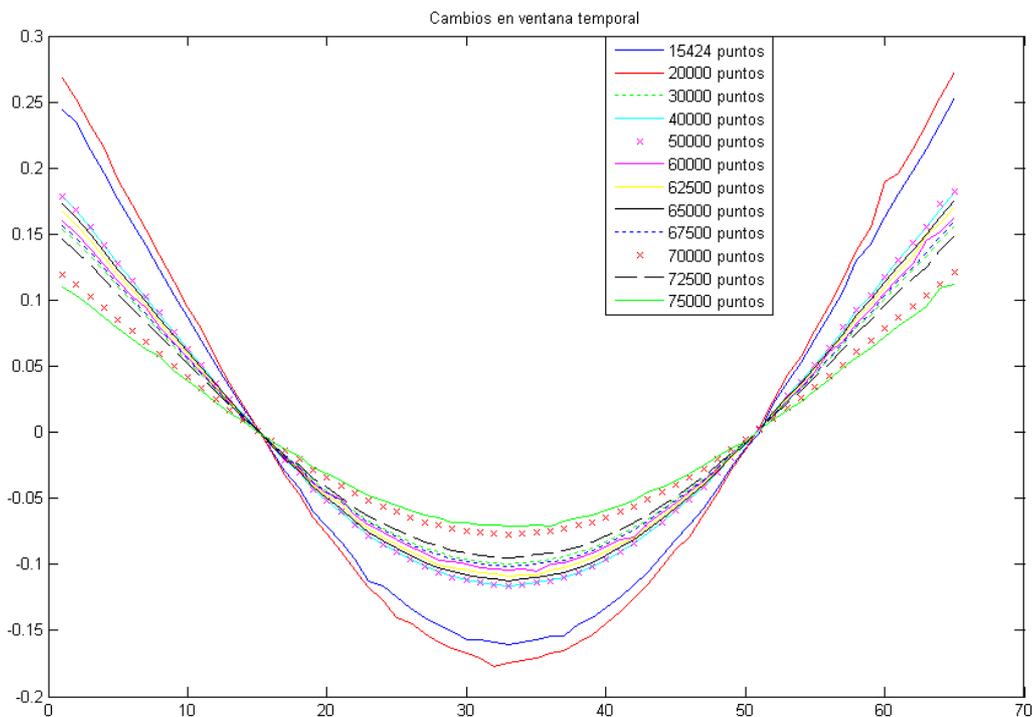


Figura 13. Primer modo de vibración. Daño borde

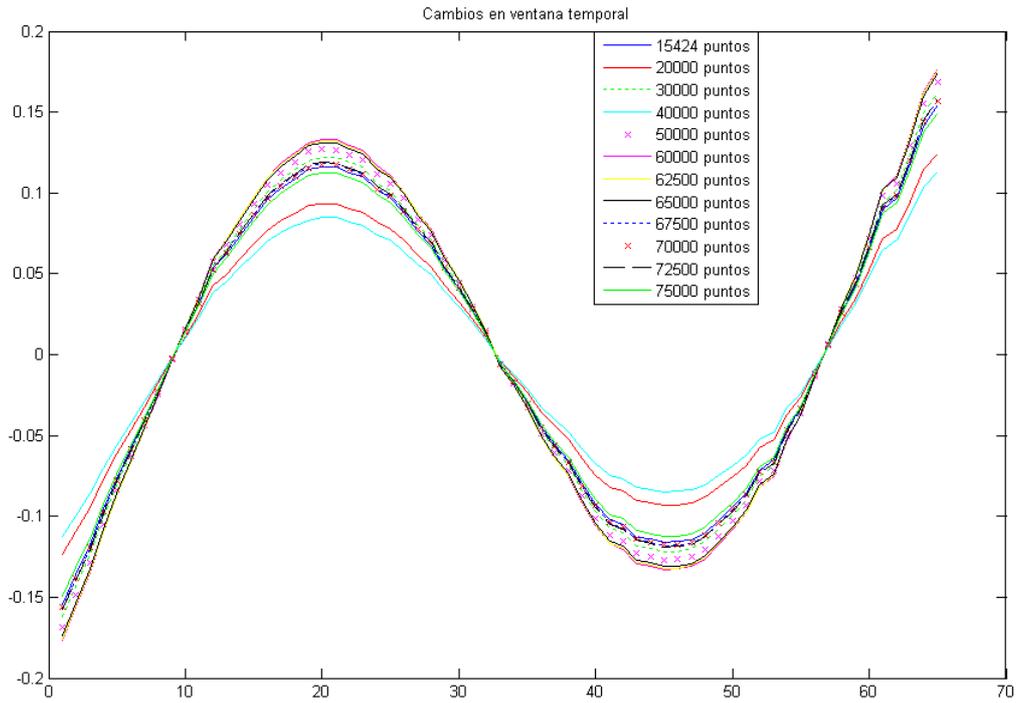


Figura 14. Segundo modo de vibración. Daño borde

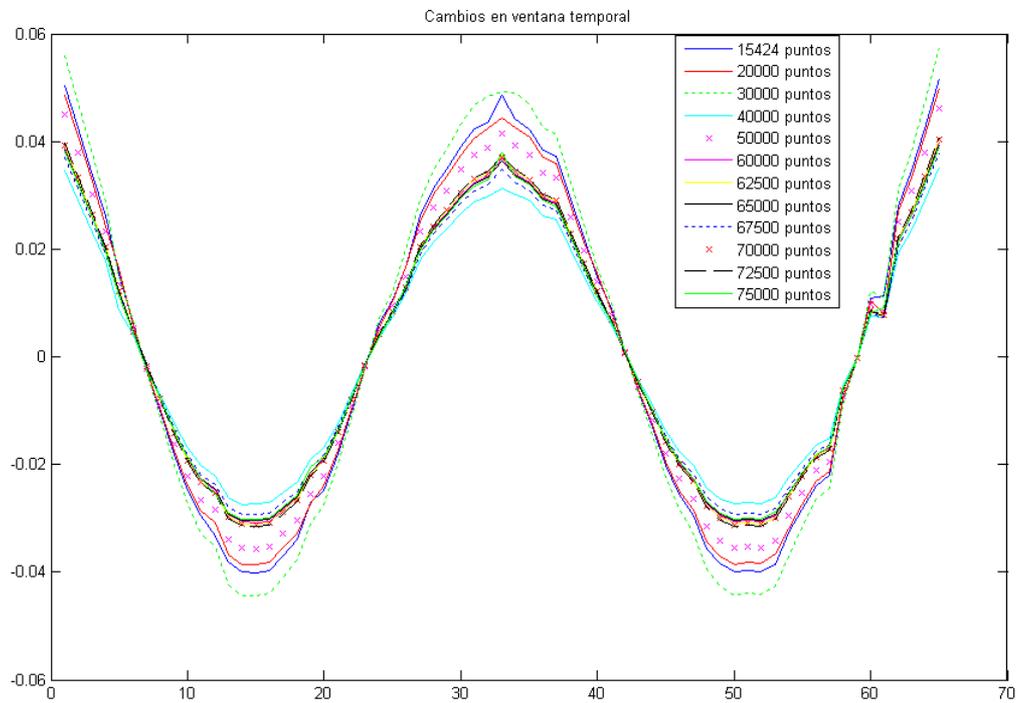


Figura 15. Tercer modo de vibración. Daño borde

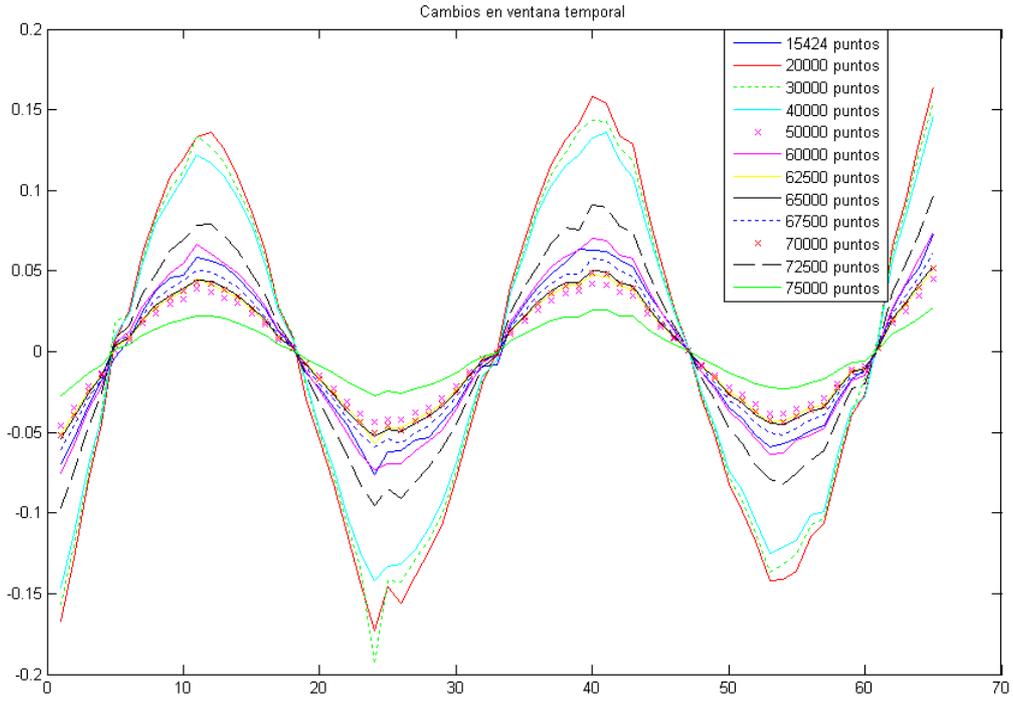


Figura 16. Cuarto modo de vibración. Daño borde

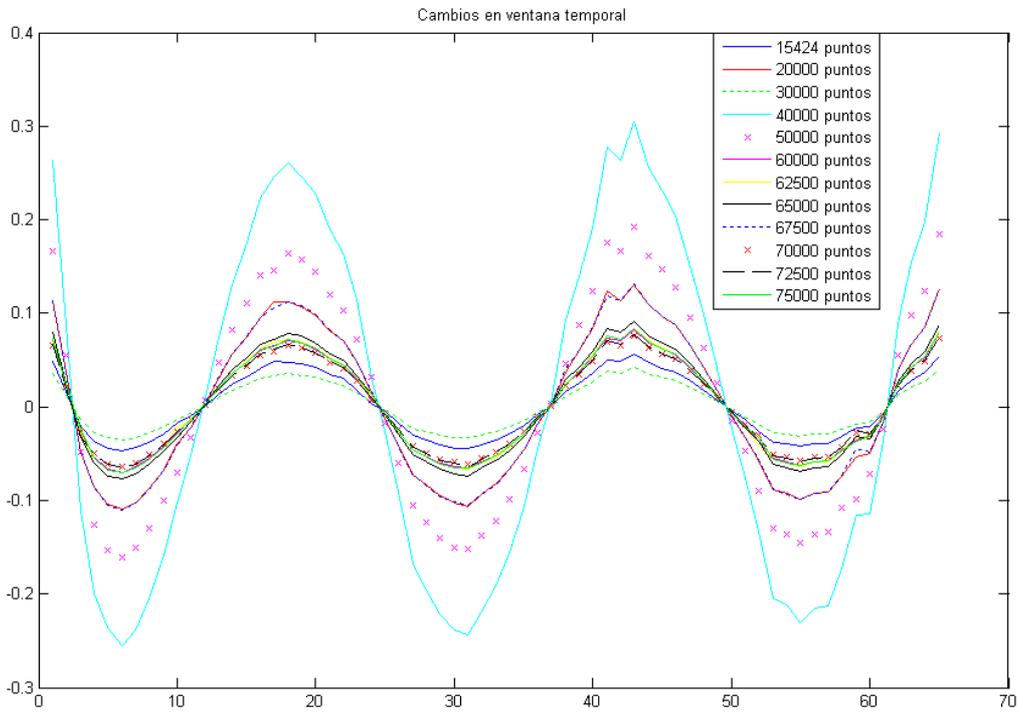


Figura 17. Quinto modo de vibración. Daño borde

Gráficamente no podemos concluir nada sobre qué ventana parece la más adecuada, por lo que volvemos a calcular la proporción de las imperfecciones presentes en los últimos dos modos de vibración en las localizaciones 25 y 42 respectivamente.

MODO 4	
Puntos de la ventana temporal	Proporción de la imperfección (%)
15424	9.737
20000	8.212
30000	15.312
40000	3.368
50000	1.780
60000	2.600
62500	8.857
65000	4.721
67500	4.680
70000	4.593
72500	5.732
75000	4.904

Tabla 5. Proporción de las

*imperfecciones del cuarto modo*

MODO 5	
Puntos de la ventana temporal	Proporción de la imperfección (%)
15424	7.659
20000	7.332
30000	7.394
40000	7.350
50000	7.297
60000	7.243
62500	7.293
65000	7.228
67500	7.243
70000	7.132
72500	7.185
75000	7.269

Tabla 6. Proporción de las

*imperfecciones del quinto modo*

En general, se puede llegar a la conclusión de que a mayor número de puntos, más amortiguada va a ser la señal. Esto era de esperar, puesto que a medida que pasa el tiempo menor será el efecto del martillazo sobre la viga, y más se verá afectada por el excitación ambiental (mucho menor que la del martillo).

Observando los valores de proporción de las imperfecciones, no puede estimarse cuál es la ventana óptima. Pero se puede decir, apoyándonos en la tabla del quinto modo, que hay cierta tendencia a disimular “los picotazos” cuando la ventana es mayor. Esto se traduce, en que como hemos comentado anteriormente, los modos se amortiguan, así que las irregularidades se hacen menos irregulares, y, a simple vista, parece que el modo mejora. Pero lo que nos puede aportar este parámetro no es tanto la elección sino el desechar ventanas.

### 3.2.3 Conclusiones

En relación con la estabilidad de polos, desde el punto de vista práctico, lo idóneo es ver para cada configuración y frecuencia natural, a qué orden se encuentran polos estables. Puede ocurrir, que sea imposible encontrar un mismo orden cuyos polos en todas las frecuencias naturales sean estables, obligándonos a buscar en órdenes distintos para cada una de las frecuencias naturales.

Así se puede resumir el análisis de variación del número de orden en los siguientes puntos:

- Mientras mayor sea el orden, mejor será la calidad de los modos. Sin embargo, esto no es estrictamente riguroso, pudiéndonos encontrar polos inestables en los niveles más altos.
- La elección de un orden pequeño trae consigo el riesgo de no encontrar polos a frecuencias altas, y además, los polos que se encuentren, es muy factible que sean inestables.
- A la hora de la elección del orden para obtener los modos de vibración, se recomienda realizar un breve análisis en las distintas frecuencias naturales para cada configuración (observar el diagrama de estabilización de algunos eventos), y tomar, si es necesario, distinto orden para cada frecuencia natural, con tal de que a ese orden y para esa frecuencia exista plena garantía de que se vaya a encontrar un polo estable.

Los parámetros modales obtenidos para la detección de daños poseen un número de orden de 46.

Respecto a la ventana temporal, podemos concluir que mientras mayor número de puntos posea, más suave serán los modos de vibración. Sin embargo, y debido al costo experimental que supone ventanas temporales muy amplias, no es necesario tomar un vasto número.

La extracción de los parámetros modales que utilizaremos de aquí en adelante proviene de una ventana temporal de 15424 puntos.

## 4. IDENTIFICACIÓN DE DAÑO EN VIGAS METÁLICAS

Una vez resuelto el primer paso de la obtención de parámetros modales, nos encontramos en disposición de aplicar los métodos de identificación de daños estudiados. Son varios los métodos que analizaremos, y aunque no es necesario aplicar todos en la práctica puesto que podemos obtener la misma información en algunos, a modo de estudio, detallaremos todos los resultados aún siendo repetitivos en ciertos casos.

Es necesario tomar un estado de referencia, el cual será comparado con todas las demás configuraciones, y es precisamente las variaciones que se puedan dar entre ambos estados, los indicios de que un daño pueda existir. Así, es obvio, que el estado de referencia será la viga intacta, y las demás serán el objeto de estudio. Recordando cuáles eran, se detallan a continuación:

DAÑO 0.50 L			DAÑO 0.25L			DAÑO BORDE
LEVE	MEDIO	MÁXIMO	LEVE	MEDIO	MÁXIMO	MÁXIMO
20 mm (a cada lado del ala)	10 mm (ala y alma dañada)	30 mm (ala y alma dañada)	20 mm a cada lado del ala	10 mm (ala y alma dañada)	30 mm (ala y alma dañada)	30 mm (ala y alma dañada)

*Tabla 7. Severidad vigas IPE 100 dañadas*

Además de las vigas ensayadas, se mostrarán los resultados de vigas con la misma tipología pero modeladas en elementos finitos para poder reforzar las conclusiones que obtengamos.

Cabe destacar que se han utilizado un total de 5 modos de vibración para todos los resultados presentes en el texto.

### 4.1 Parámetros modales clásicos de detección de daño

En este apartado se aplicará el programa DIbEMA. Analizaremos uno por uno todos los métodos que nos ofrece y los resultados que obtenemos a partir de ellos.

Para un daño localizado, examinaremos el efecto que tiene en las vigas cada una de las severidades.

## 4.1.1 Variación de las frecuencias naturales

Observamos el cambio que sufre las frecuencias naturales en presencia de un daño.

### 4.1.1.1. Daño 0.5L

- Severidad máxima

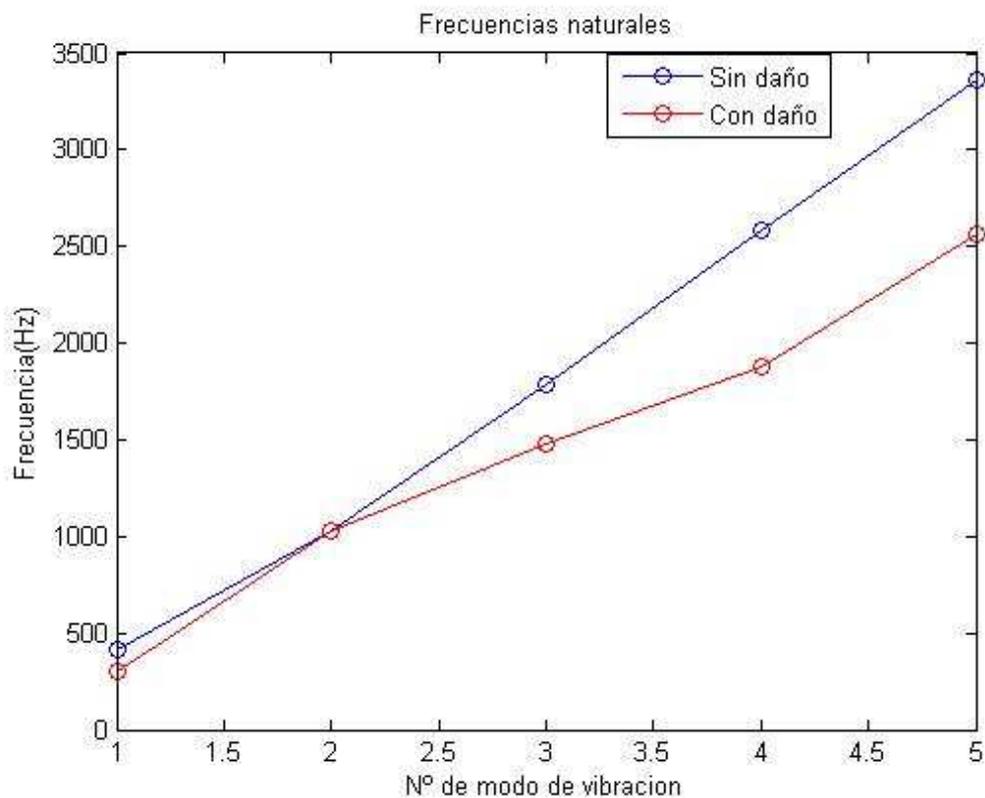


Figura 18. Variación de las frecuencias naturales. Daño 0.5L máx.

Nº de modo de vibración	1	2	3	4	5
Decremento de la frecuencia (%)	27.59	0.52	17.51	27.28	23.86

Tabla 8. Decremento de las frecuencias naturales con presencia de daño. Daño 0.5L máx.

Estos cambios nos indican que la viga presenta alguna alteración frente a la intacta.

- Severidad media

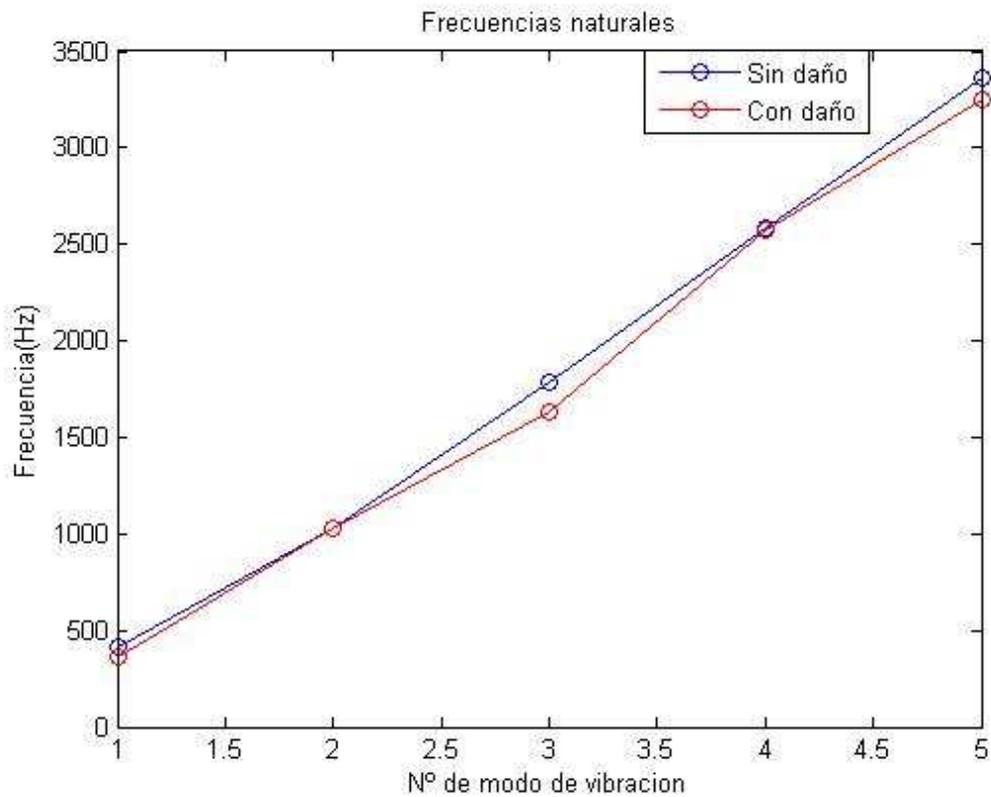


Figura 19. Variación de las frecuencias naturales. Daño 0.5L medio

Nº de modo de vibración	1	2	3	4	5
Decremento de la frecuencia (%)	12.84	0.25	8.54	0.19	3.35

Tabla 9. Decremento de las frecuencias naturales con presencia de daño. Daño 0.5L medio

Las frecuencias naturales asociadas al primer, tercer y quinto modo de vibración son las que más difieren entre sí.

- Severidad leve

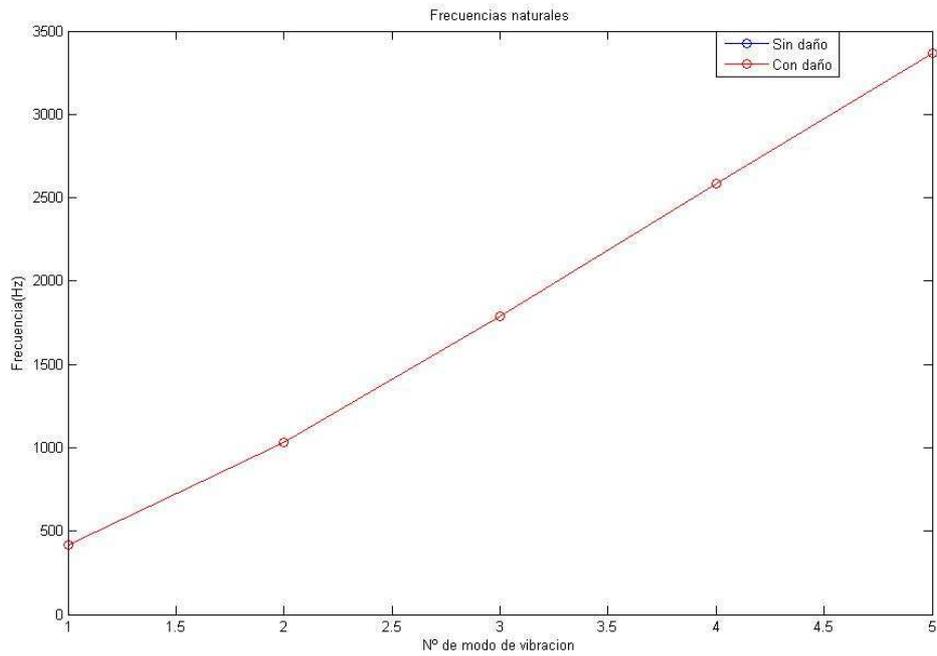


Figura 20. Variación de las frecuencias naturales. Daño 0.5L leve

Nº de modo de vibración	1	2	3	4	5
Decremento de la frecuencia (%)	0.0011	0.0000	0.0000	0.0001	0.0000

Tabla 10. Decremento de las frecuencias naturales con presencia de daño. Daño 0.5L leve

Se observa cómo no existe variación significativa entre frecuencias.

### 4.1.1.2. Daño 0.25L

- Severidad máxima

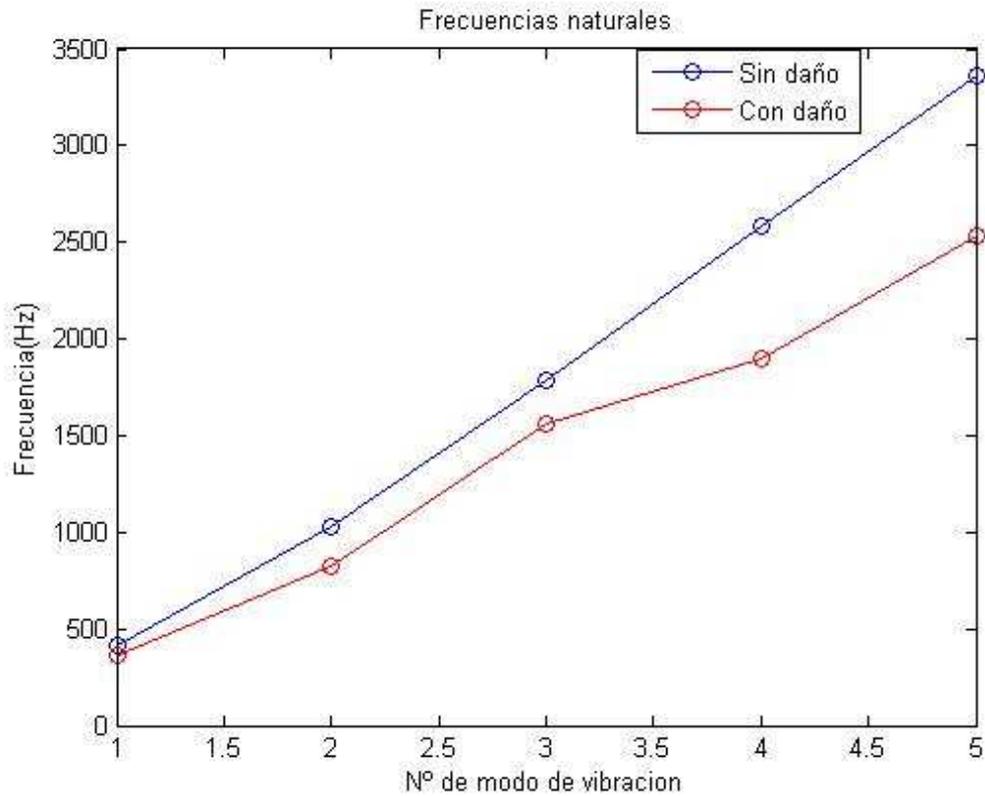


Figura 21. Variación de las frecuencias naturales. Daño 0.25L máx.

Nº de modo de vibración	1	2	3	4	5
Decremento de la frecuencia (%)	12.25	20.31	12.85	26.54	24.89

Tabla 11. Decremento de las frecuencias naturales con presencia de daño. Daño 0.25L máx.

Todas las frecuencias presentan grandes desviaciones.

- Severidad media

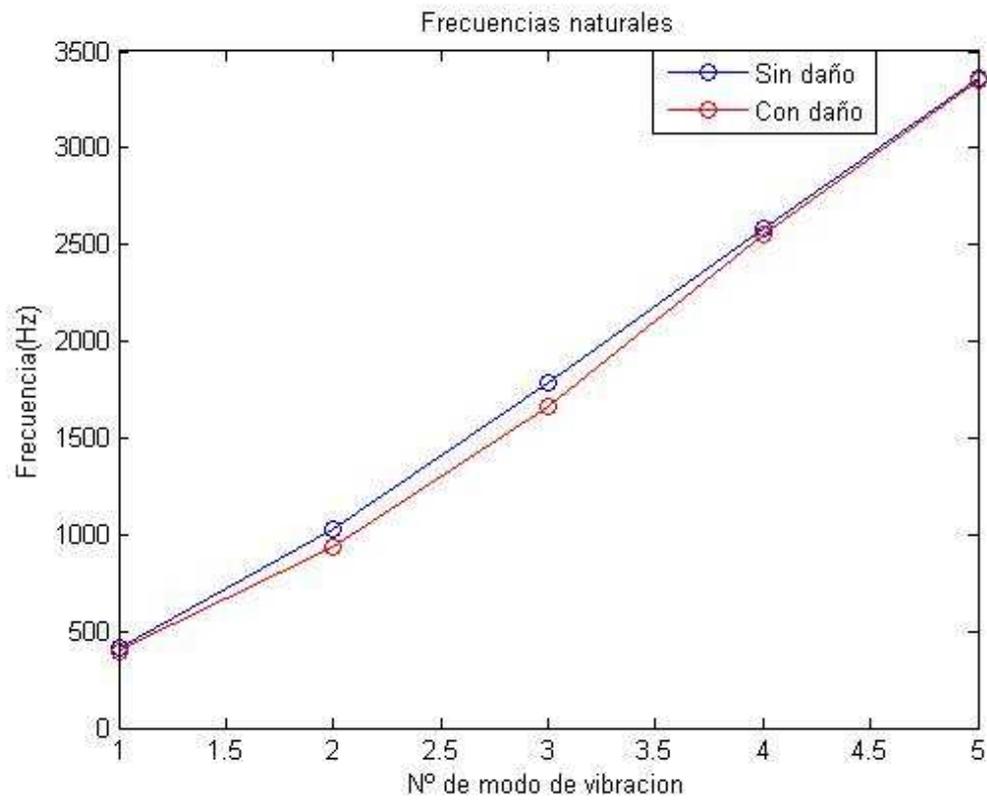


Figura 22. Variación de las frecuencias naturales. Daño 0.25L medio

Nº de modo de vibración	1	2	3	4	5
Decremento de la frecuencia (%)	4.42	9.68	6.92	0.97	0.37

Tabla 12. Decremento de las frecuencias naturales con presencia de daño. Daño 0.25L medio

Las frecuencias asociadas al segundo y tercer modo presentan variaciones.

- Severidad leve

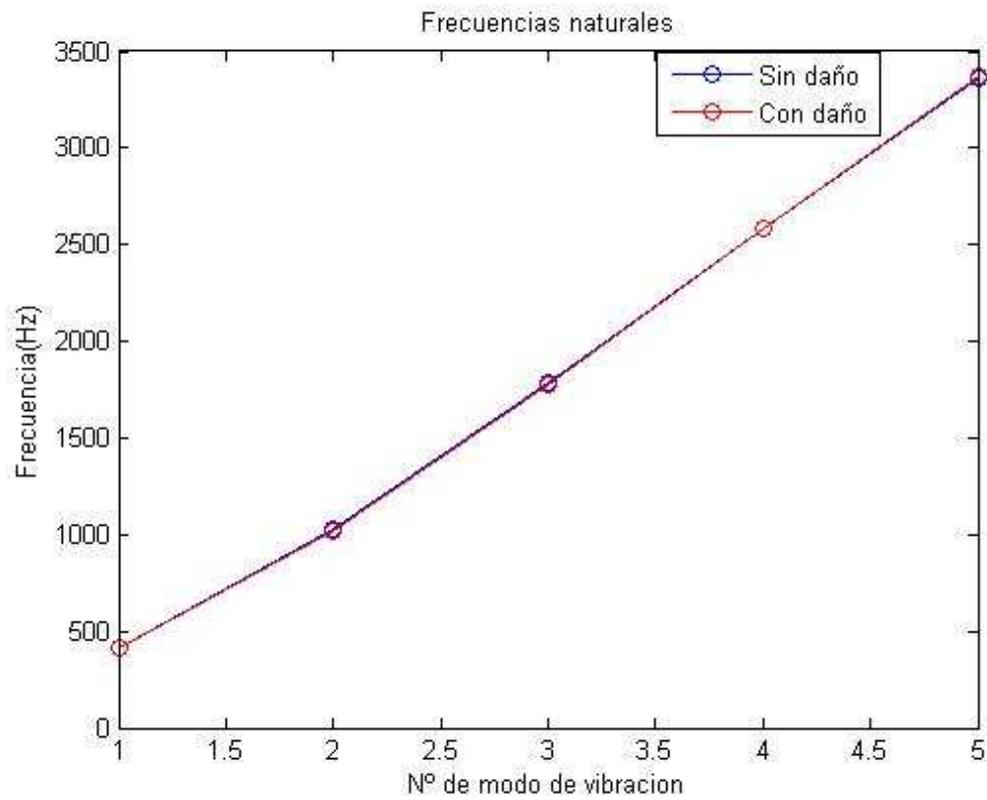


Figura 23. Variación de las frecuencias naturales. Daño 0.25L leve

Las frecuencias no sufren grandes cambios.

Nº de modo de vibración	1	2	3	4	5
Decremento de la frecuencia (%)	0.15	1.21	0.79	0.09	-0.13

Tabla 13. Decremento de las frecuencias naturales con presencia de daño leve

### 4.1.1.3. Daño borde

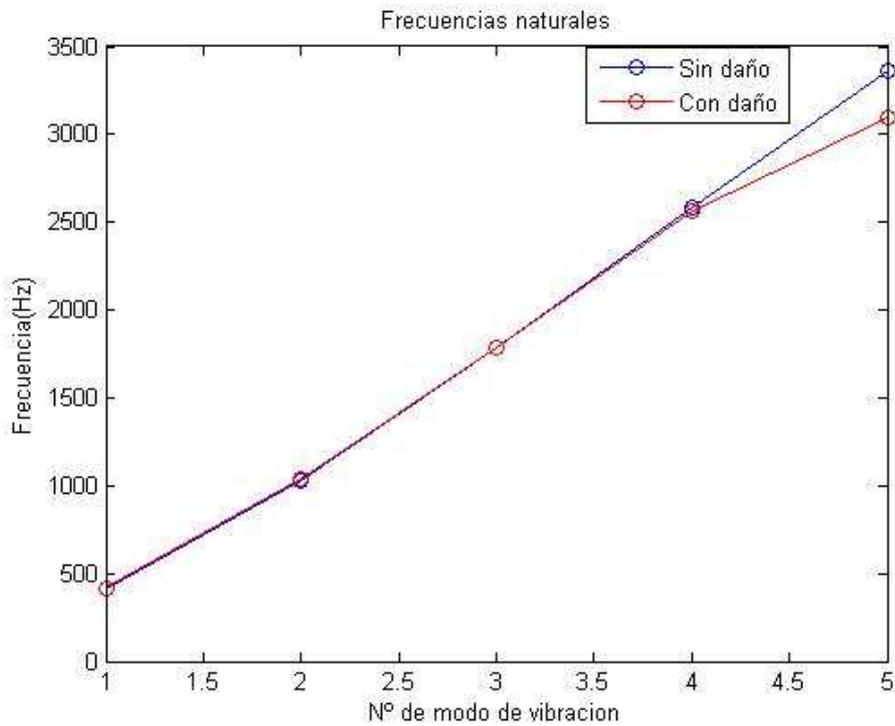


Figura 24. Variación de las frecuencias naturales. Daño borde

Nº de modo de vibración	1	2	3	4	5
Decremento de la frecuencia (%)	-0.52	-0.18	-0.20	0.64	8.01

Tabla 14. Decremento de las frecuencias naturales con presencia de daño. Daño borde

La frecuencia asociada al quinto modo es el que más desviación presenta.

### 4.1.2 Variación de los modos de vibración

Comparamos los modos de vibración de todos los estados dañados con el estado sin daño.

### 4.1.2.1. Daño 0.5L

- Severidad máxima

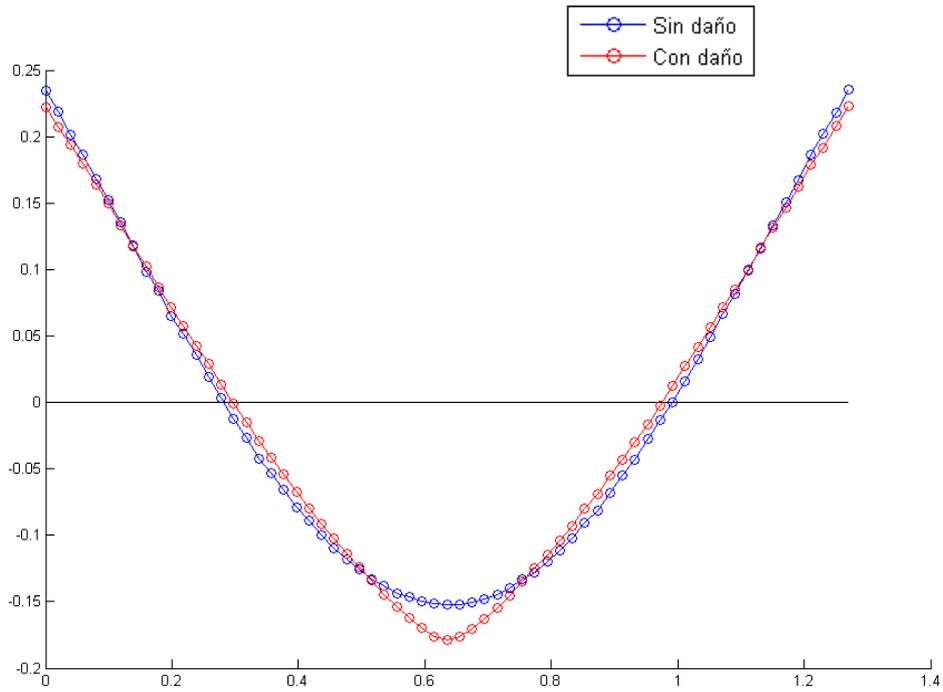


Figura 25. Primer modo de vibración. Daño 0.5L máx.

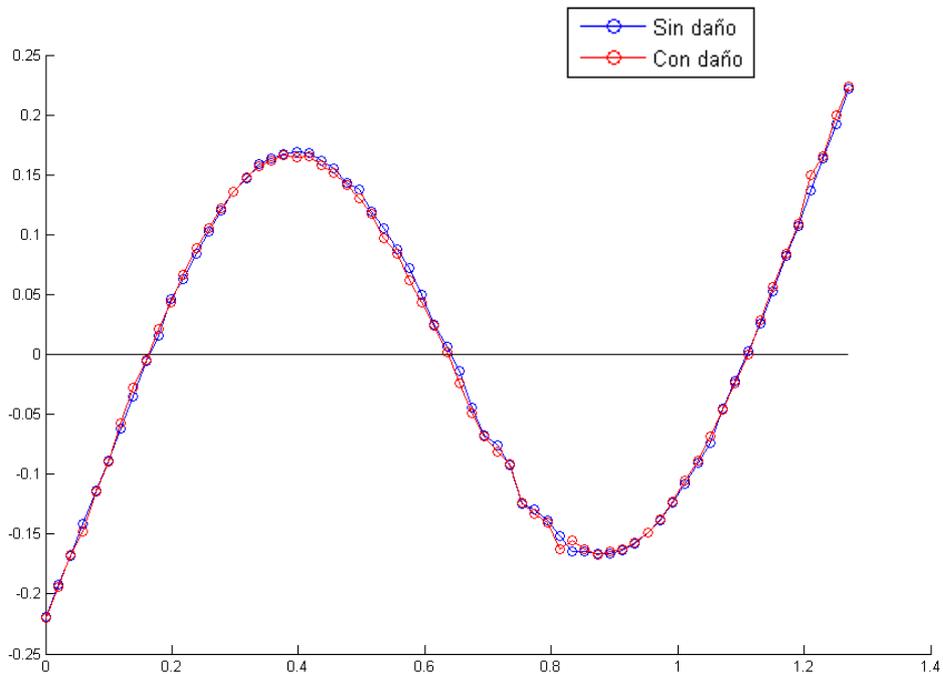


Figura 26. Segundo modo de vibración. Daño 0.5L máx.

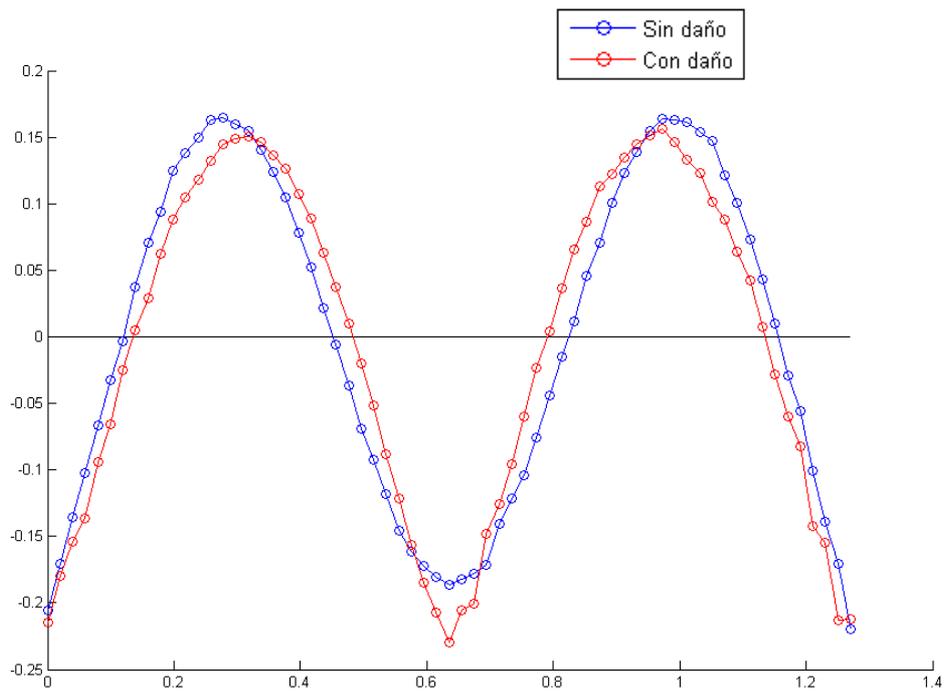


Figura 27. Tercer modo de vibración. Daño 0.5L máx.

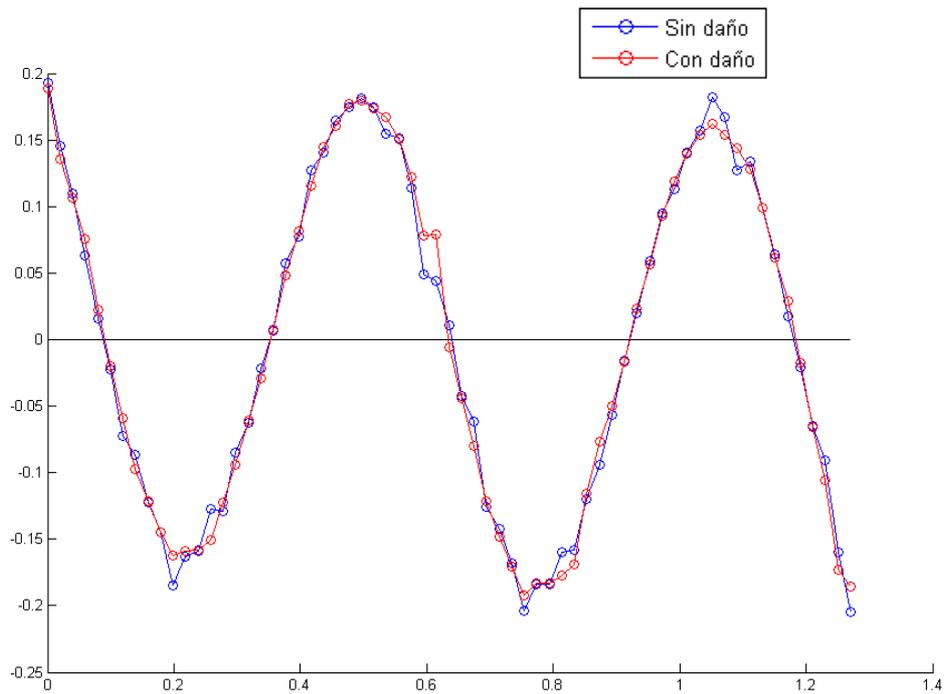


Figura 28. Cuarto modo de vibración. Daño 0.5L máx.

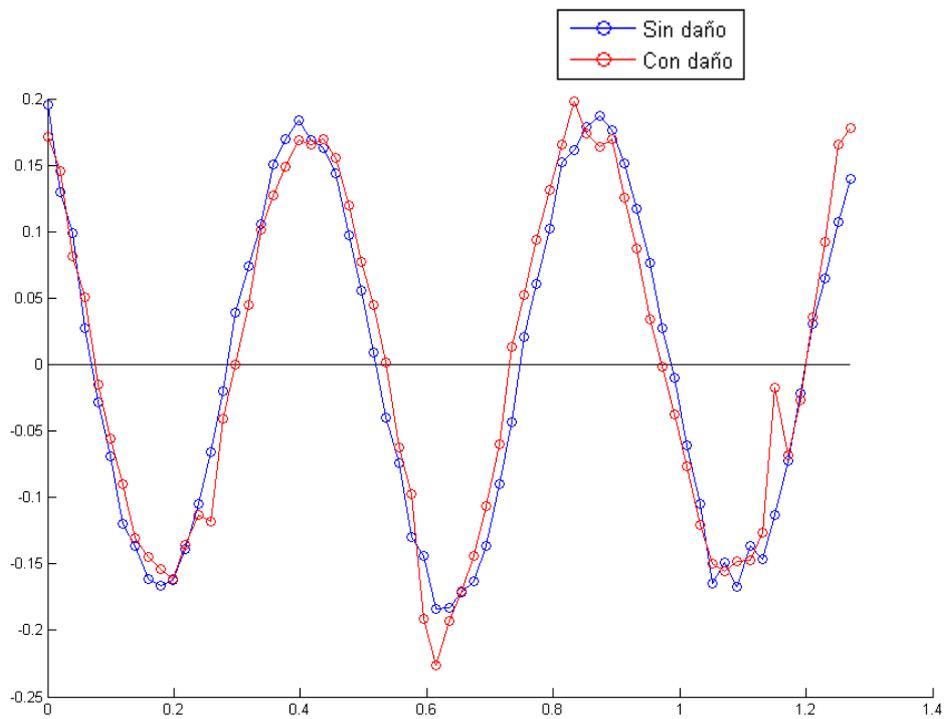


Figura 29. Quinto modo de vibración. Daño  $0.5L$  máx.

Se puede observar como algunos modos dañados (de rojo) difiere del intacto en su zona central. Esta es una clara indicación de que existe un daño en la estructura.

Además, se puede ver, que aquellos modos que no tengan un nodo en el centro, difieren en esta sección de la estructura. Por tanto, podemos intuir que existe un daño localizado por esta zona.

▪ Severidad media

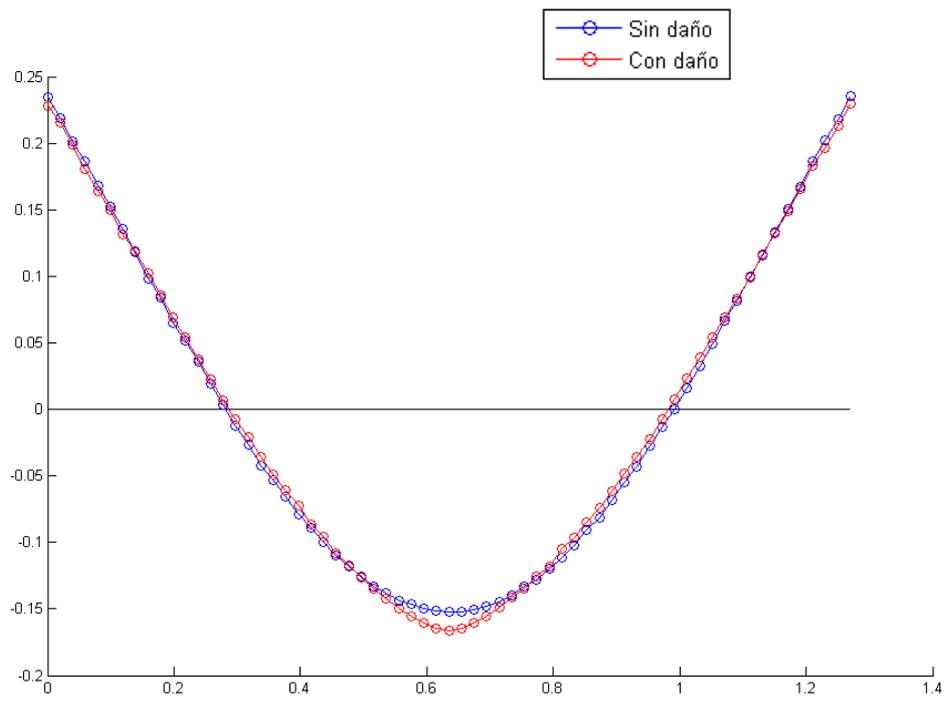


Figura 30. Primer modo de vibración. Daño 0.5L medio

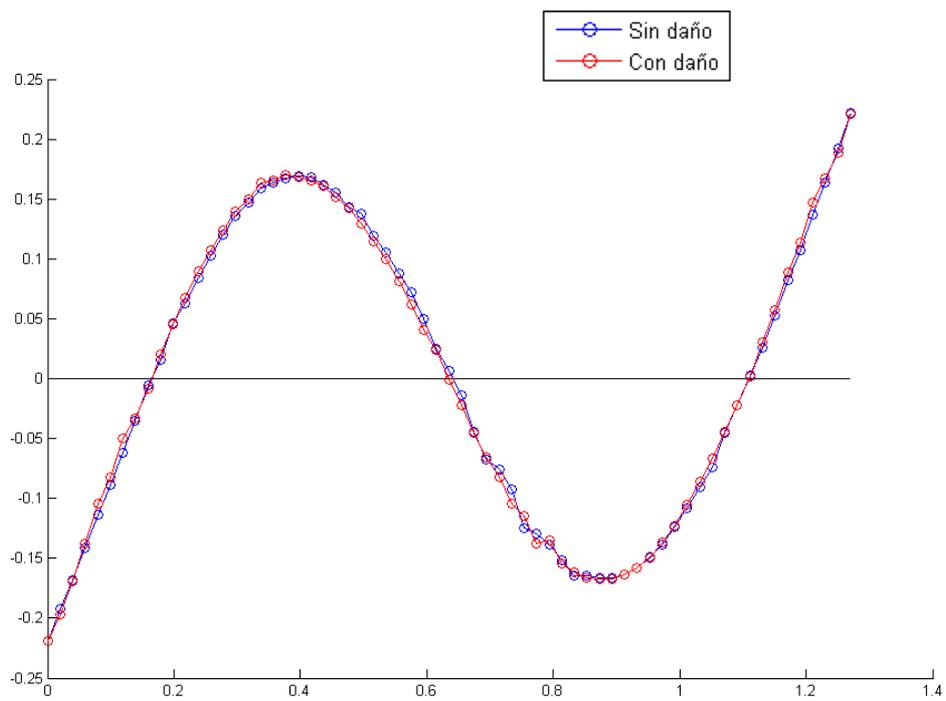


Figura 31. Segundo modo de vibración. Daño 0.5L medio

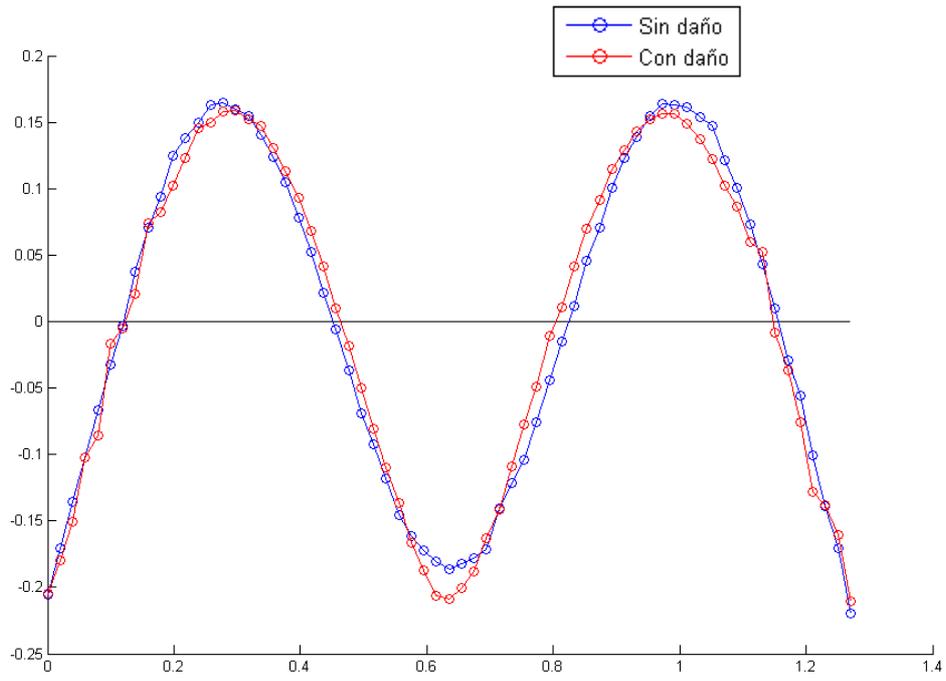


Figura 32. Tercer modo de vibración. Daño 0.5L medio

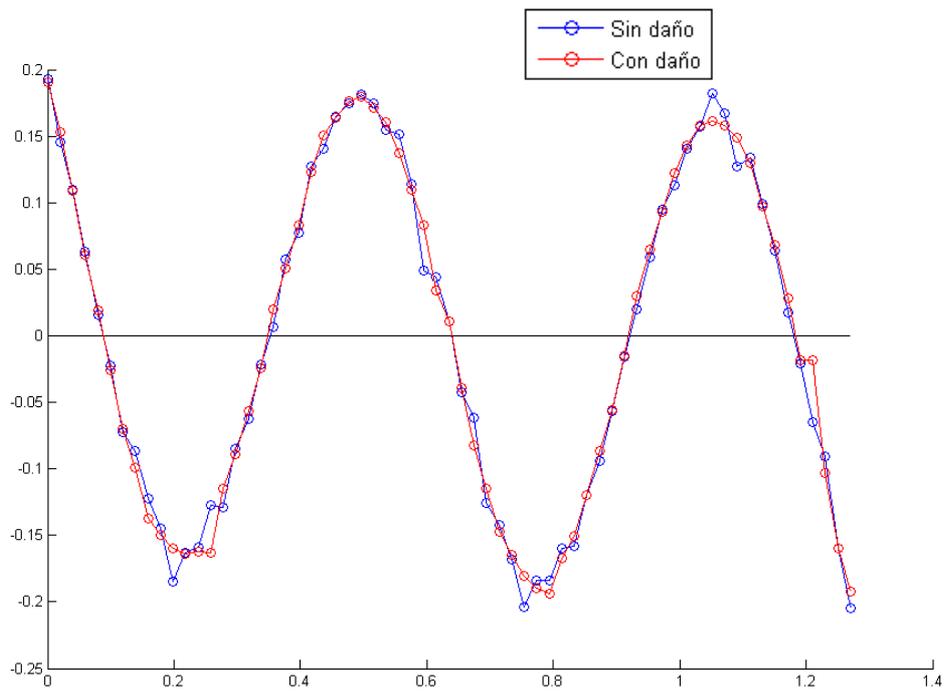


Figura 33. Cuarto modo de vibración. Daño 0.5L medio

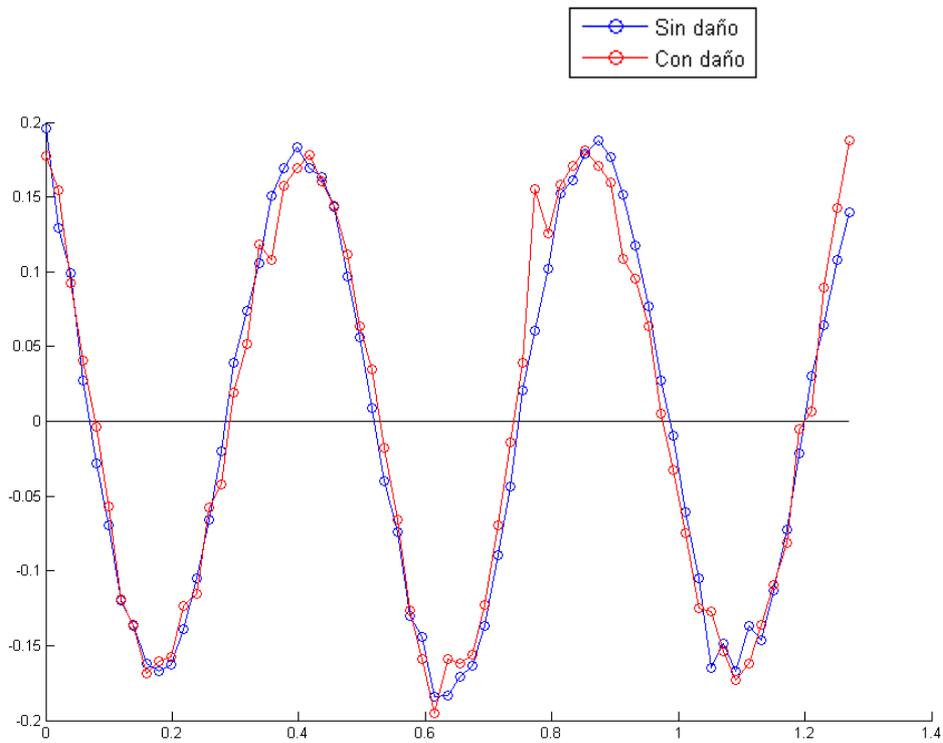


Figura 34. Quinto modo de vibración. Daño 0.5L medio

Al igual que sucedía en el caso de severidad máxima, se puede apreciar la diferencia entre modos, que no poseen un nodo en la sección intermedia, en dicha zona. De esta forma, nos informa que existe un daño y éste se encuentra muy posiblemente en la mitad de la viga.

- Severidad leve

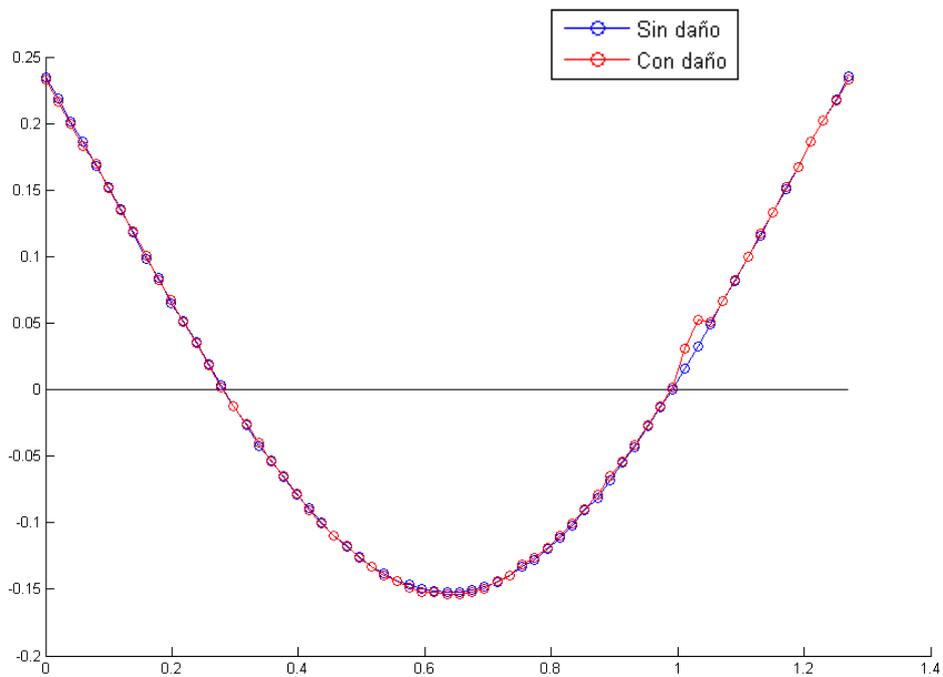


Figura 35. Primer modo de vibración. Daño 0.5L leve

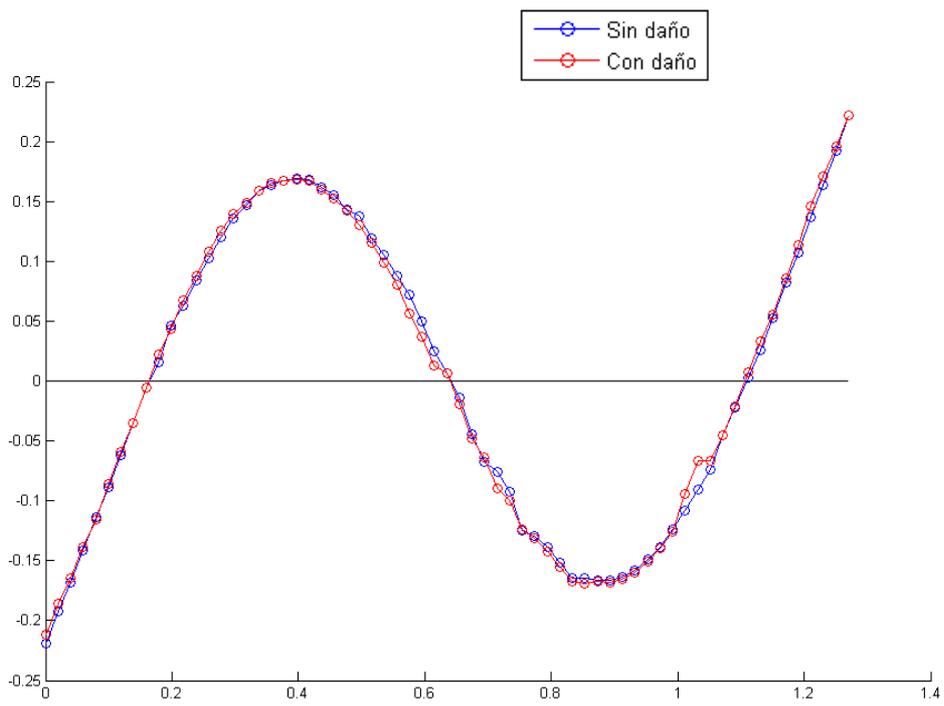


Figura 36. Segundo modo de vibración. Daño 0.5L leve

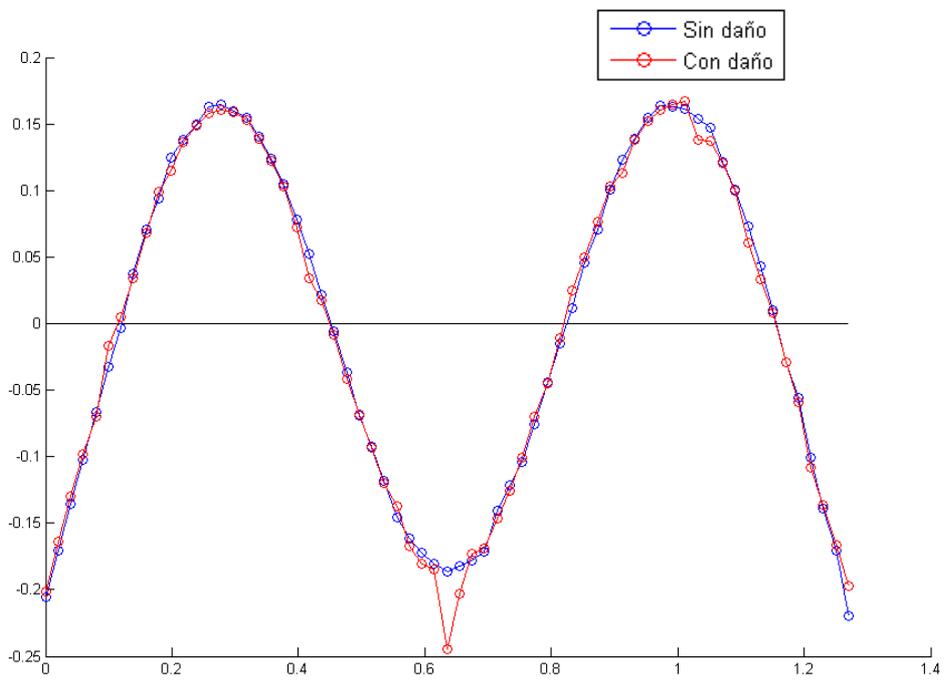


Figura 37. Tercer modo de vibración. Daño 0.5L leve

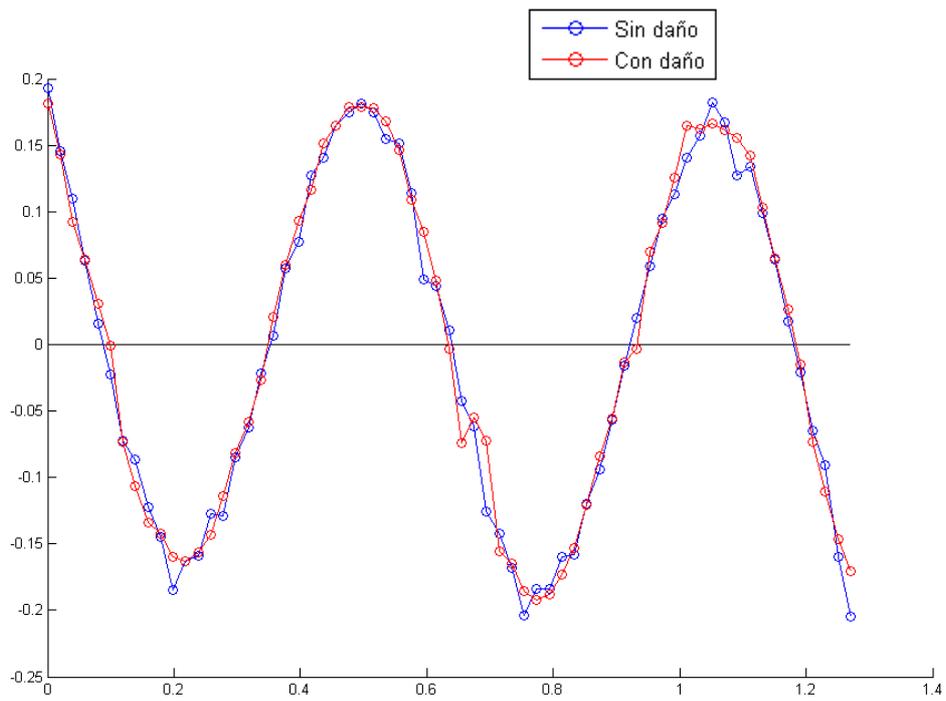


Figura 38. Cuarto modo de vibración. Daño 0.5L leve

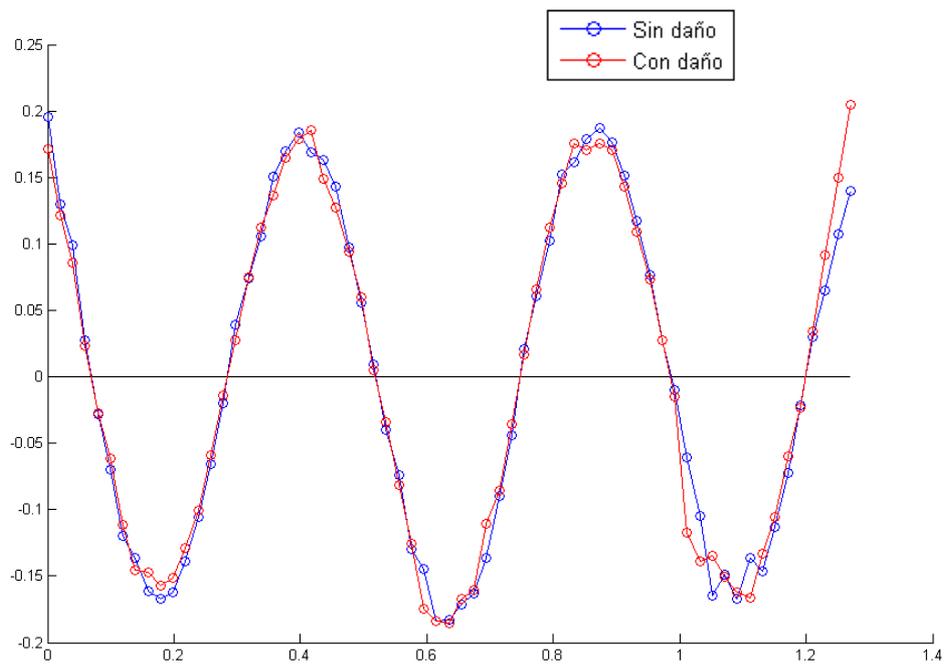


Figura 39. Quinto modo de vibración. Daño 0.5L leve

### 4.1.2.2. Daño 0.25L

- Severidad máxima

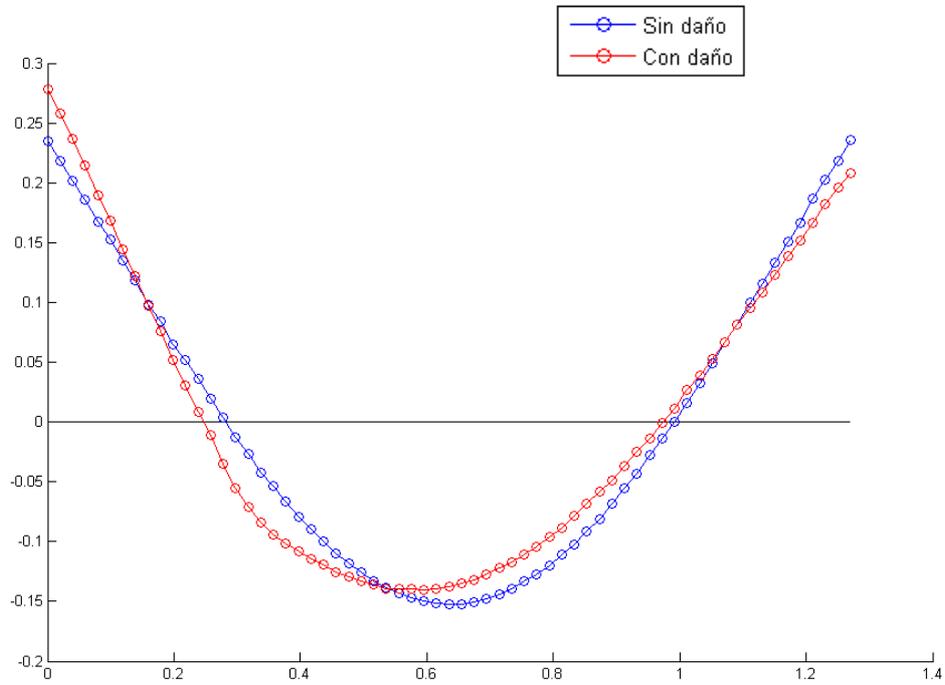


Figura 40. Primer modo de vibración. Daño 0.25L máx.

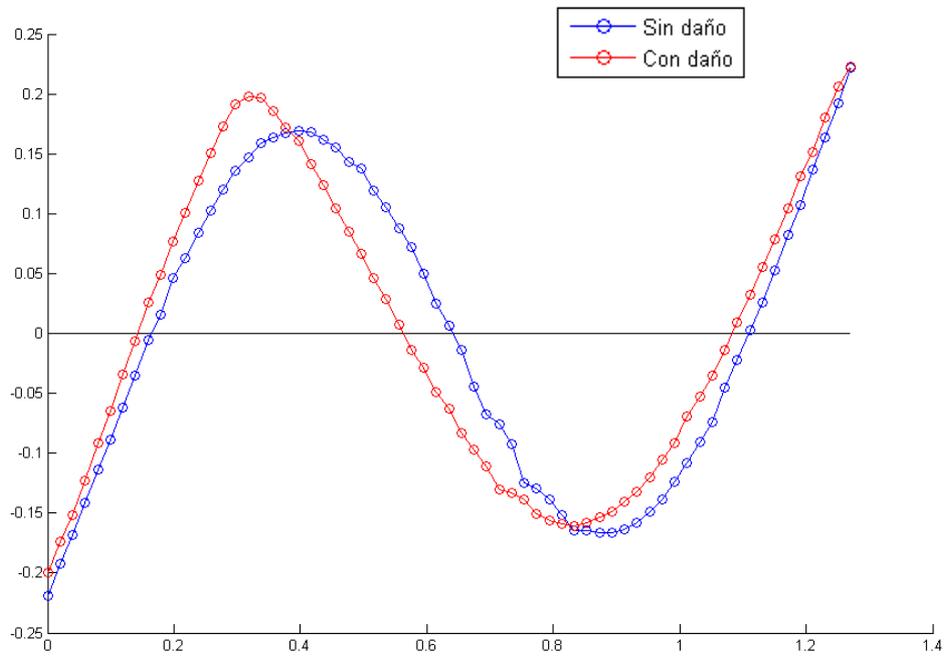


Figura 41. Segundo modo de vibración. Daño 0.25L máx.

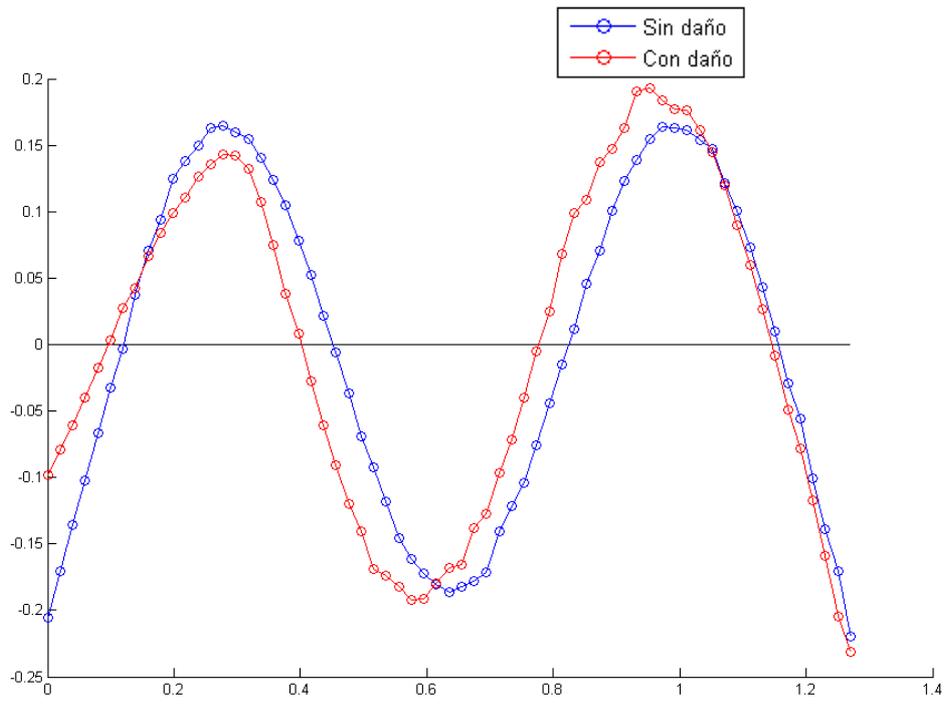


Figura 42. Tercer modo de vibración. Daño  $0.25L$  máx.

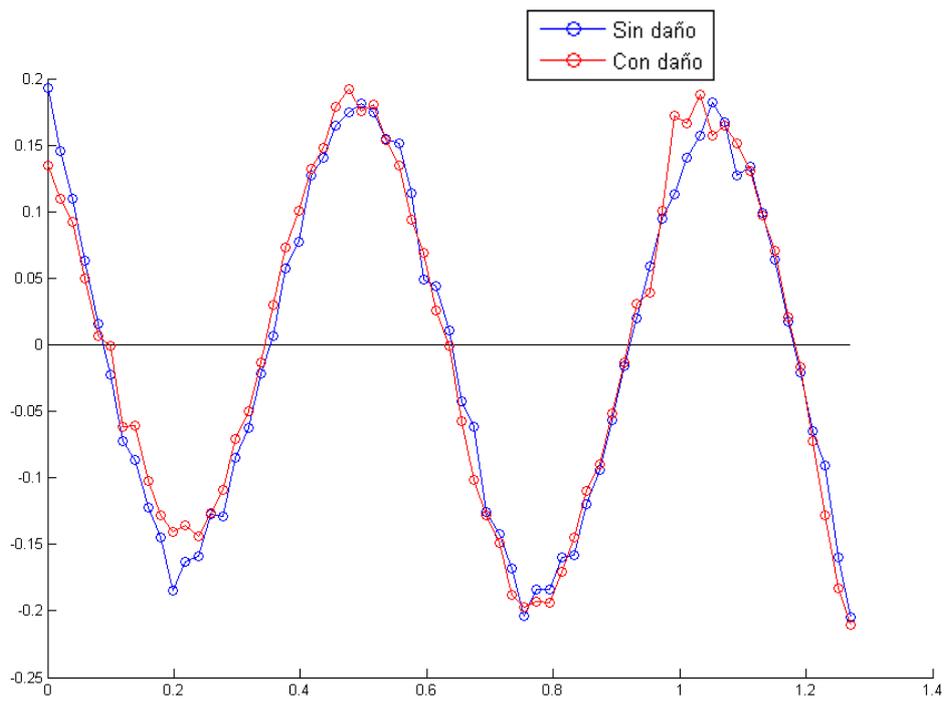


Figura 43. Cuarto modo de vibración. Daño  $0.25L$  máx.

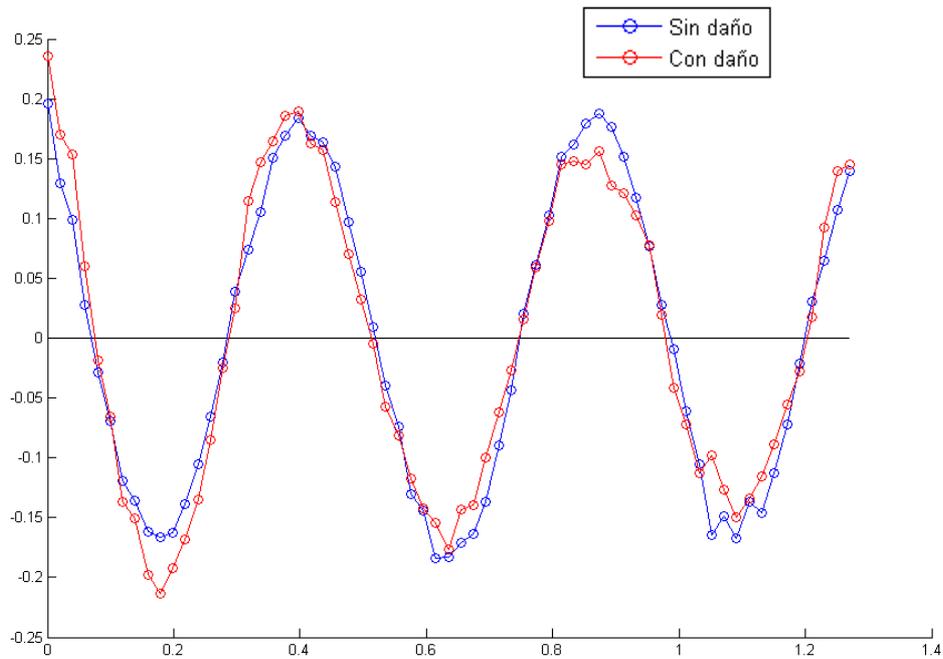


Figura 44. Quinto modo de vibración. Daño  $0.25L$  máx.

Las variaciones entre modos nos indican que existe daño en la viga. Se aprecia que en la coordenada 0.32 (a un cuarto de la longitud total de la viga) existen variaciones, excepto en el cuarto modo donde se encuentra un nodo en esta posición.

- Severidad media

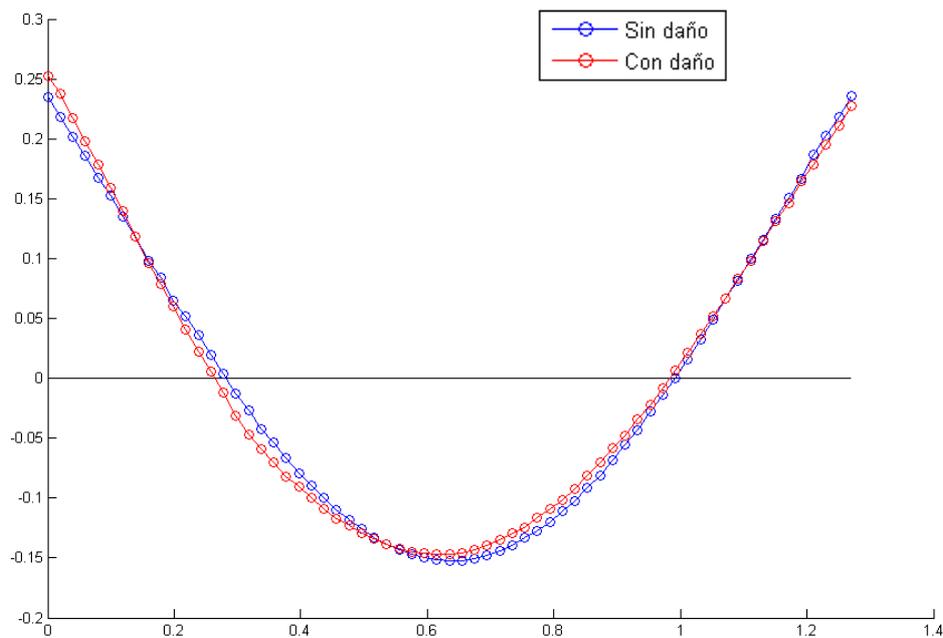


Figura 45. Primer modo de vibración. Daño  $0.25L$  medio

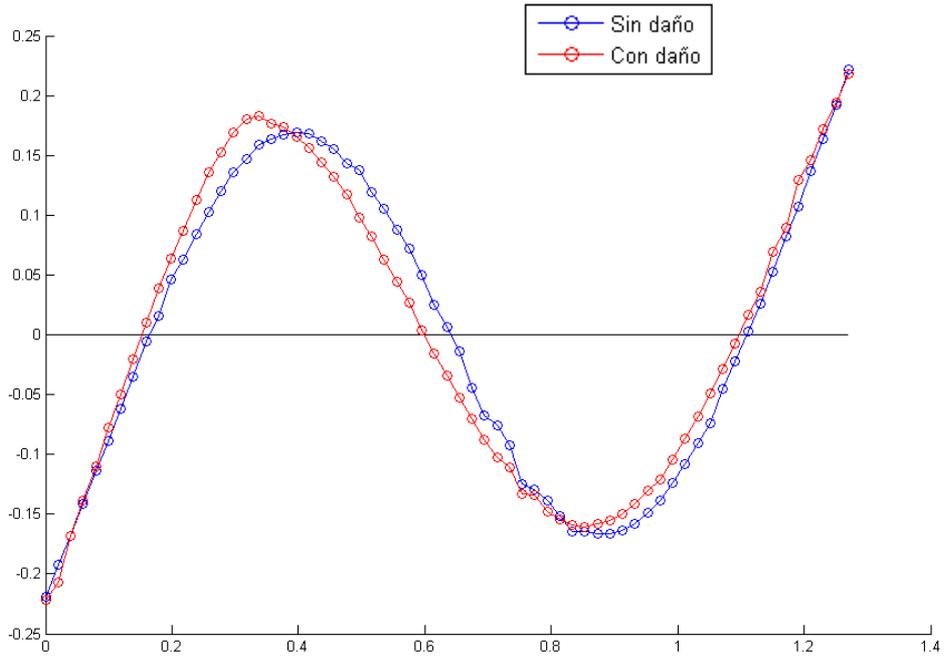


Figura 46. Segundo modo de vibración. Daño 0.25L medio

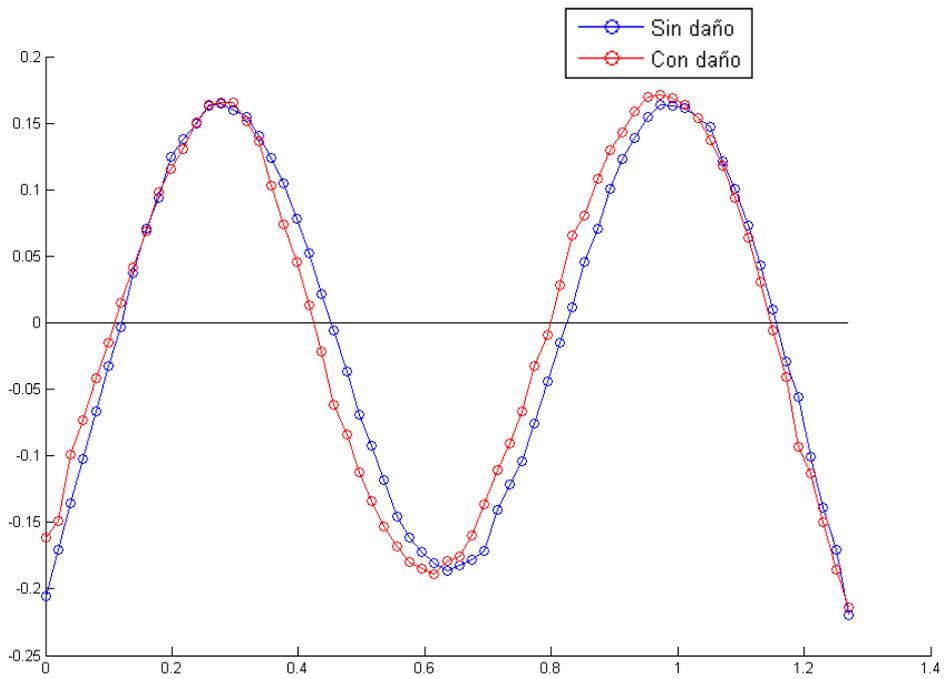


Figura 47. Tercer modo de vibración. Daño 0.25L medio

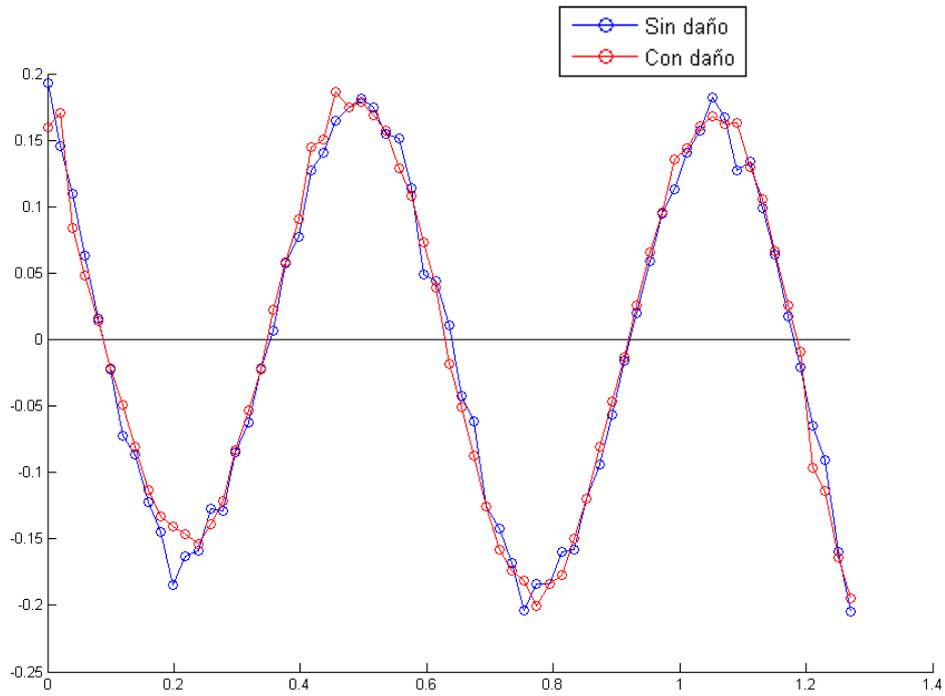


Figura 48. Cuarto modo de vibración. Daño 0.25L medio

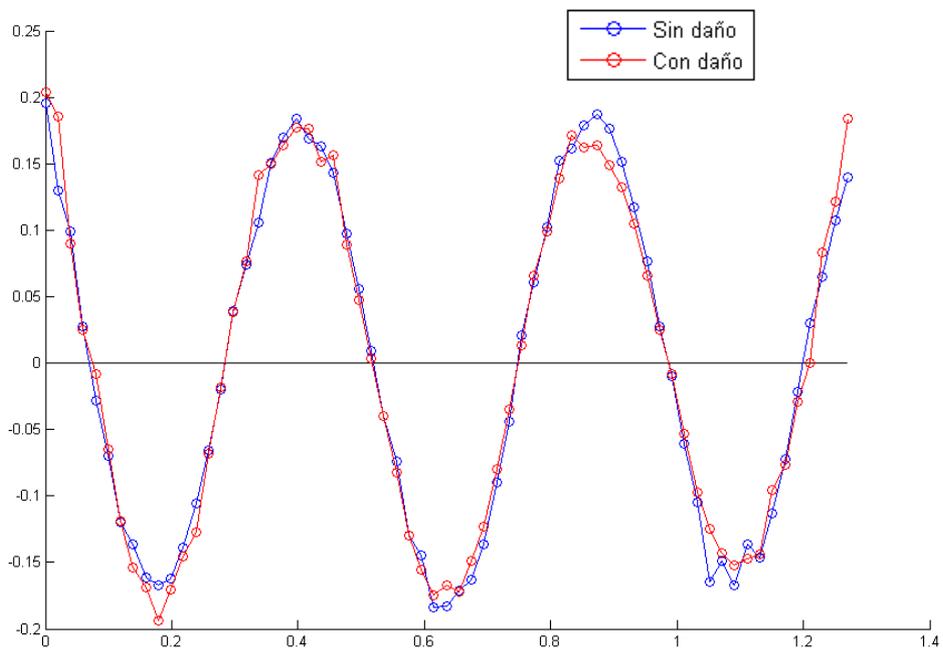


Figura 49. Quinto modo de vibración. Daño 0.25L medio

Las variaciones entre modos nos indican que existe daño en la viga. Si nos fijamos en el primer y segundo modo, observamos que los modos difieren mayoritariamente próximos a 0.32, que es donde la grieta se encuentra.

▪ Severidad leve

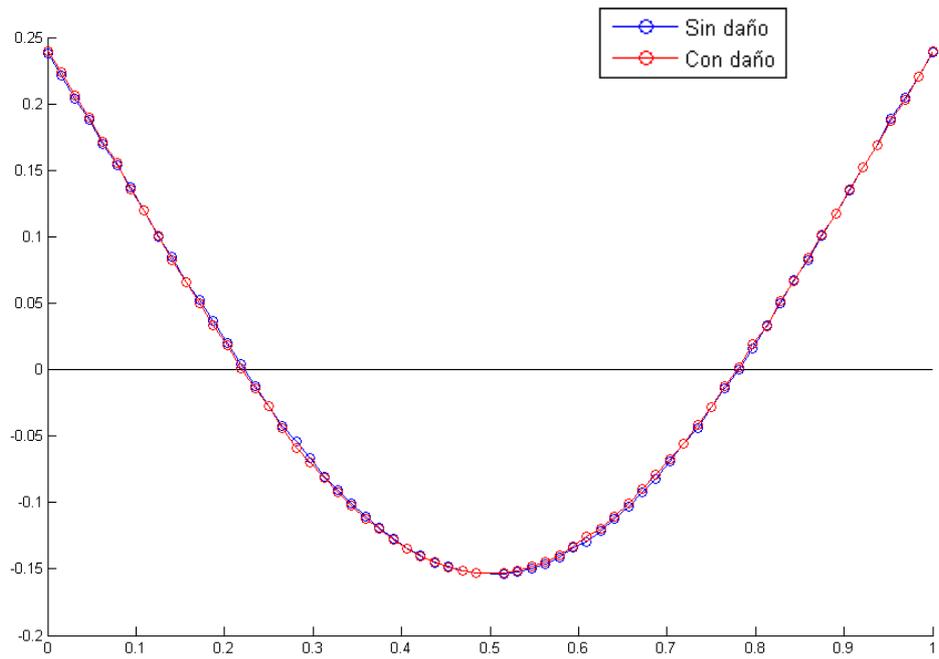


Figura 50. Primer modo de vibración. Daño 0.25L leve

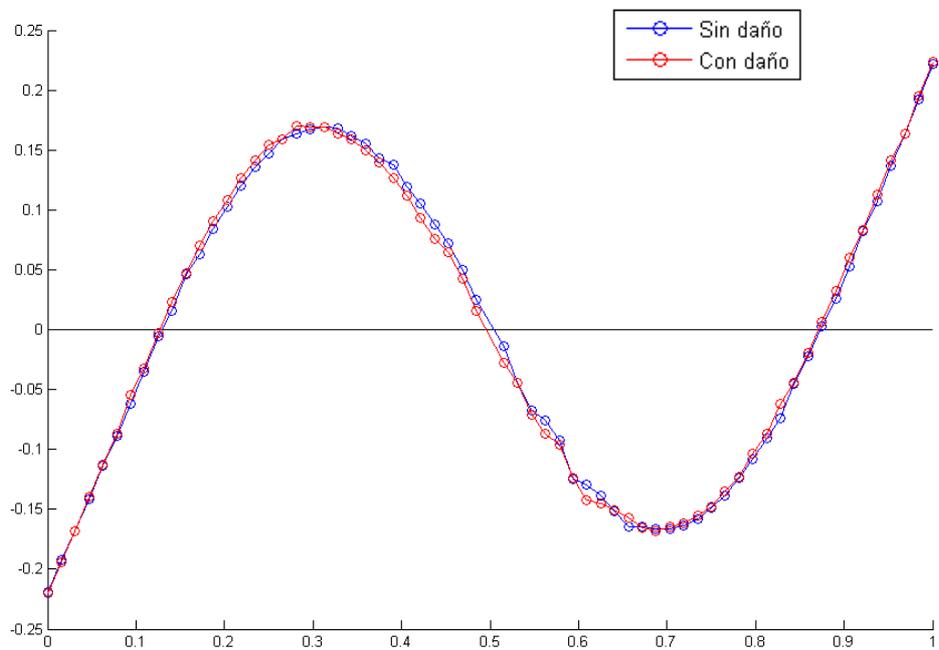


Figura 51. Segundo modo de vibración. Daño 0.25L leve

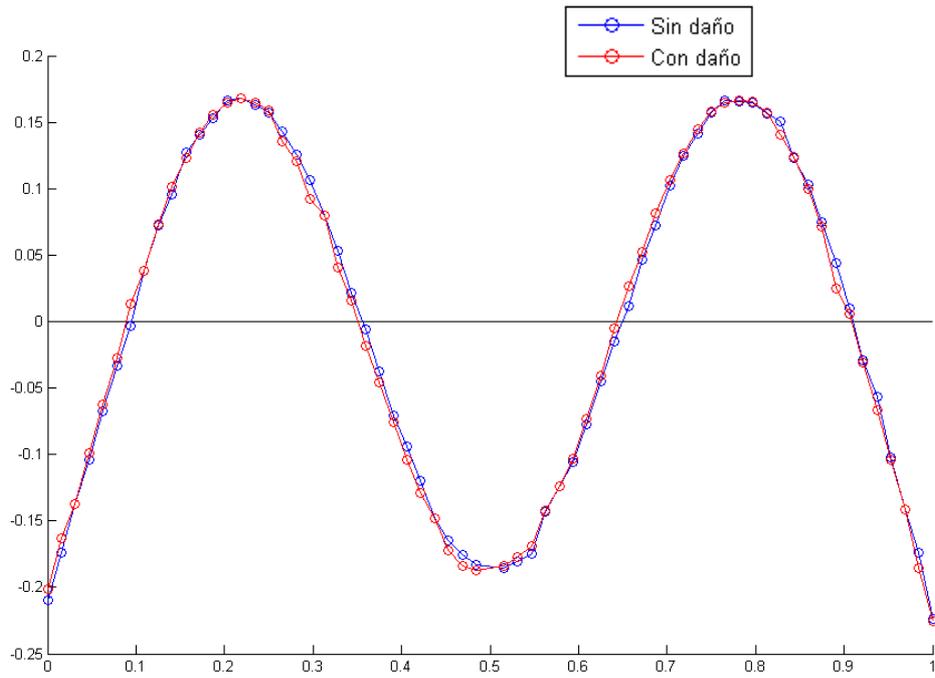


Figura 52. Tercer modo de vibración. Daño 0.25L leve

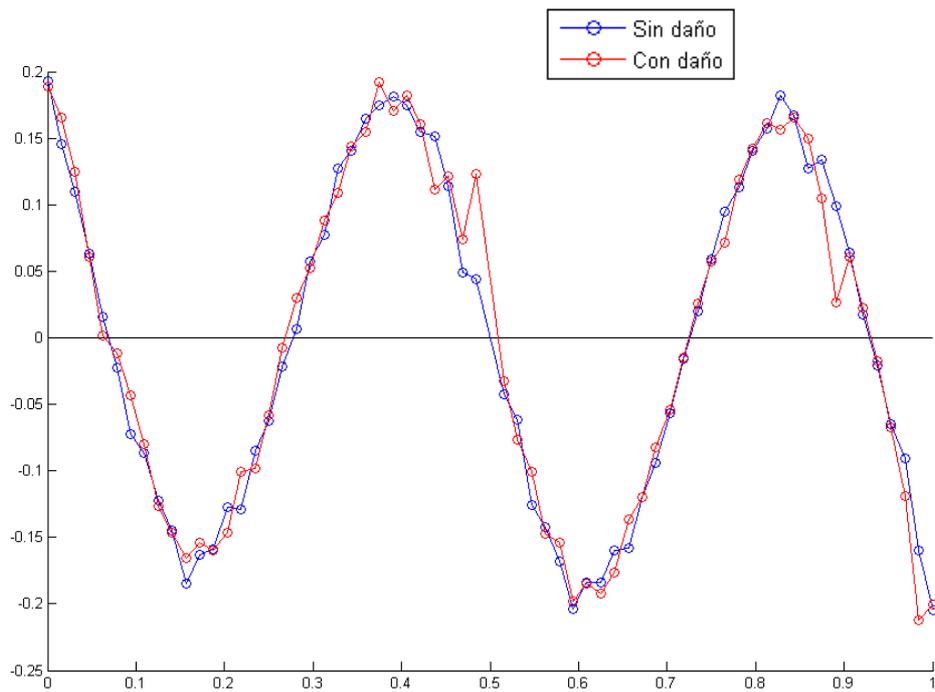


Figura 53. Cuarto modo de vibración. Daño 0.25L leve

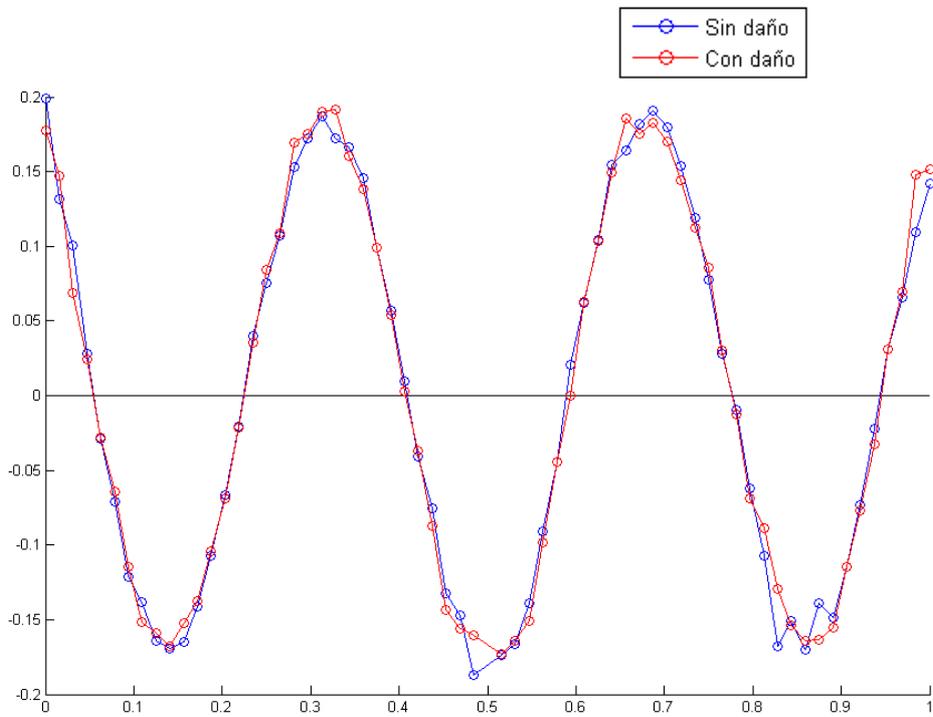


Figura 54. Quinto modo de vibración. Daño 0.25L leve

Los modos son muy parecidos, por lo que resulta imposible averiguar por comparación de éstos si existe daño en la viga.

### 4.1.2.3. Daño borde

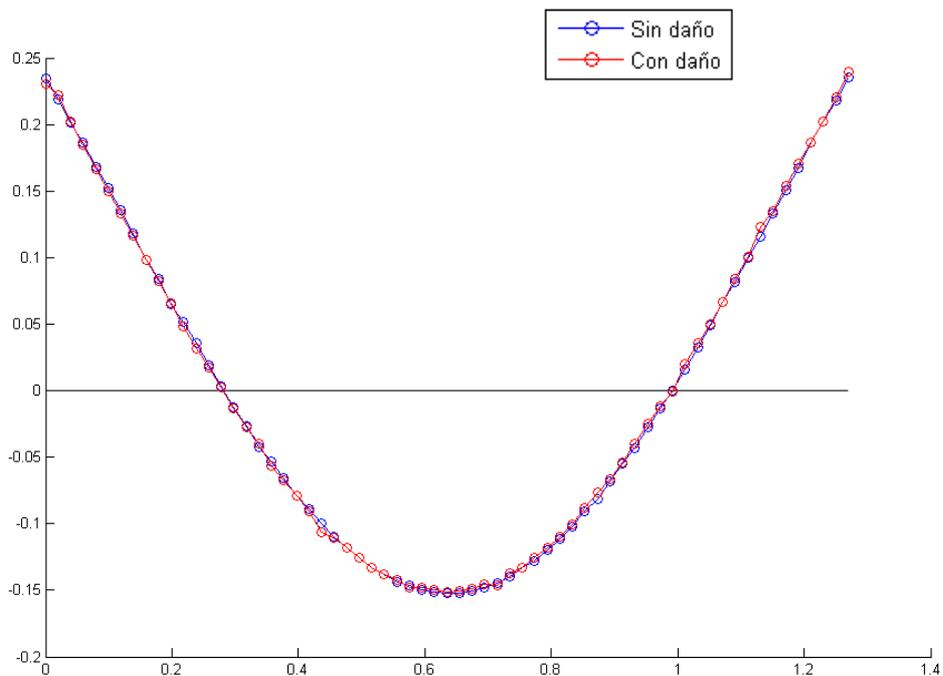


Figura 55. Primer modo de vibración. Daño borde

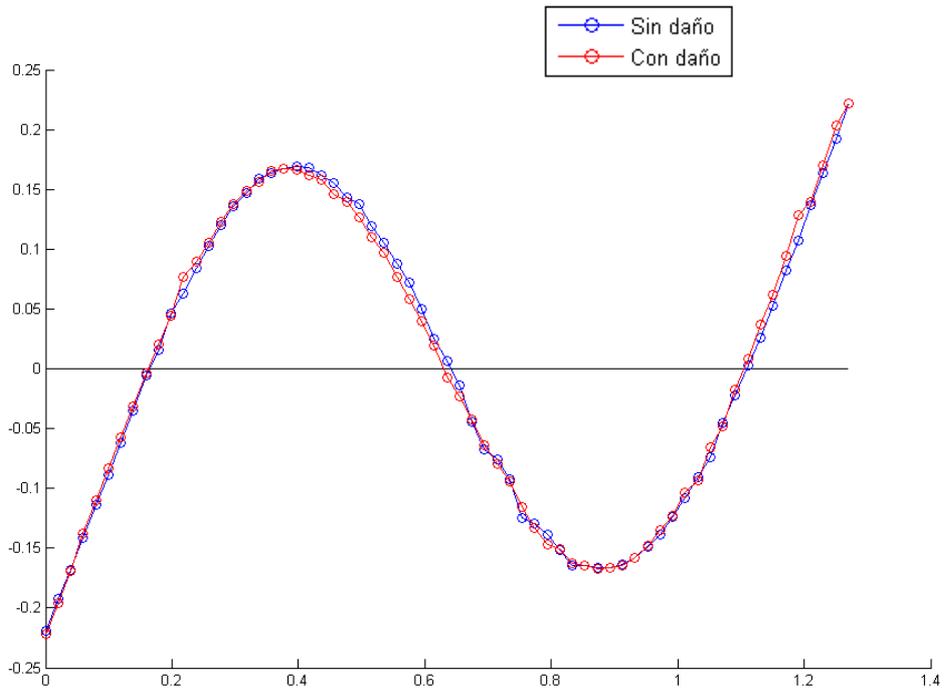


Figura 56. Segundo modo de vibración. Daño borde

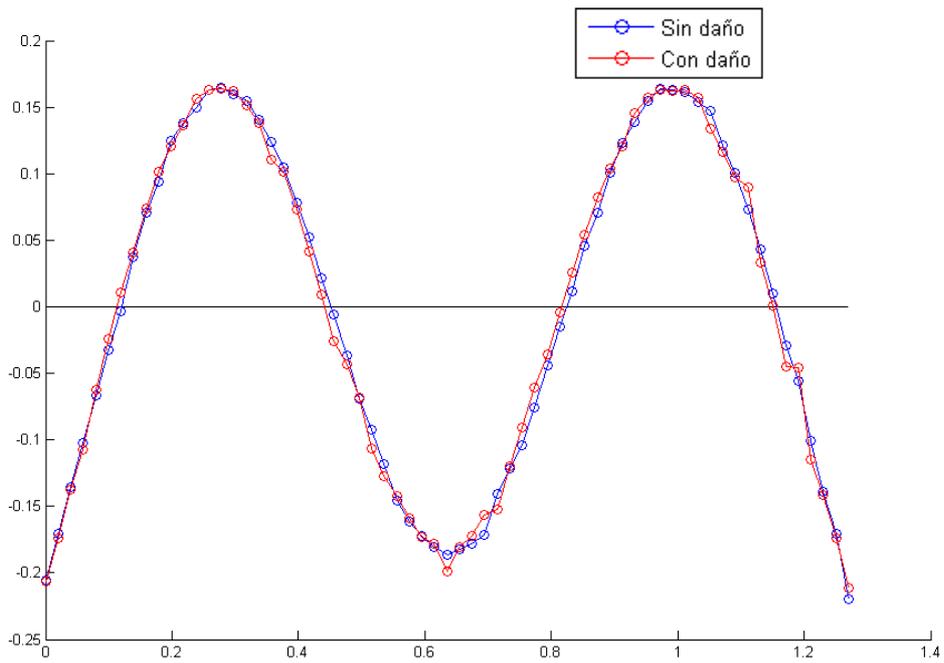


Figura 57. Tercer modo de vibración. Daño borde

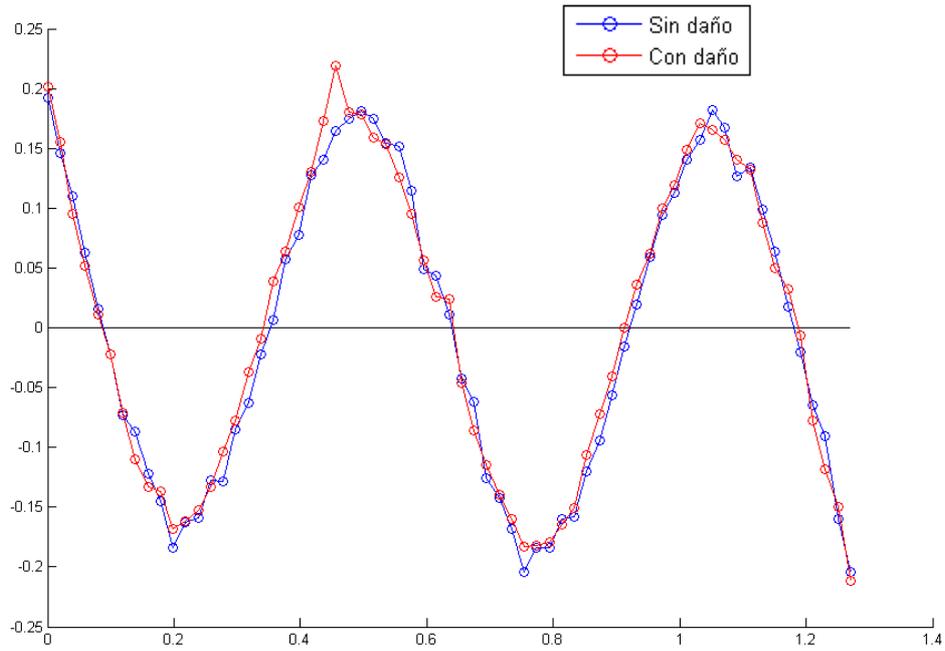


Figura 58. Cuarto modo de vibración. Daño borde

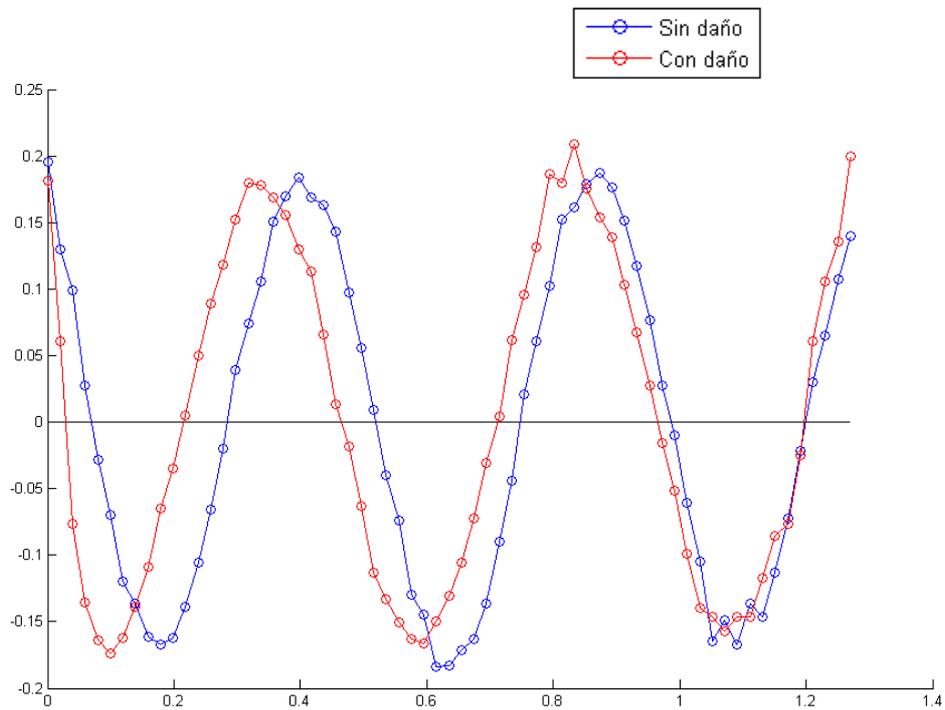


Figura 59. Quinto modo de vibración. Daño borde

Los modos presentan pocas diferencias, así que no se podría decir con certeza si existe un fallo o no.

### 4.1.3 Variación de curvaturas

DibEMA nos devuelve aplicando este método las máximas variaciones de curvatura que sufren los modos, así como su localización.

#### 4.1.3.1. Daño 0.5L

- Severidad máxima

Nº de modo de vibración	Variación de curvatura	Posición (cm)
1	20.1	88.9
2	212.9	76.2
3	635.1	127
4	465.7	63.5
5	1225.0	114.3

Tabla 15. Variación de la curvatura. Daño 0.5L máx.

El cuarto modo se ajusta a la localización del daño.

- Severidad media

Nº de modo de vibración	Variación de curvatura	Posición (cm)
1	42.1	76.2
2	197.9	76.2
3	443.0	12.7
4	452.5	127
5	1095.6	76.2

Tabla 16. Variación de la curvatura. Daño 0.5L medio

- Severidad leve

Nº de modo de vibración	Variación de curvatura	Posición (cm)
1	148.91	102.45
2	168.31	102.87
3	672.92	63.10
4	496.77	92.71
5	449.41	101.18

*Tabla 17. Variación de la curvatura. Daño 0.5L leve*

El tercer modo es el que presenta la mayor variación, y su posición es a 63.10 cm, muy próximo de donde se encuentra la imperfección.

#### 4.1.3.2. Daño 0.25L

- Severidad máxima

Nº de modo de vibración	Variación de curvatura	Posición (cm)
1	28.14	23.28
2	77.60	55.67
3	189.70	70.70
4	445.31	98.64
5	424.27	63.08

*Tabla 18. Variación de la curvatura. Daño 0.25L máx.*

- Severidad media

Nº de modo de vibración	Variación de curvatura	Posición (cm)
1	34.35	0
2	187.56	0
3	403.30	0
4	403.30	0
5	920.71	45.30

*Tabla 19. Variación de la curvatura. Daño 0.25L medio*

- Severidad leve

Nº de modo de vibración	Variación de curvatura	Posición (cm)
1	45.98	102.87
2	77.15	11.43
3	211.10	102.61
4	781.62	102.61
5	702.72	126.15

*Tabla 20. Variación de la curvatura. Daño 0.25L leve*

Ninguno de los resultados se acerca a donde se encuentra la grieta.

#### **4.1.3.3. Daño borde**

Nº de modo de vibración	Variación de curvatura	Posición (cm)
1	104.06	0
2	138.60	126.15
3	419.93	126.15
4	490.67	45.30
5	378.87	82.97

*Tabla 21. Variación de la curvatura. Daño borde*

La variación de la curvatura del primer modo delata el fallo en la estructura. Las demás dan soluciones erróneas

#### **4.1.4 Método de la matriz de flexibilidad y rigidez**

La diferencia máxima entre las matrices de flexibilidad y rigidez nos condiciona la existencia y localización del fallo.

Para ningunas de las configuraciones de daño estudiadas, el método de la variación de la matriz de rigidez da buenos resultados.

#### 4.1.4.1. Análisis del método de la matriz de flexibilidad

Antes de representar los resultados, comentamos algunos aspectos de este método que, para las condiciones de contorno presentes, pueden inducirnos a error.

Representamos la variación que experimenta las matrices de flexibilidad para los daños 0.5L máximo, 0.25L máximo y daño en el borde para el modelo numérico de una viga IPE 100 con condiciones libre-libre en los extremos.

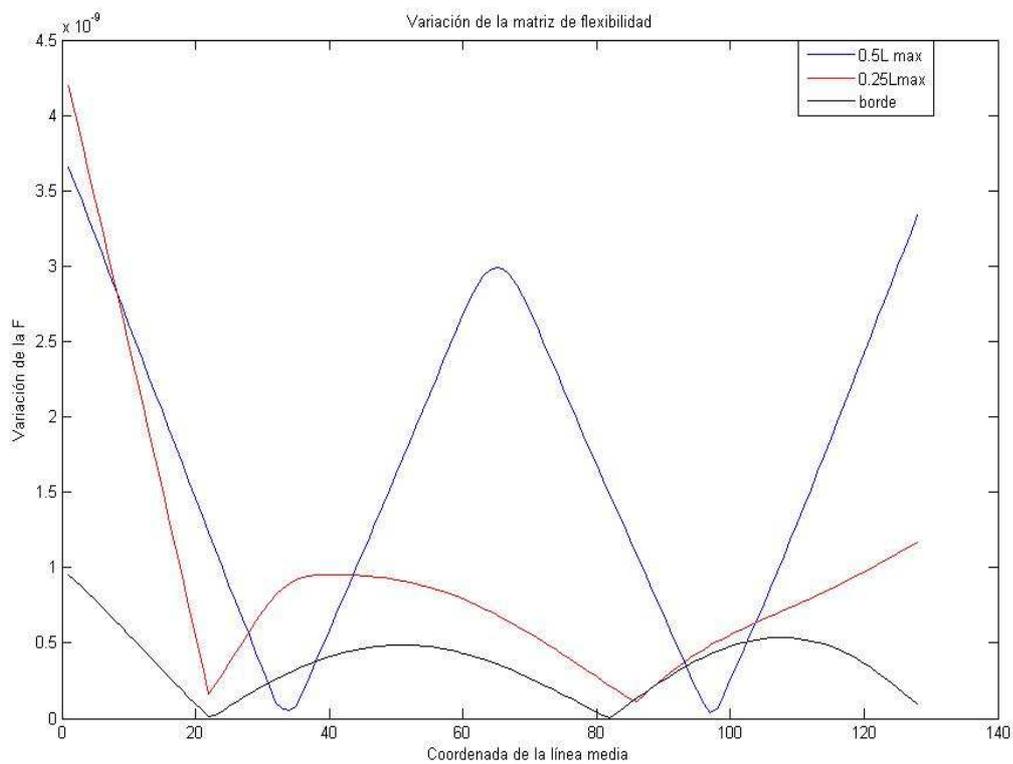


Figura 60. Modos de vibración para daño en 0.5L máximo, 0.25L máximo y borde

Se puede observar como en los bordes la variación son mayores que en cualquier otra sección de la viga. Esto es debido a las condiciones de contorno, cuyos desplazamientos verticales son los más elevados durante los ensayos [7].

Así, el máximo se encuentra en el borde más cercano al fallo, como puede comprobarse para el daño en 0.25L y borde. Sin embargo, hay que distinguir entre variaciones debido a las condiciones de contorno y cambios debido a un daño. De esta forma, se tendrían que ignorar los máximos de los bordes y analizar si existen picos en las demás secciones de la viga.

Vemos ahora la variación para severidad leve:

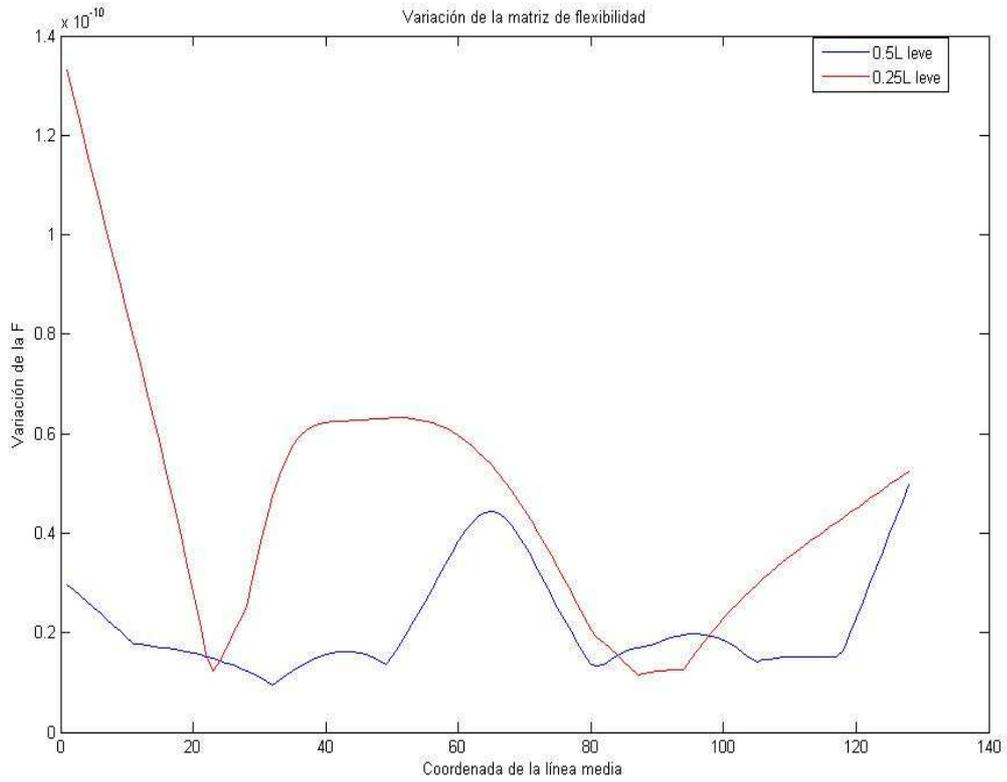


Figura 61. Modos de vibración para daño en 0.5L leve, 0.25L leve

Como observamos, en este caso, las variaciones son menores, de hecho, son de un orden de magnitud menor. Esto es debido, a que al ser las vigas “más similares”, por ser el daño menor, se comportan de una forma más próxima, y así, sus parámetros modales serán menos diferentes.

En los apartados siguientes representaremos los resultados experimentales.

#### 4.1.4.2. Daño 0.5L

- Severidad máxima

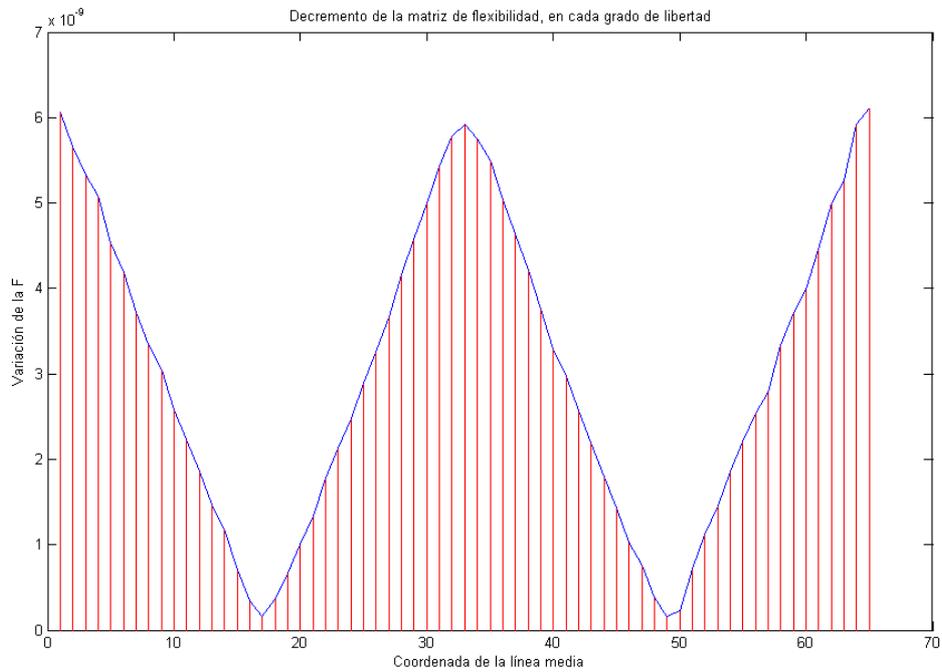


Figura 62. Variación de la matriz de flexibilidad. Daño 0.5L máx.

Se aprecia claramente como en el centro converge a una mayor variación entre ambas matrices. Los máximos que se producen en los extremos son debido a las condiciones de contorno en que se encuentra las vigas.

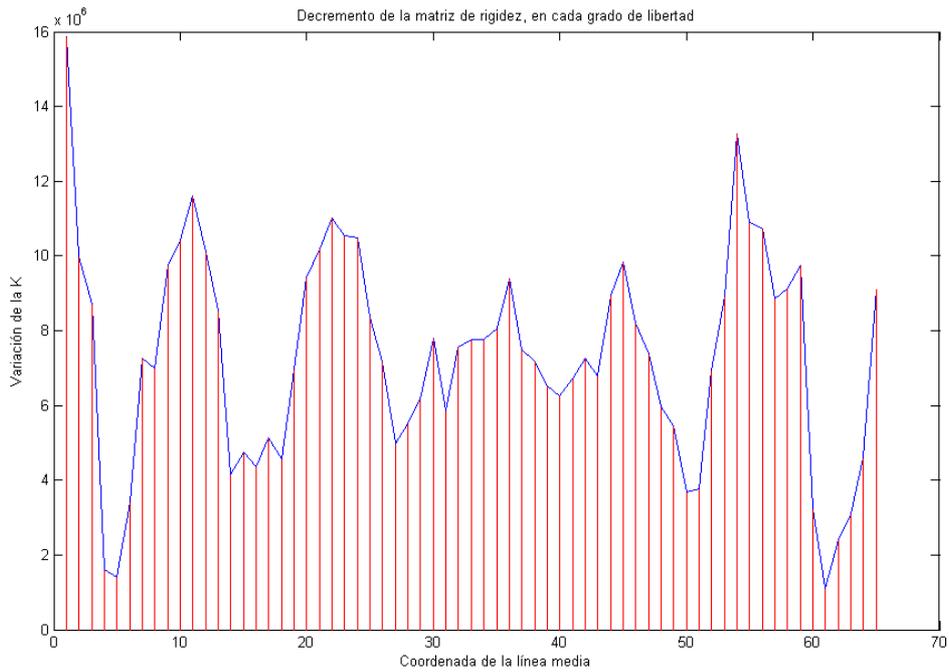


Figura 63. Variación de la matriz de rigidez. Daño 0.5L máx.

Como se ha comentado, este método no ofrece buenos resultados en ninguna de las configuraciones.

- Severidad media

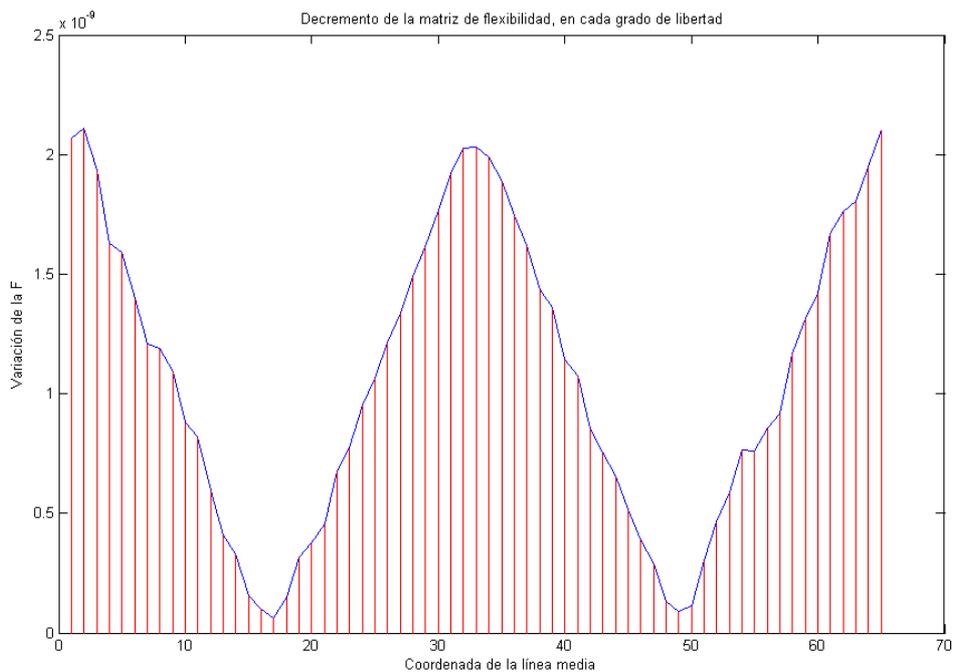


Figura 64. Variación de la matriz de flexibilidad. Daño 0.5L medio

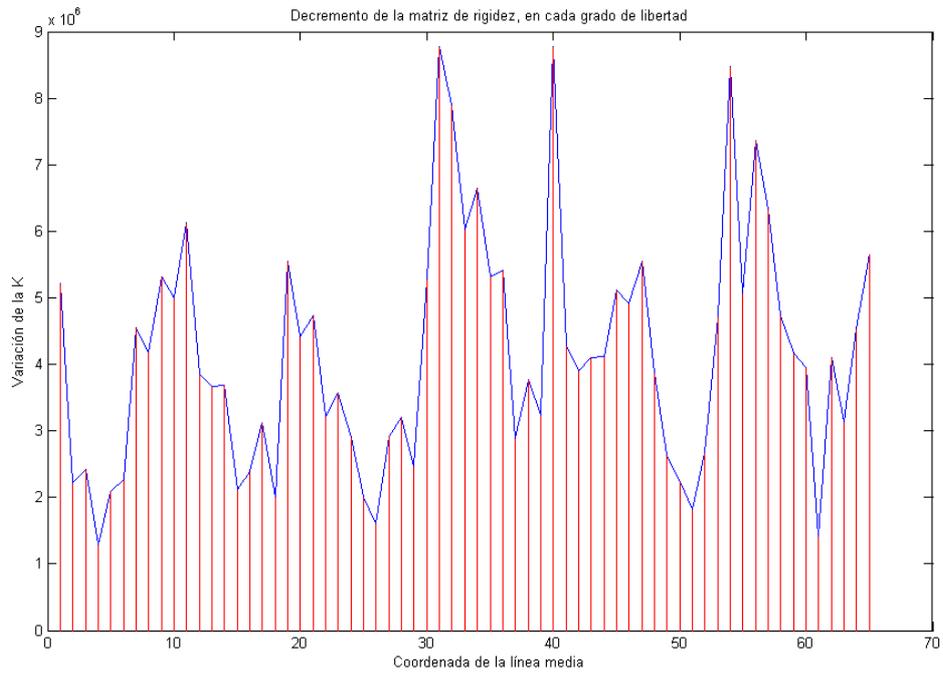


Figura 65. Variación de la matriz de rigidez. Daño 0.5L medio

- Severidad leve

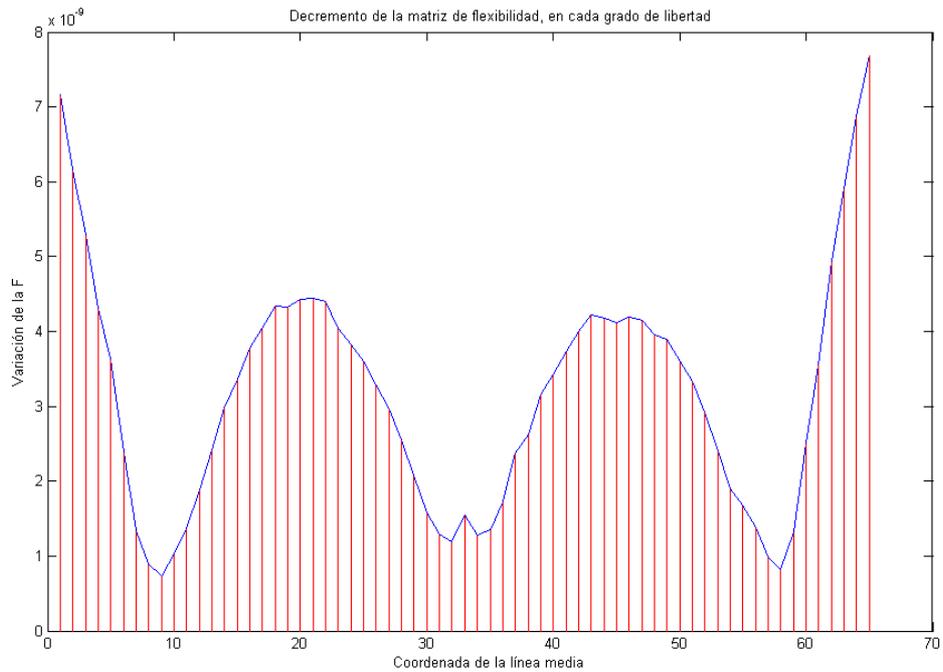


Figura 66. Variación de la matriz de flexibilidad. Daño 0.5L leve

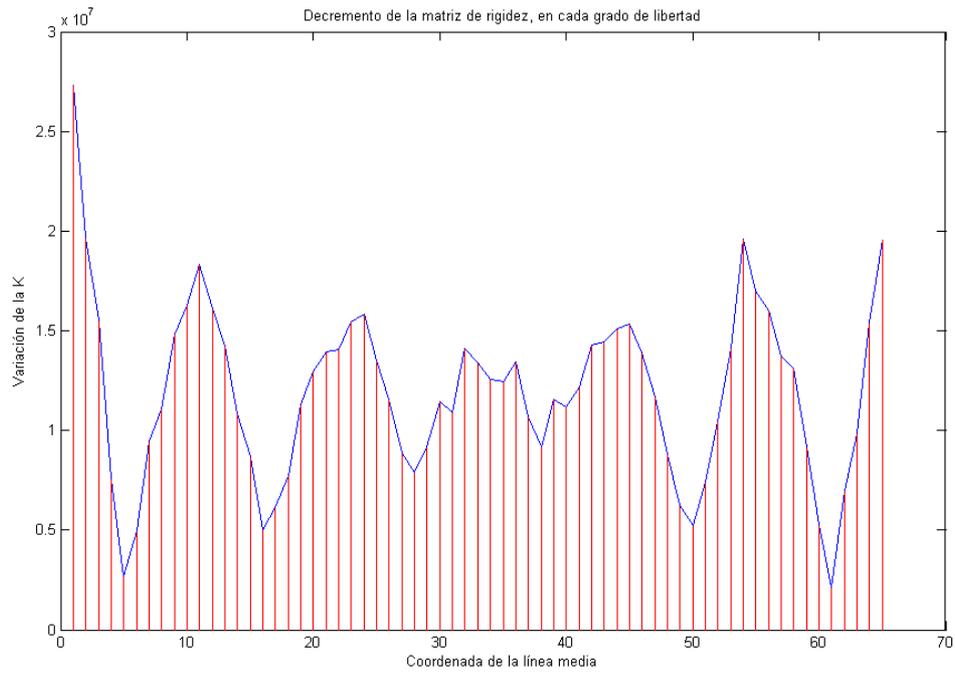


Figura 67. Variación de la matriz de rigidez. Daño 0.5L leve

El método no funciona para esta severidad.

### 4.1.4.3. Daño 0.25L

- Severidad máxima

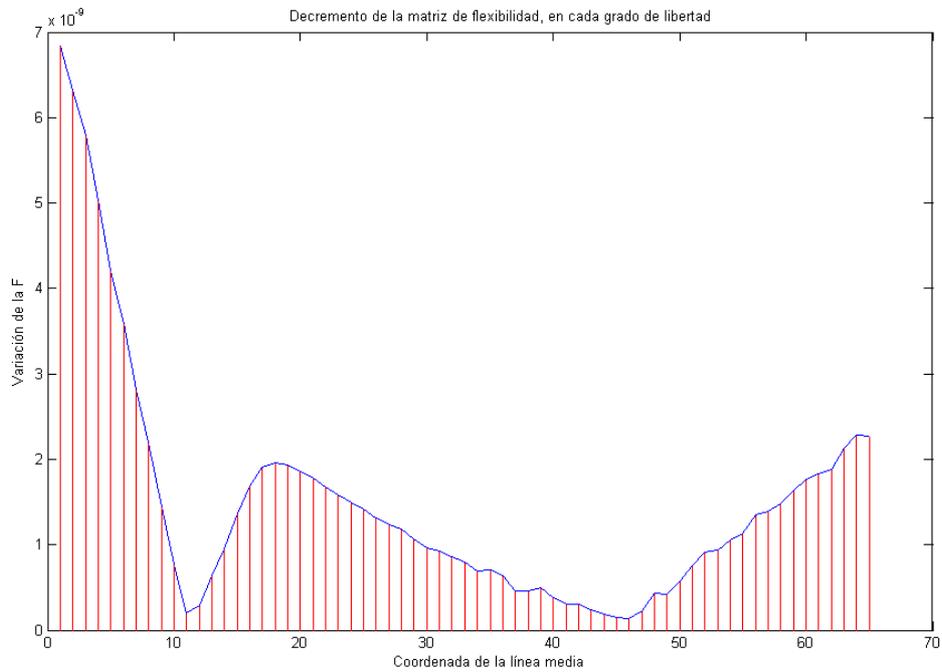


Figura 68. Variación de la matriz de flexibilidad. Daño 0.25L máx.

El daño se encuentra entre la señal 16 y 17, y es próximo a esta zona donde encontramos la máxima variación (ignorando los máximos debido a las condiciones de contorno).

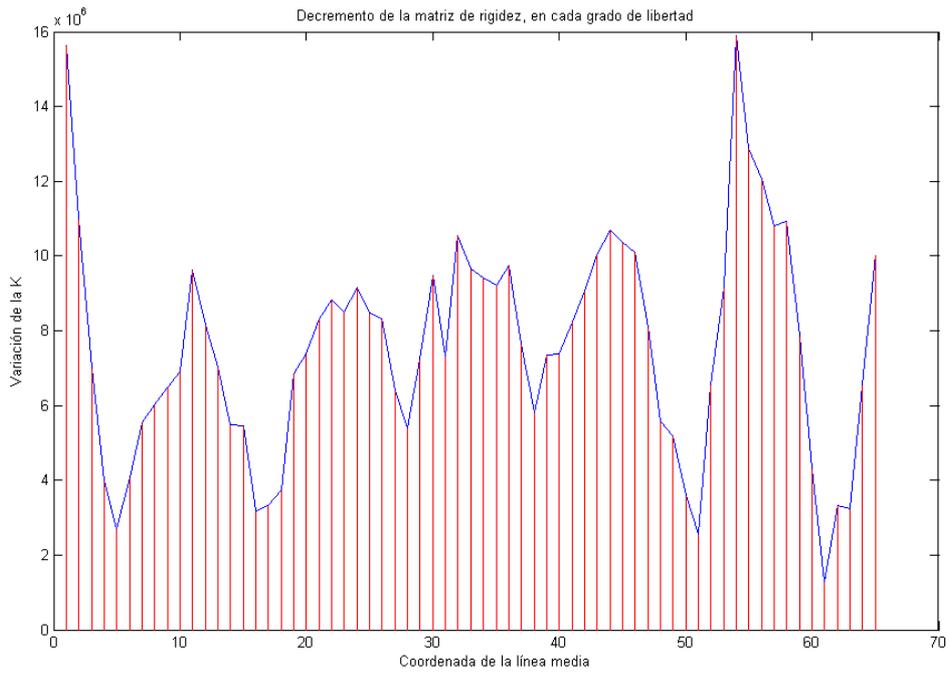


Figura 69. Variación de la matriz de rigidez. Daño 0.25L máx.

▪ Severidad media

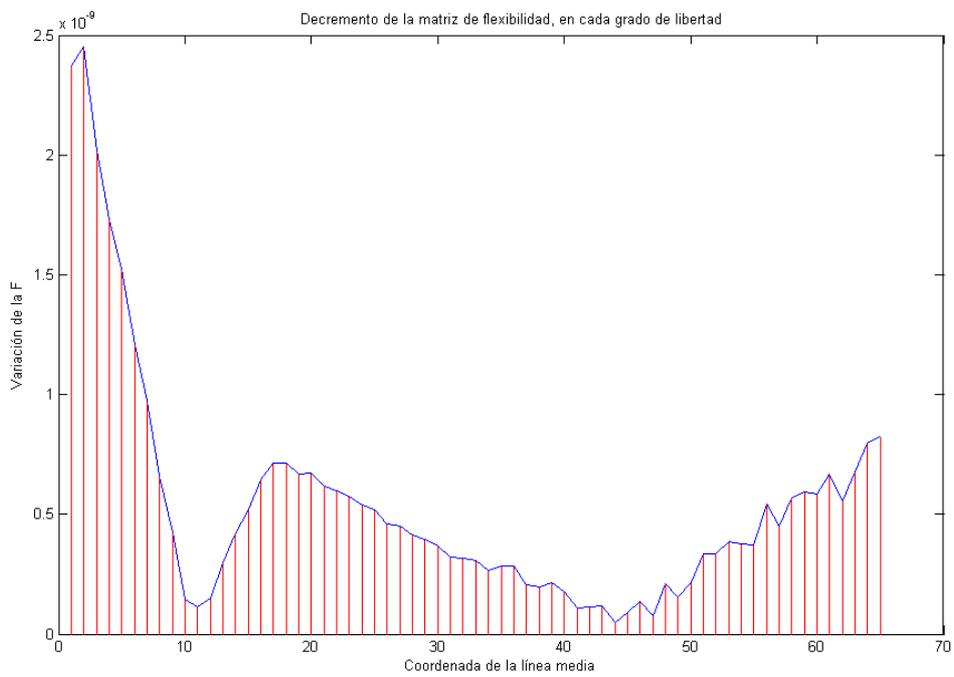


Figura 70. Variación de la matriz de flexibilidad. Daño 0.25L medio

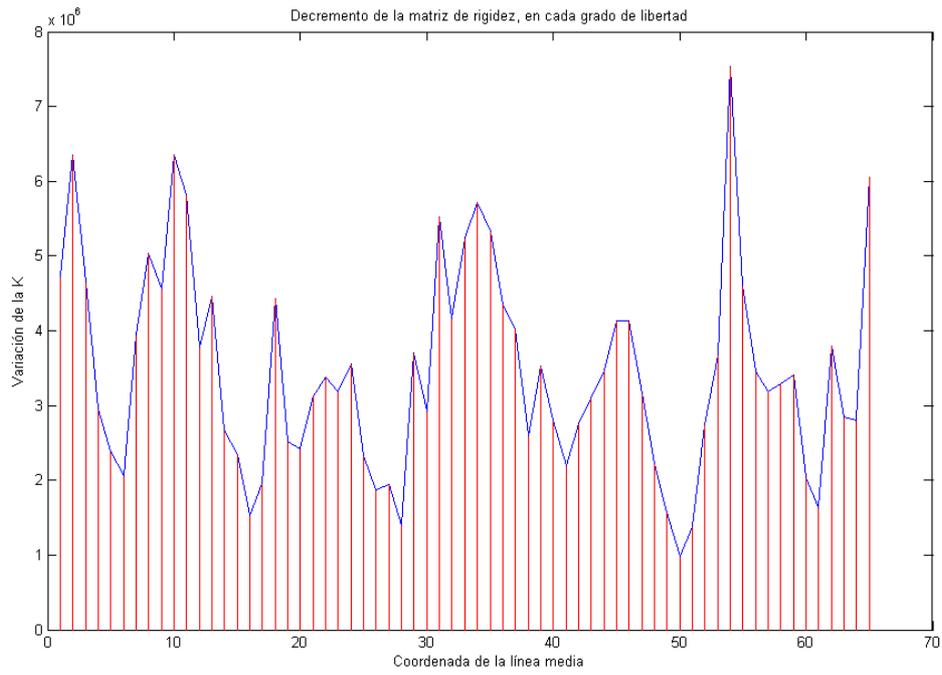


Figura 71. Variación de la matriz de rigidez. Daño 0.25L medio

- Severidad leve

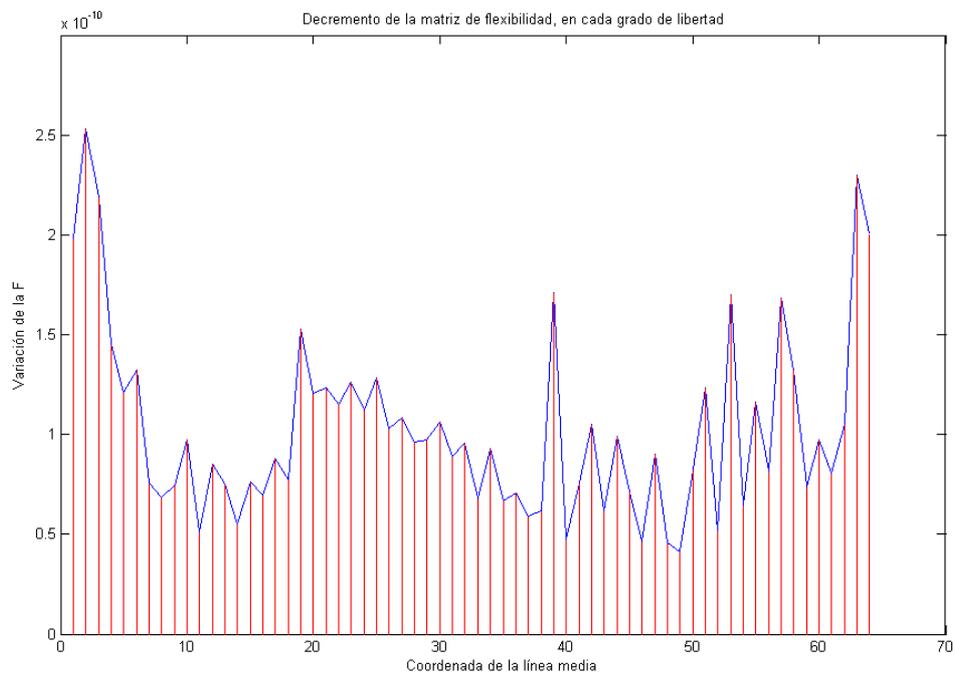


Figura 72. Variación de la matriz de flexibilidad. Daño 0.25L leve

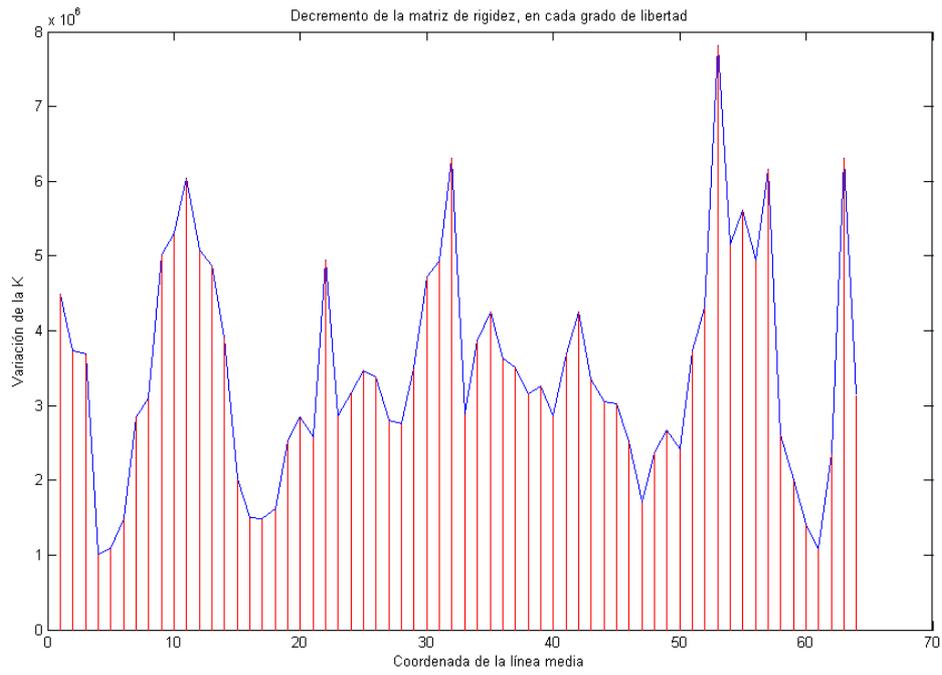


Figura 73. Variación de la matriz de rigidez. Daño 0.25L leve

De nuevo, para una severidad leve, el método no funciona.

#### 4.1.4.4. Daño borde

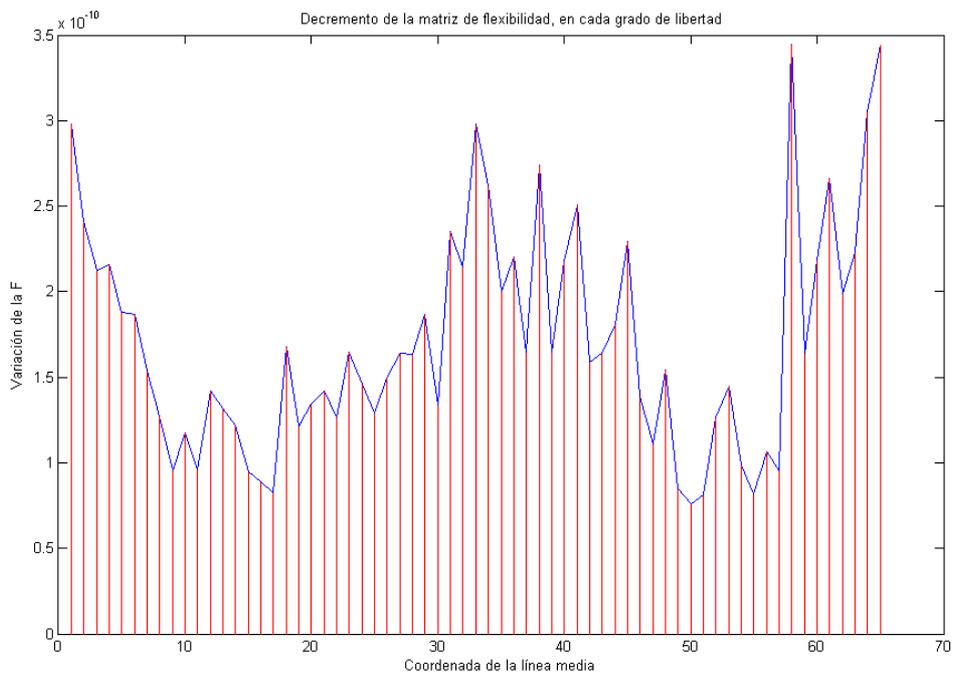


Figura 74. Variación de la matriz de flexibilidad. Daño borde

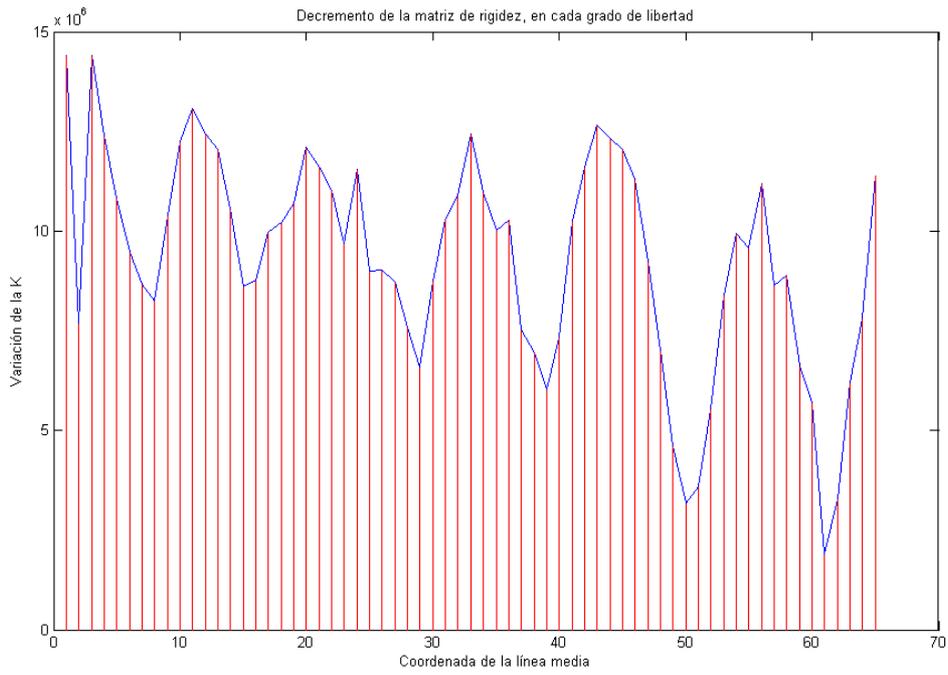


Figura 75. Variación de la matriz de rigidez. Daño borde

No se identifica el daño, el cual se encuentra en el borde izquierdo.

#### 4.1.5. Stubbs

El parámetro  $\beta_p$  nos indica la presencia de daño. En las localizaciones donde éste es máximo, se encuentra la grieta.

### 4.1.5.1. Daño 0.5L

- Severidad máxima

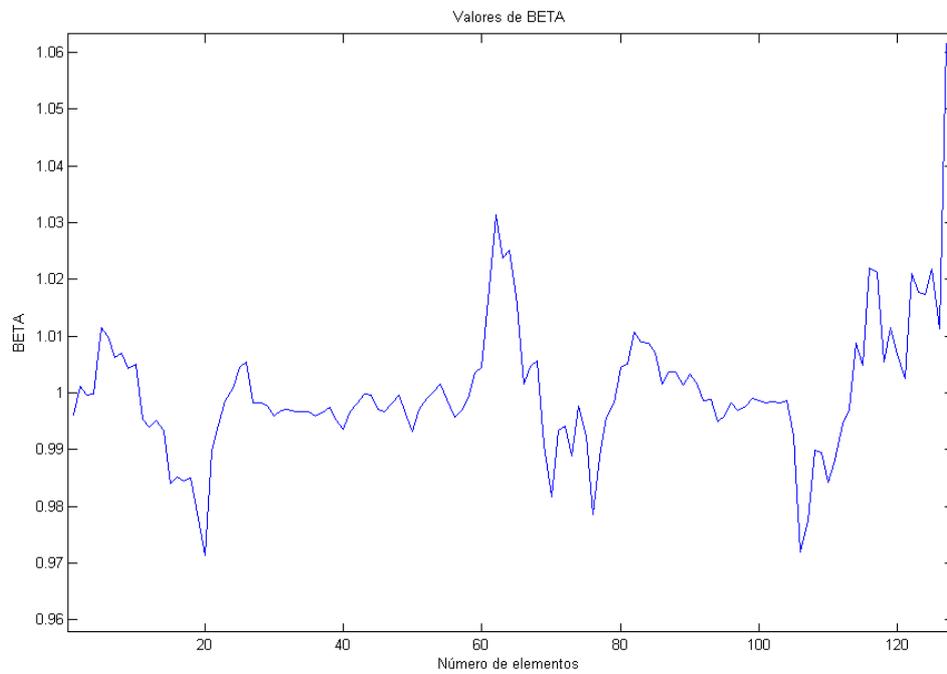
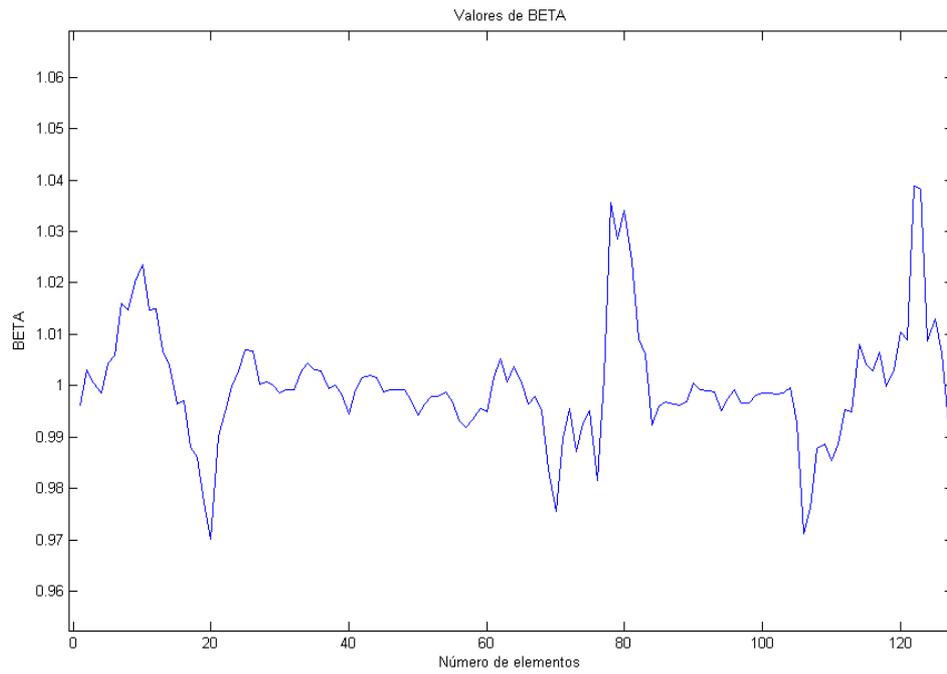


Figura 76. Parámetro  $\beta_p$ . Daño 0.5L máx.

A pesar de que el máximo se encuentre en uno de los extremos, se identifica claramente otro máximo en la sección central de la viga.

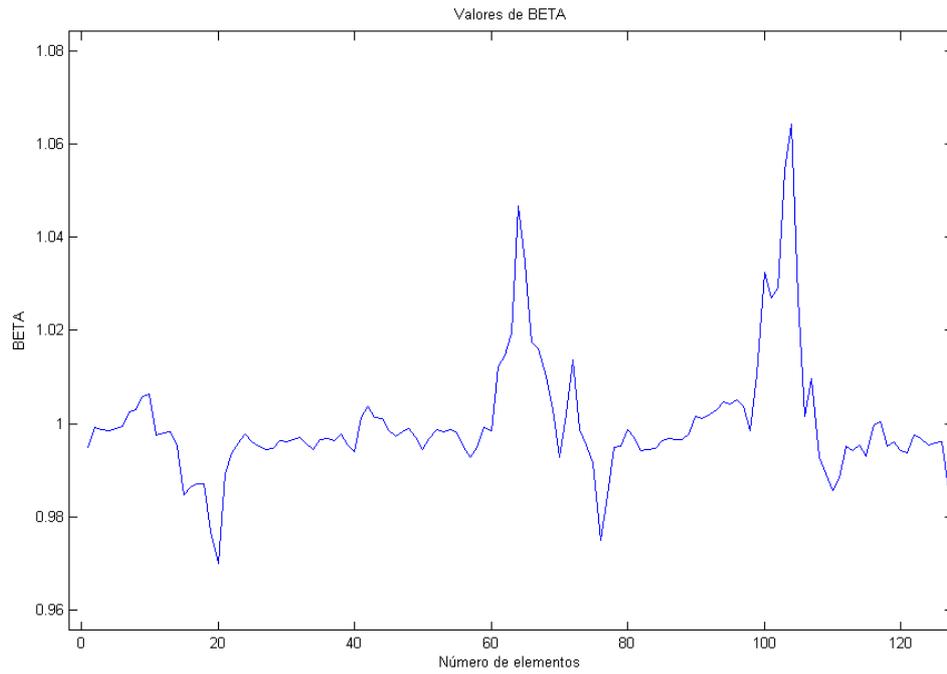
- Severidad media



*Figura 77. Parámetro  $\beta_p$ . Daño 0.5L medio*

Tampoco nos localiza el fallo.

- Severidad leve



*Figura 78. Parámetro  $\beta_p$ . Daño 0.5L leve*

Nos localiza a una distancia de 102.87 cm, en lugar de a 63.5 cm que es donde se presenta la grieta. Sin embargo, en esta última localización también se encuentra otro máximo. Es posible que el máximo situado a 102.87 cm sea debido a una irregularidad durante la experimentación.

### 4.1.5.2. Daño 0.25L

- Severidad máxima

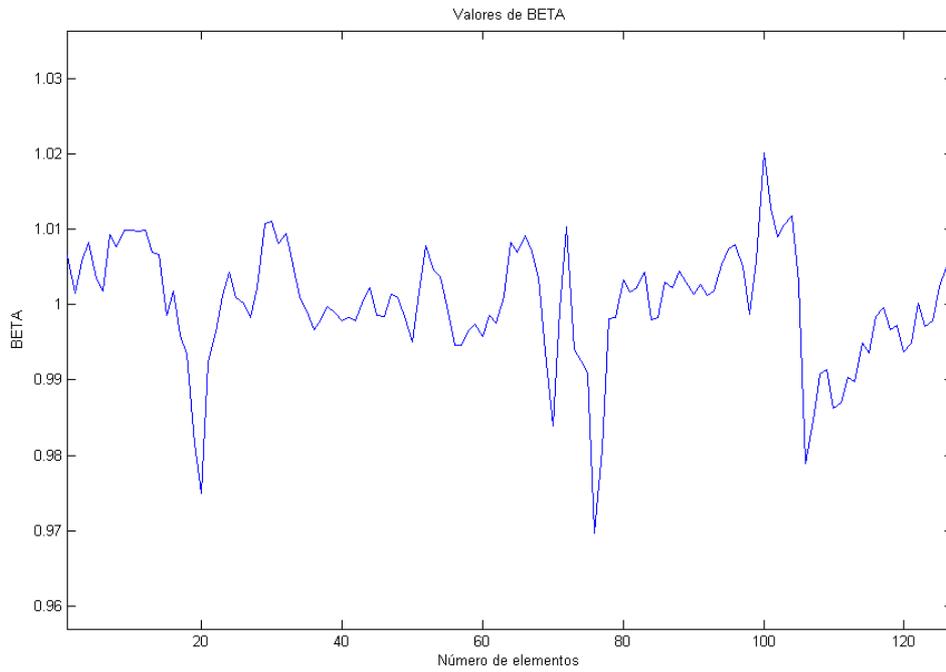


Figura 79. Parámetro  $\beta_p$ . Daño 0.25L máx.

- Severidad media

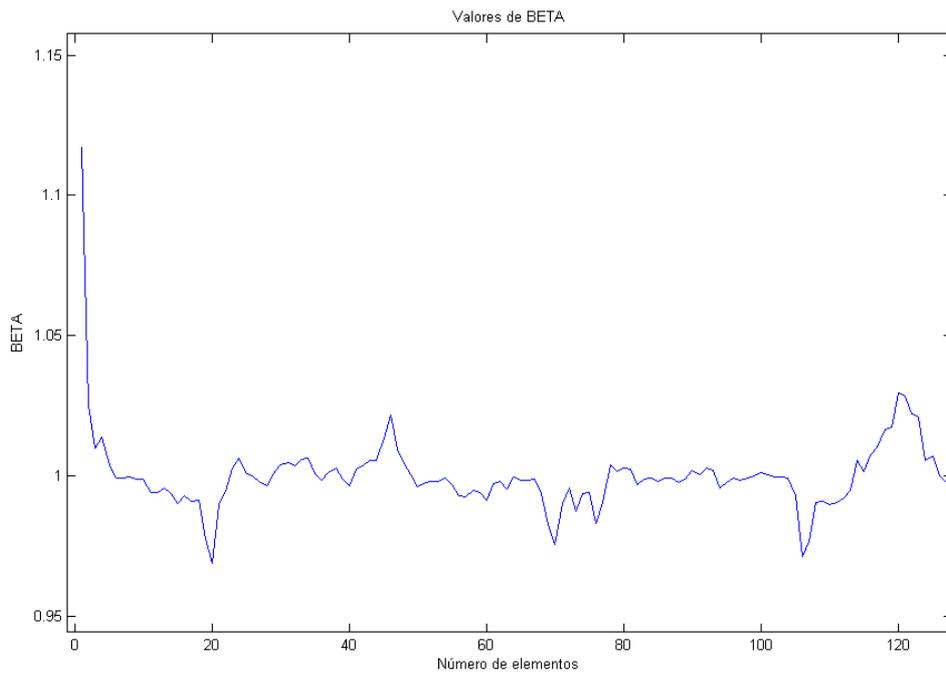


Figura 80. Parámetro  $\beta_p$ . Daño 0.25L medio

▪ Severidad leve

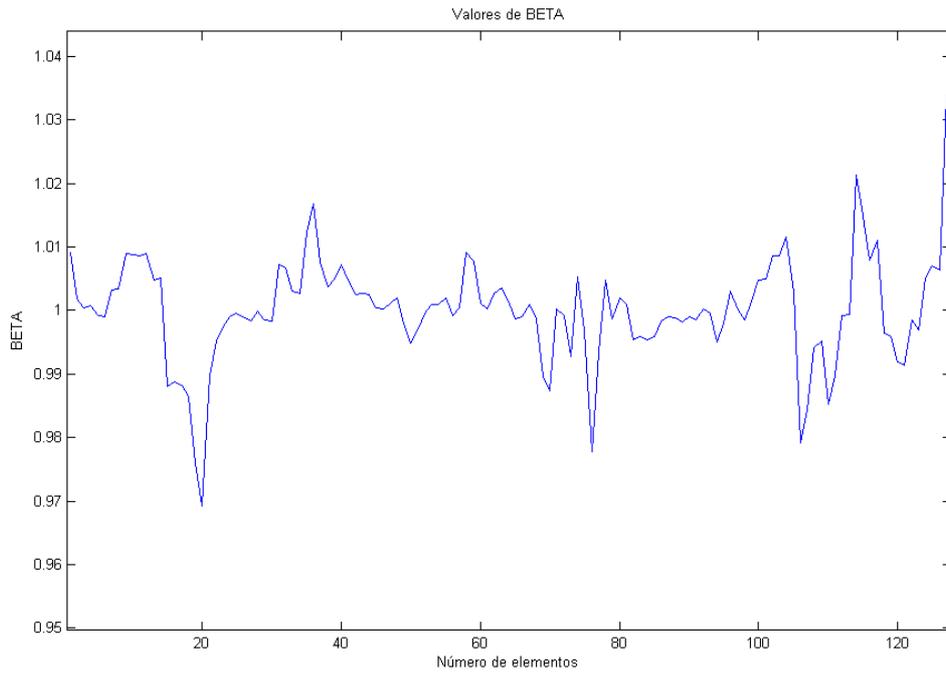


Figura 81. Parámetro  $\beta_p$ . Daño 0.25L leve

En ninguno de los casos localiza el fallo a 0.25L, es decir, en el elemento 75.

### 4.1.5.3. Daño borde

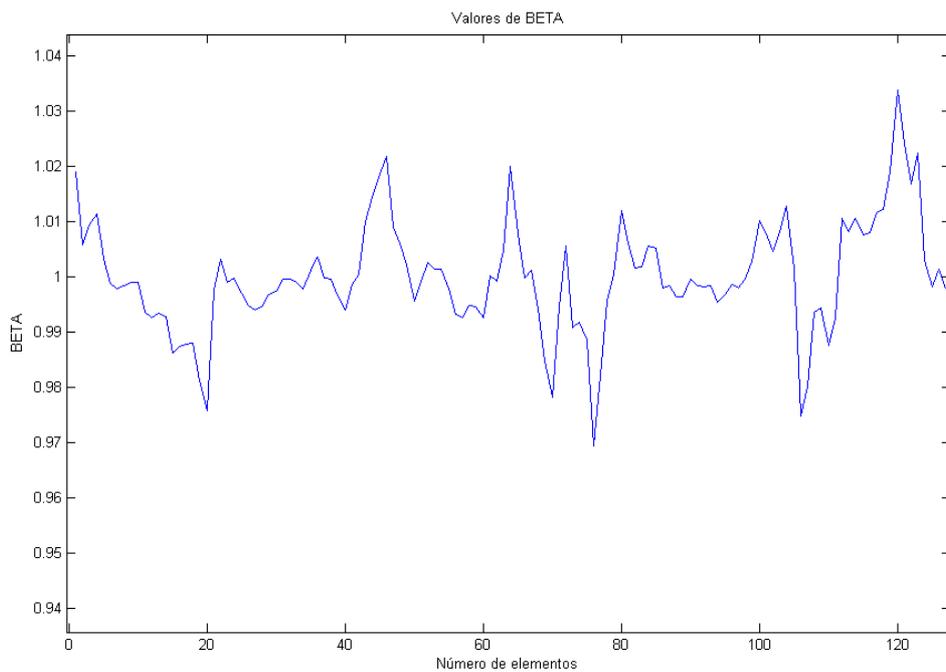


Figura 82. Parámetro  $\beta_p$ . Daño borde

Tampoco localiza el fallo en el borde.

#### 4.1.6. MAC

El parámetro MAC sólo nos puede aportar información acerca de si existe daño o no. Para ello, los valores de la diagonal de la matriz correspondiente deben ser inferiores a 0.9 y los que se encuentren fuera de ésta no nulos.

En el caso de que no se encuentre la grieta, la representación será similar a la siguiente:

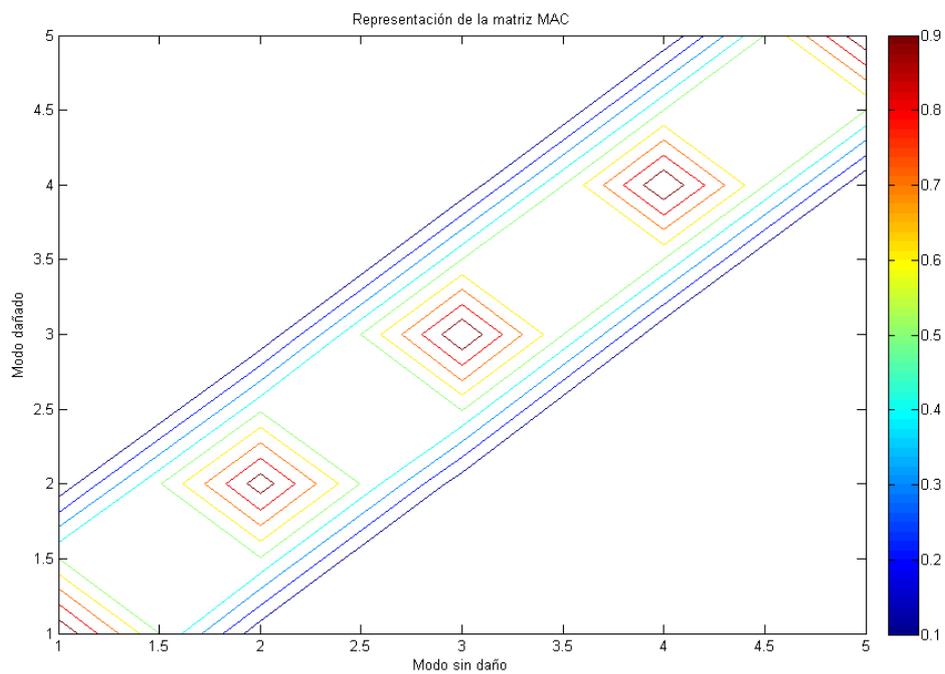


Figura 83. Representación del MAC cuando no existe daño

### 4.1.6.1. Daño 0.5L

- Severidad máxima

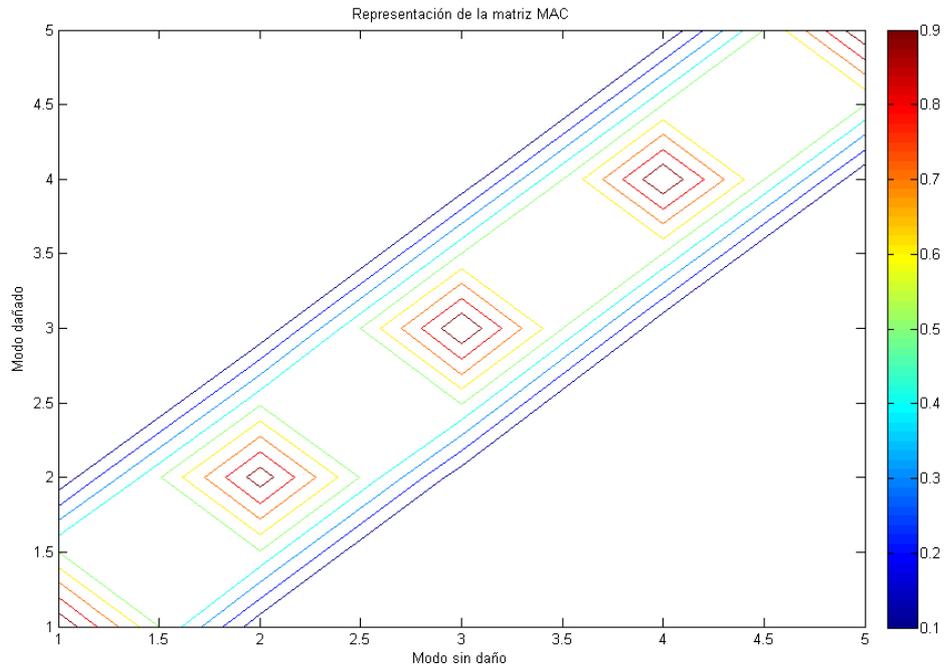


Figura 84. Representación del MAC. Daño 0.5L máx.

- Severidad media

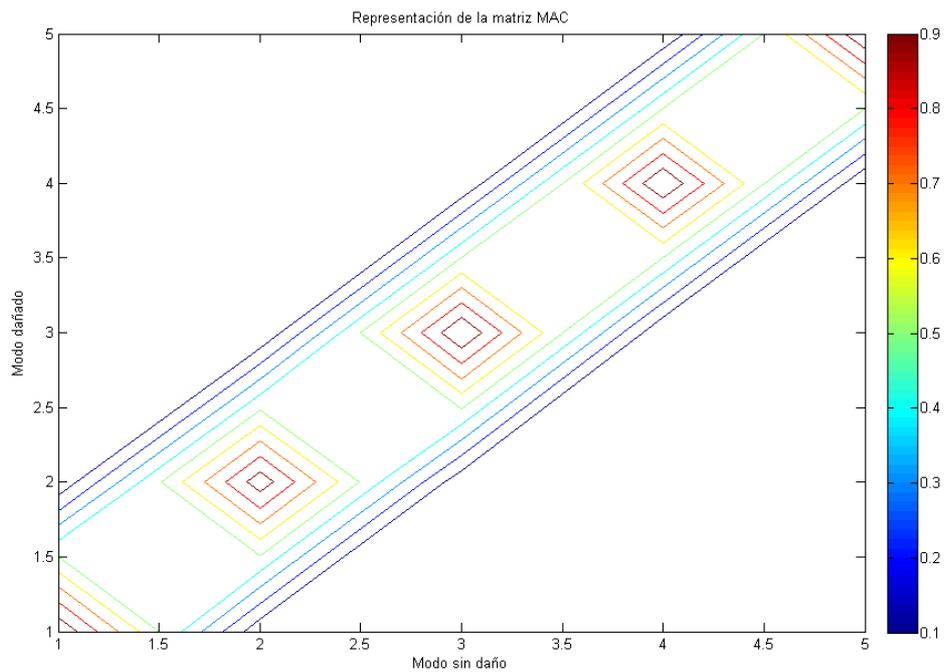
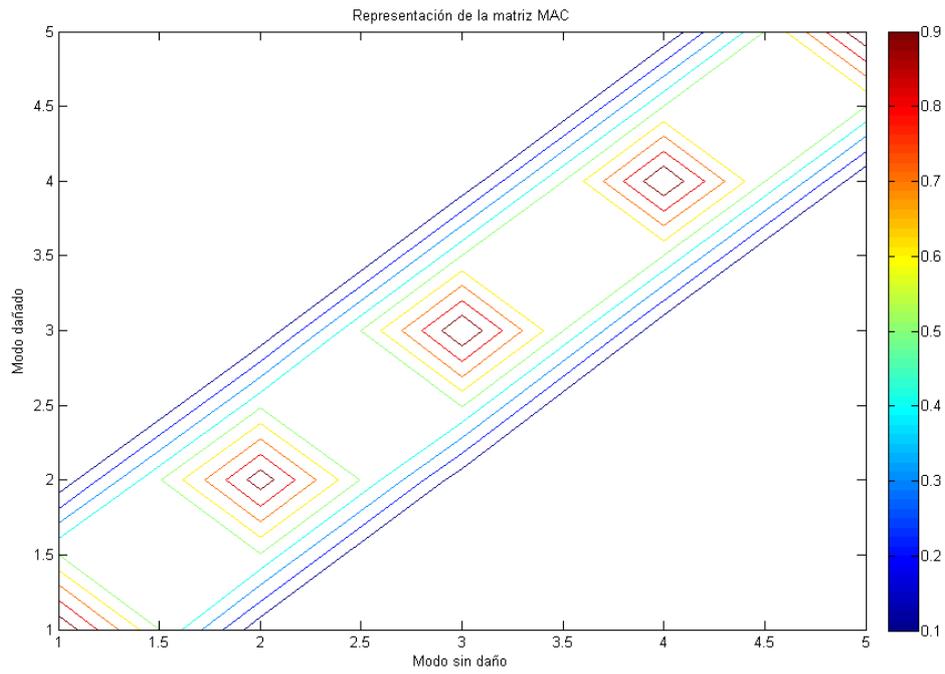


Figura 85. Representación del MAC. Daño 0.5L medio

▪ Severidad leve



*Figura 86. Representación del MAC. Daño 0.5L leve*

No detecta el daño para ninguna de las severidades.

### 4.1.6.2. Daño 0.25L

- Severidad máxima

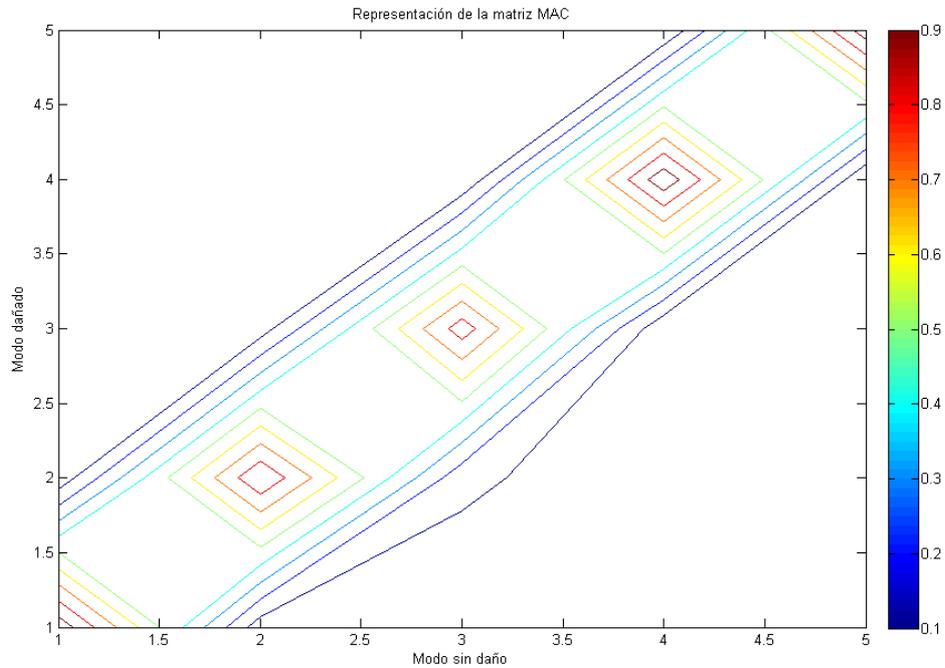


Figura 87. Representación del MAC. Daño 0.25L máx.

En este caso, no todos los elementos de la diagonal valen uno o muy próximo a la unidad. Además, algunos valores fuera de la diagonal difieren de cero. Por tanto, los modos son distintos, y por consiguiente, existe un fallo en la viga analizada.

▪ Severidad media

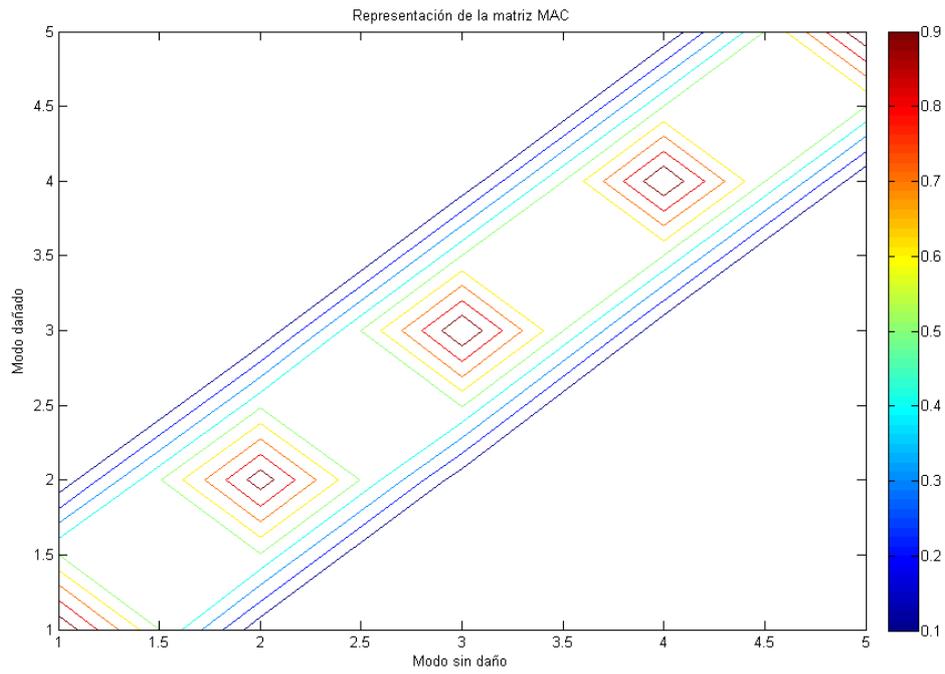


Figura 88. Representación del MAC. Daño 0.25L medio

▪ Severidad leve

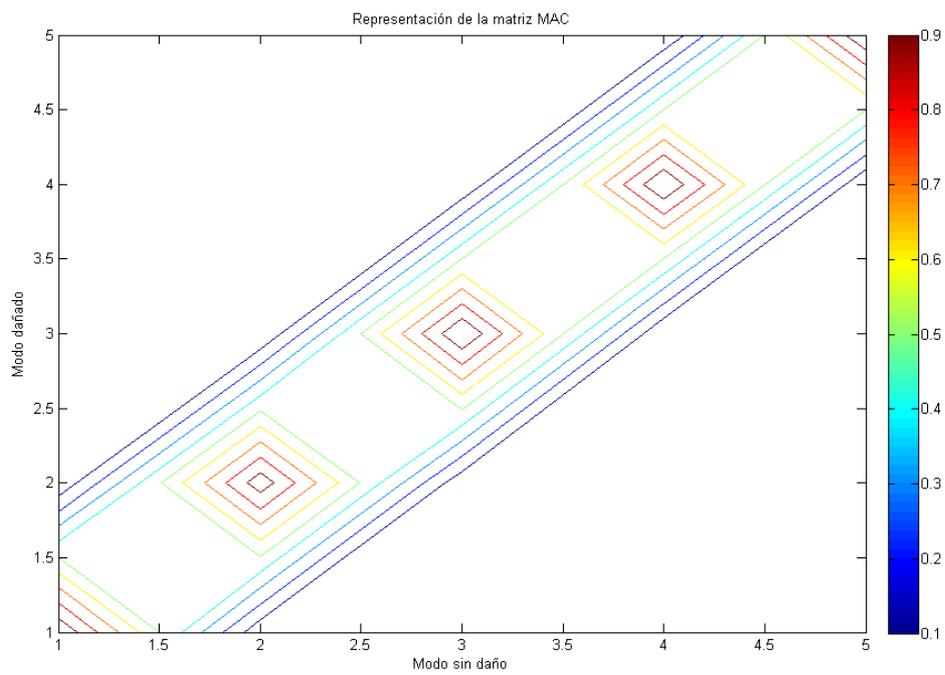


Figura 89. Representación del MAC. Daño 0.25L leve

Para severidad media y leve no se detecta la grieta.

### 4.1.6.3. Daño borde

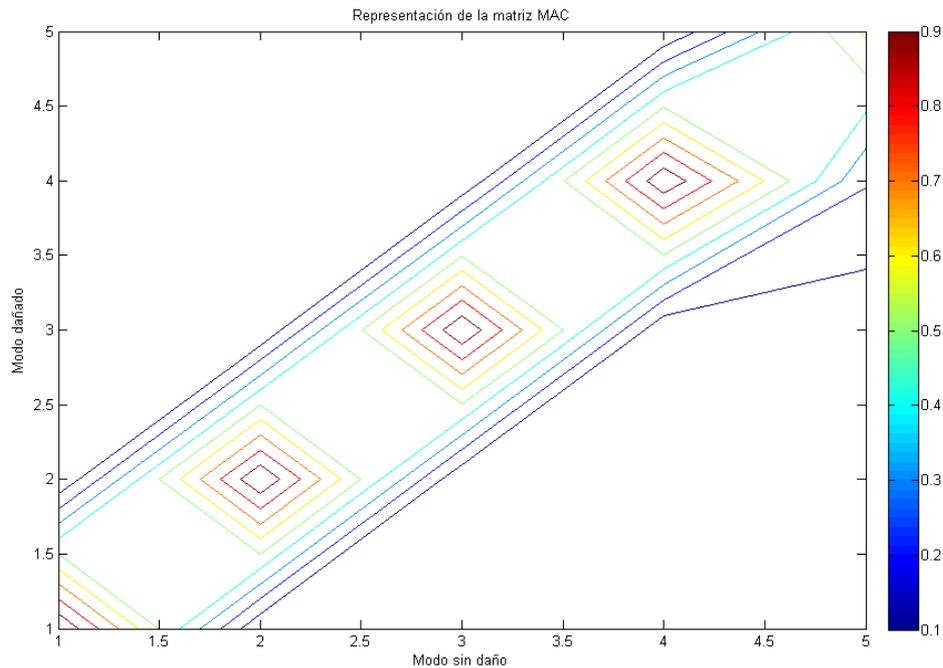


Figura 90. Representación del MAC. Daño borde

El elemento de la diagonal referido al quinto modo posee un valor lejos a la unidad, por lo que, basándonos en este método, existe un fallo.

## 4.1.7 Análisis de suavizado de los modos de vibración

Para solucionar los problemas existentes con algunos de los anteriores métodos que no identifican los daños, se recurre a suavizar los modos de vibración.

Esta idea consiste en la aplicación del método *Lowess*, el cual es una función implementada en Matlab y nos permite, mediante una suavización de los modos, evitar que DIBEMA identifique defectos en la obtención de las aceleraciones en los ensayos (como picotazos) y los encasille como grieta en la estructura.

### 4.1.7.1. Resultados sobre modos experimentales

Para una mejor visualización de los resultados, vamos a exponer para cada configuración de daño todos los métodos que nos aporta DIBEMA.

Debido a que el suavizado no afecta a las frecuencias naturales, no se representan de nuevo las soluciones debido a las variaciones que sufren al ser las mismas que las anteriores.

Por lo general, de nuevo el método de la variación de la matriz de rigidez no funciona para ninguna de las configuraciones de daño presente.

#### 4.1.7.1.1. Daño 0.5L

- Severidad máxima

#### Variación de modos de vibración

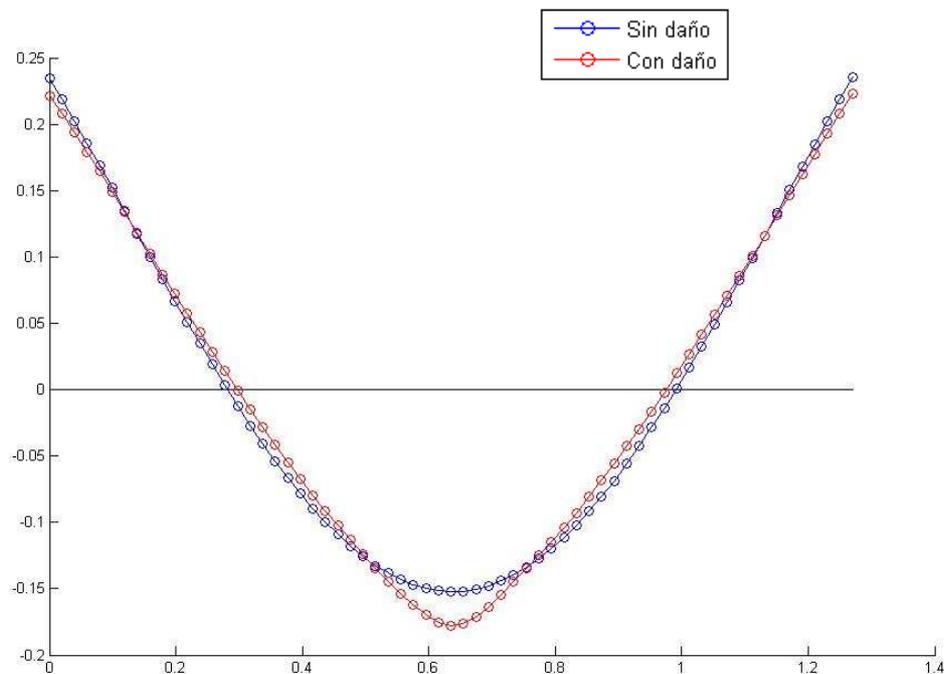


Figura 91. Primer modo de vibración. Modelo suavizado. Daño 0.5L máx.

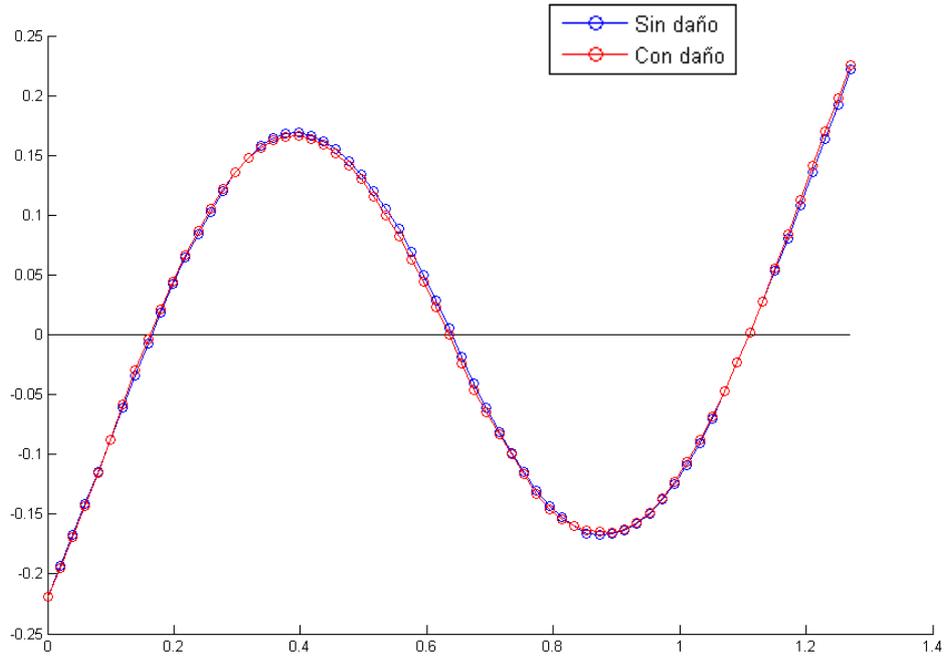


Figura 92. Segundo modo de vibración. Modelo suavizado. Daño 0.5L máx.

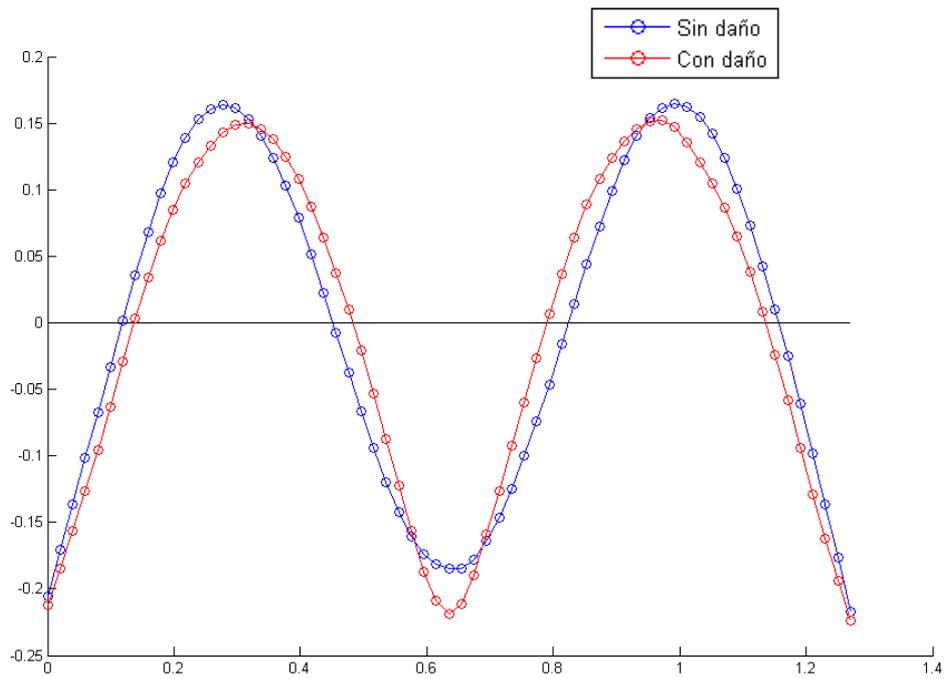


Figura 93. Tercer modo de vibración. Modelo suavizado. Daño 0.5L máx.

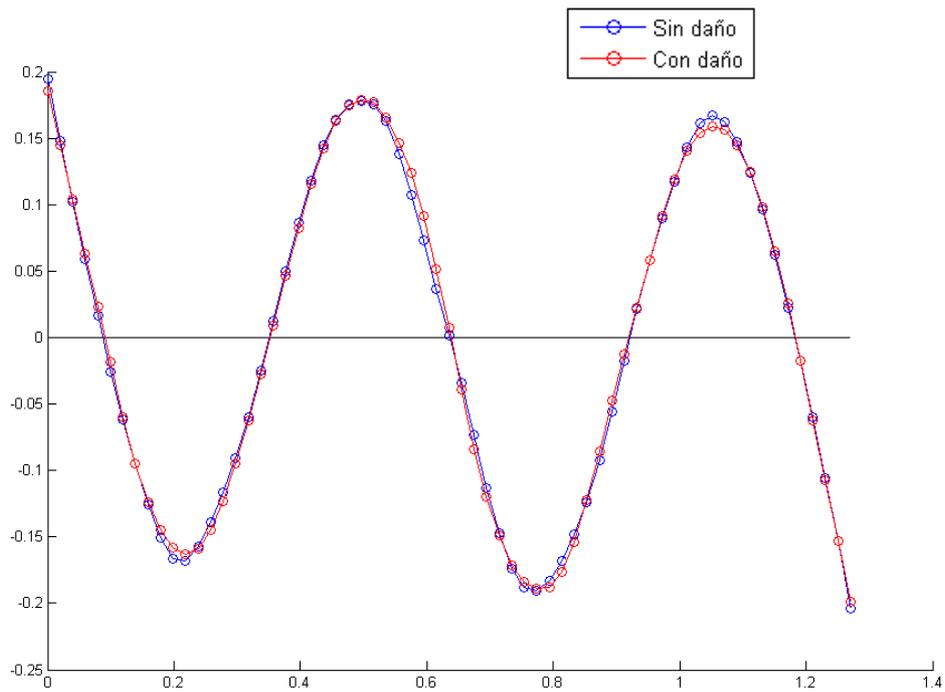


Figura 94. Cuarto modo de vibración. Modelo suavizado. Daño 0.5L máx.

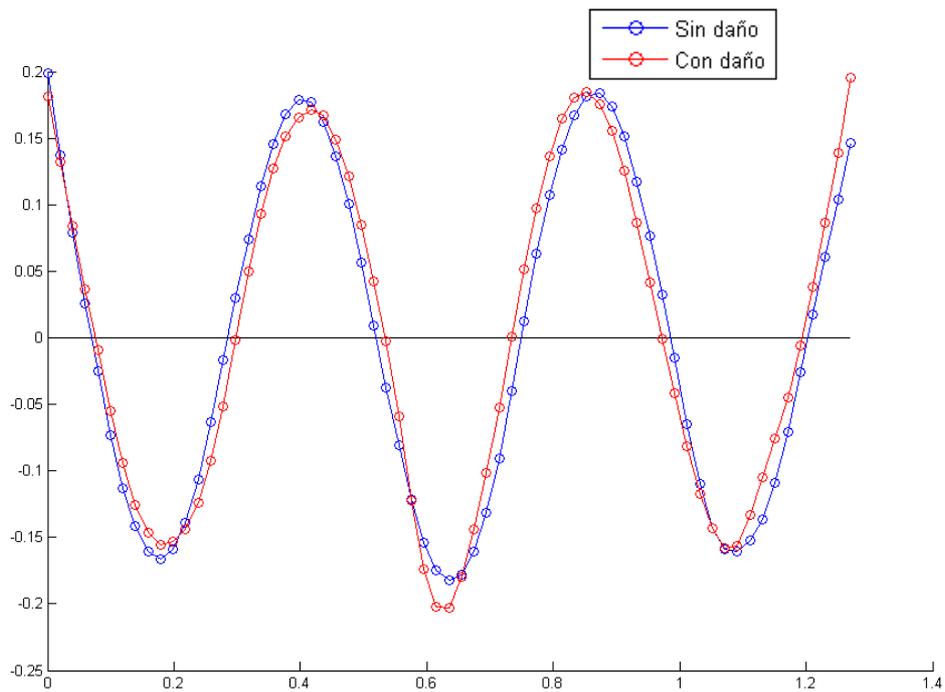


Figura 95. Quinto modo de vibración. Modelo suavizado. Daño 0.5L máx.

Se observa el efecto del suavizado, donde los picotazos se atenúan en curvas suaves.

La variación que sufren los modos en la zona central nos identifica la existencia del fallo.

## Variación de la matriz de flexibilidad y rigidez

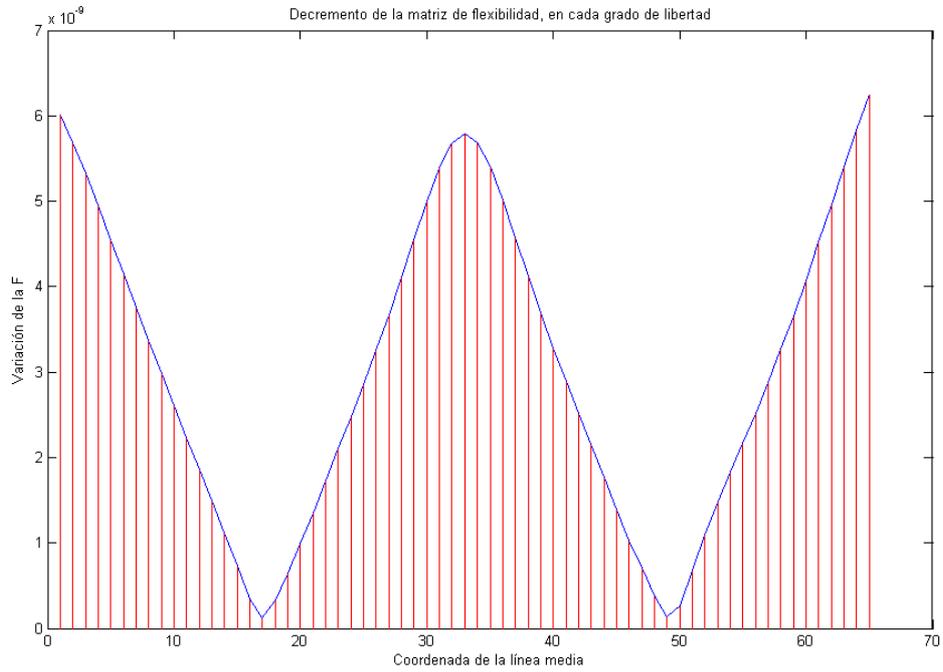


Figura 96. Variación de la matriz de flexibilidad. Modelo suavizado. Daño 0.5L máx.

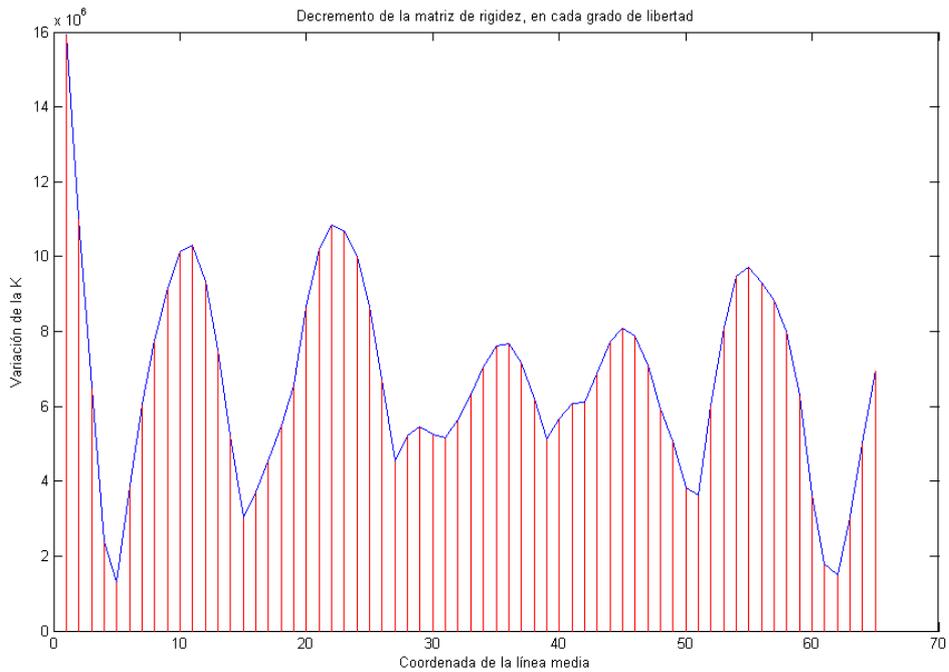


Figura 97. Variación de la matriz de rigidez. Modelo suavizado. Daño 0.5L máx.

La variación de la matriz de flexibilidad localiza el fallo en el centro de la viga, mientras que la variación de la matriz de rigidez no lo encuentra.

Método de Stubbs

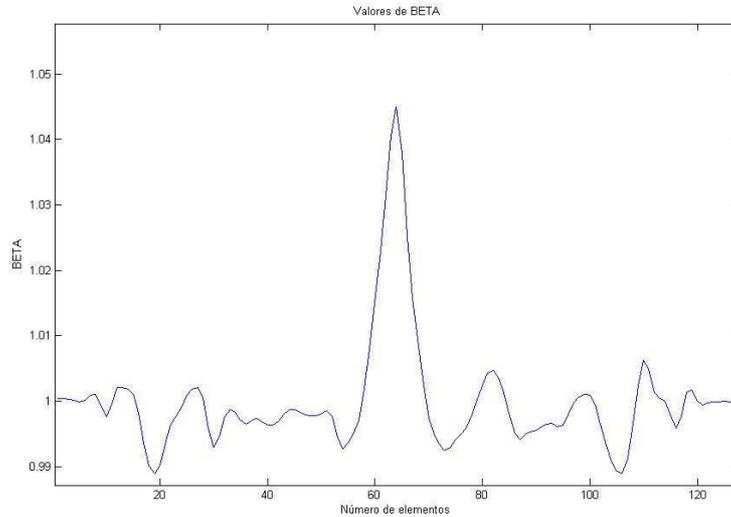


Figura 98. Parámetro  $\beta_p$ . Modelo suavizado. Daño 0.5L máx.

Observamos como claramente un pico resalta en la sección intermedia, en la coordenada 63.50 cm, esto es, justo donde se encuentra la grieta practicada a la viga.

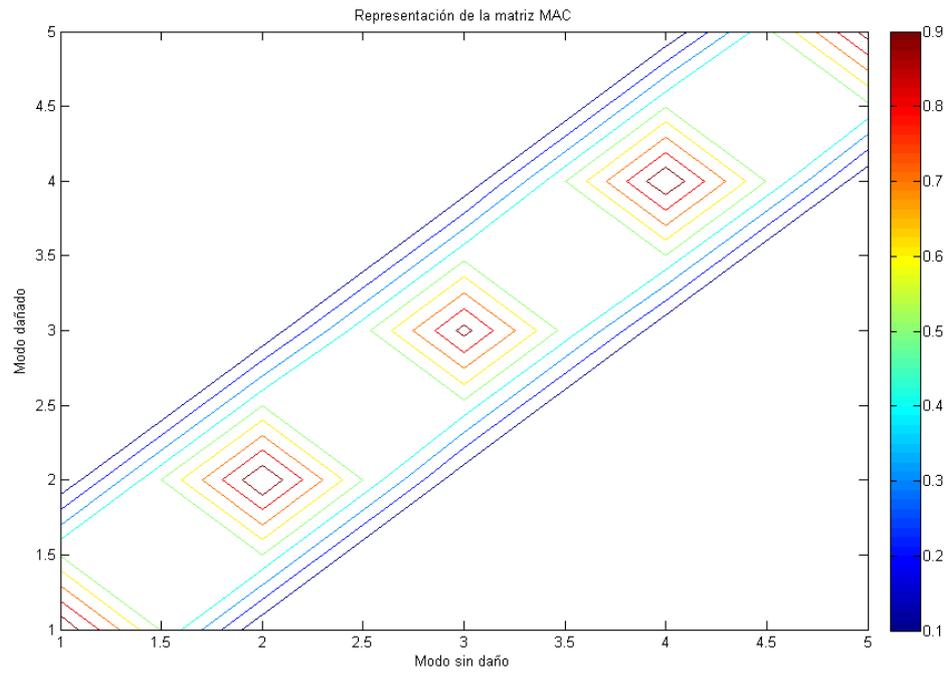
Cambio en la curvatura de los modos

Nº de modo de vibración	Variación de curvatura	Posición (cm)
1	6.94	63.01
2	4.89	66.95
3	34.39	62.02
4	19.84	80.73
5	37.92	61.04

Tabla 22. Variación de la curvatura. Modelo suavizado. Daño 0.5L máx.

Exceptuando el 4º modo, los demás dan una buena precisión sobre la localización del daño.

## MAC

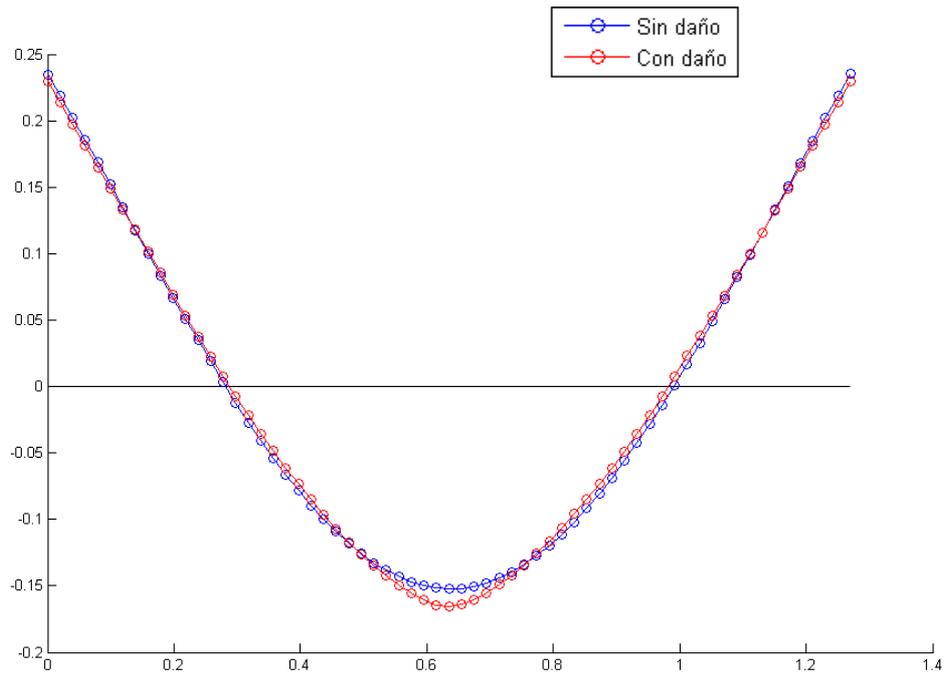


*Figura 99. Representación del MAC. Modelo suavizado. Daño 0.5L máx.*

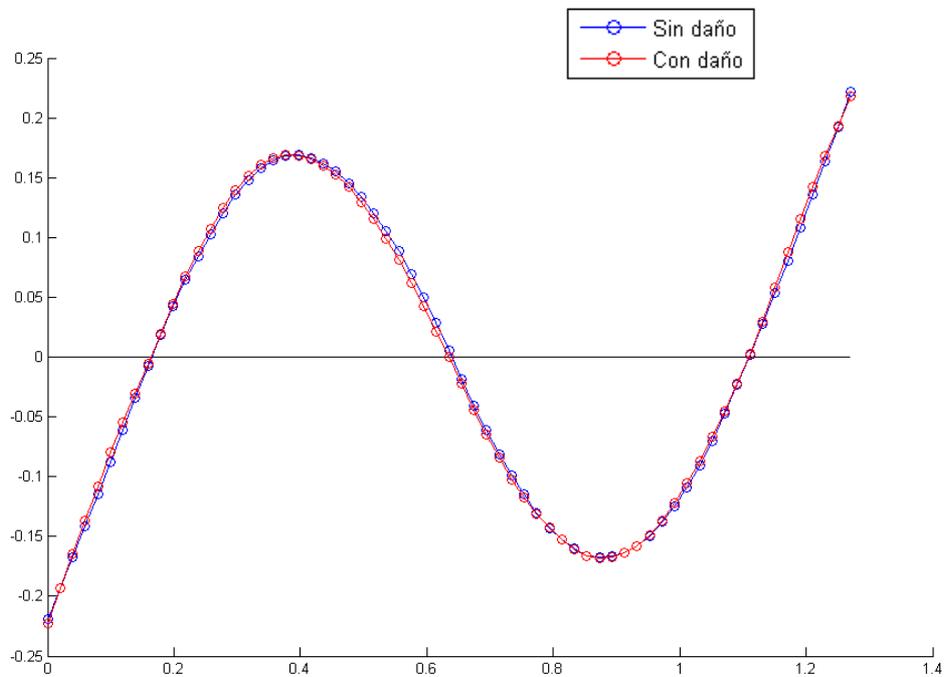
No localiza la grieta.

- Severidad media

### Variación de modos de vibración



*Figura 100. Primer modo de vibración. Modelo suavizado. Daño 0.5L medio*



*Figura 101. Segundo modo de vibración. Modelo suavizado. Daño 0.5L medio*

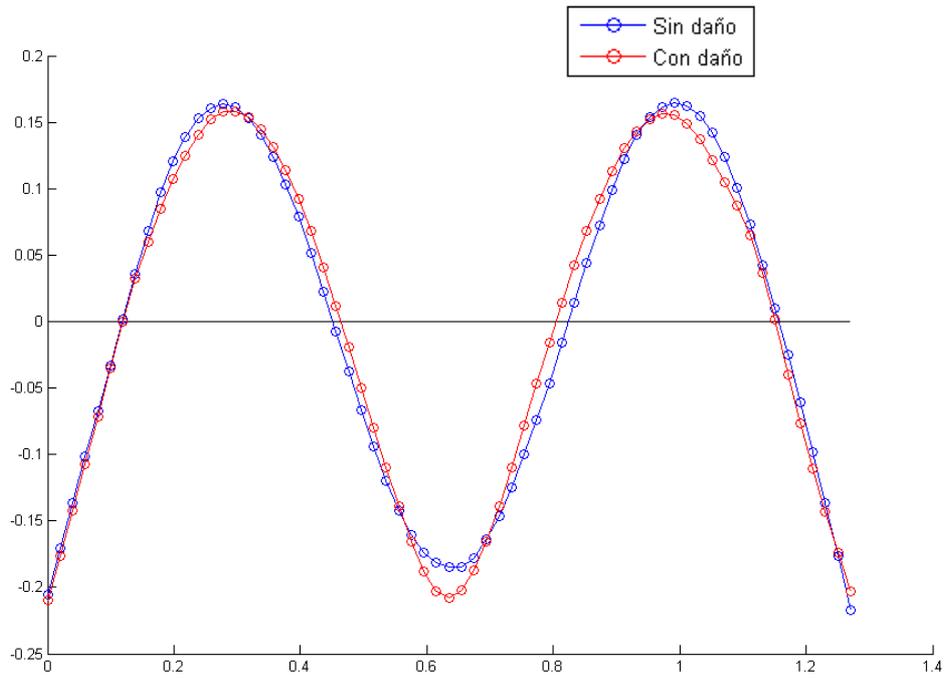


Figura 102. Tercer modo de vibración. Modelo suavizado. Daño 0.5L medio

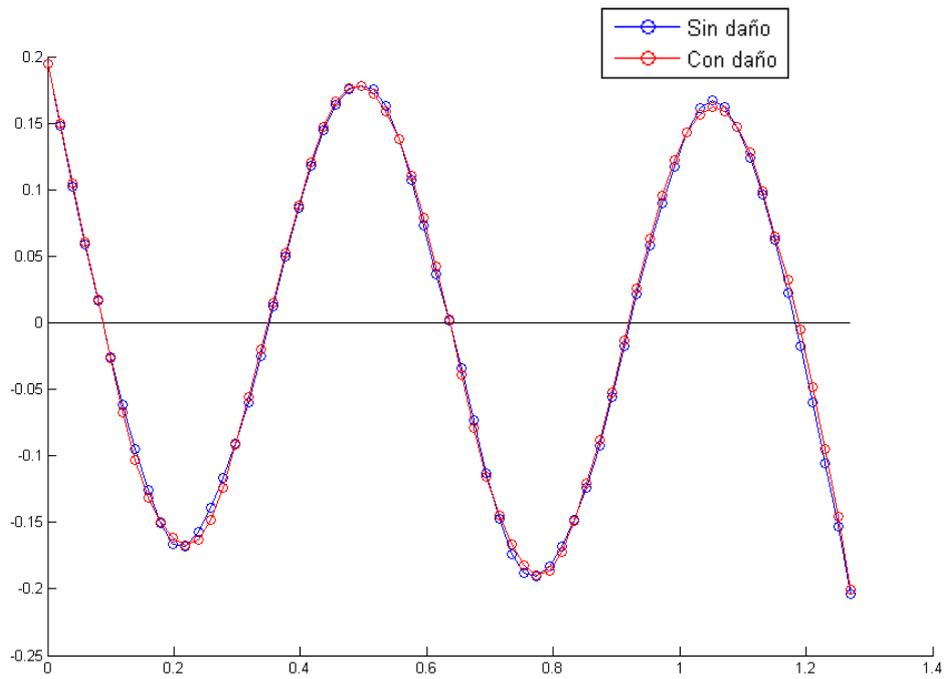


Figura 103. Cuarto modo de vibración. Modelo suavizado. Daño 0.5L medio

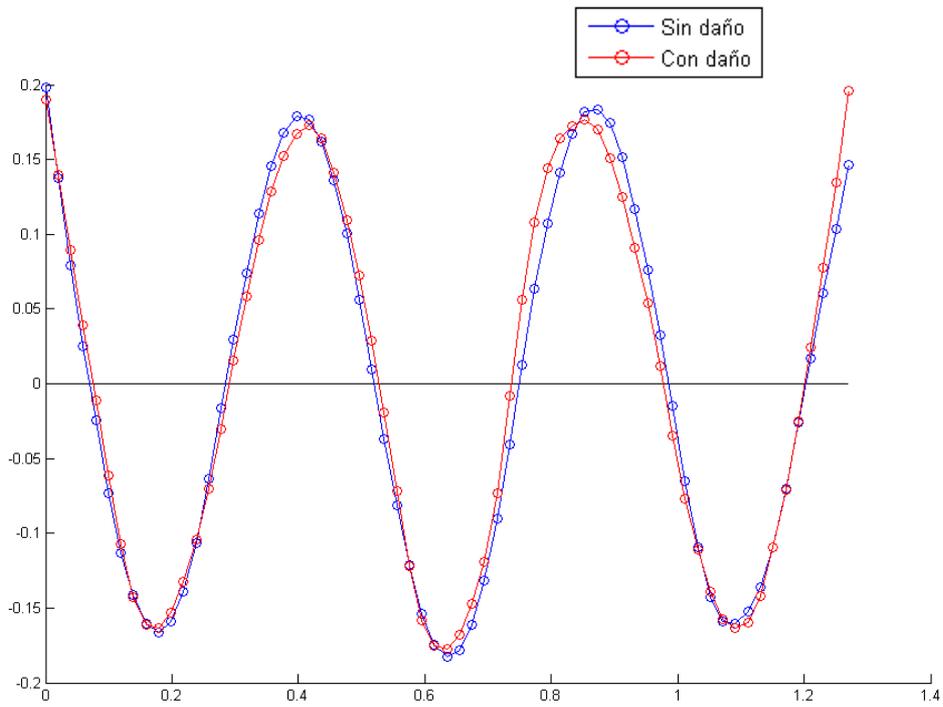


Figura 104. Quinto modo de vibración. Modelo suavizado. Daño 0.5L medio

Se observa claramente la variación que sufre algunos modos en el centro.

### Variación de la matriz de flexibilidad y rigidez

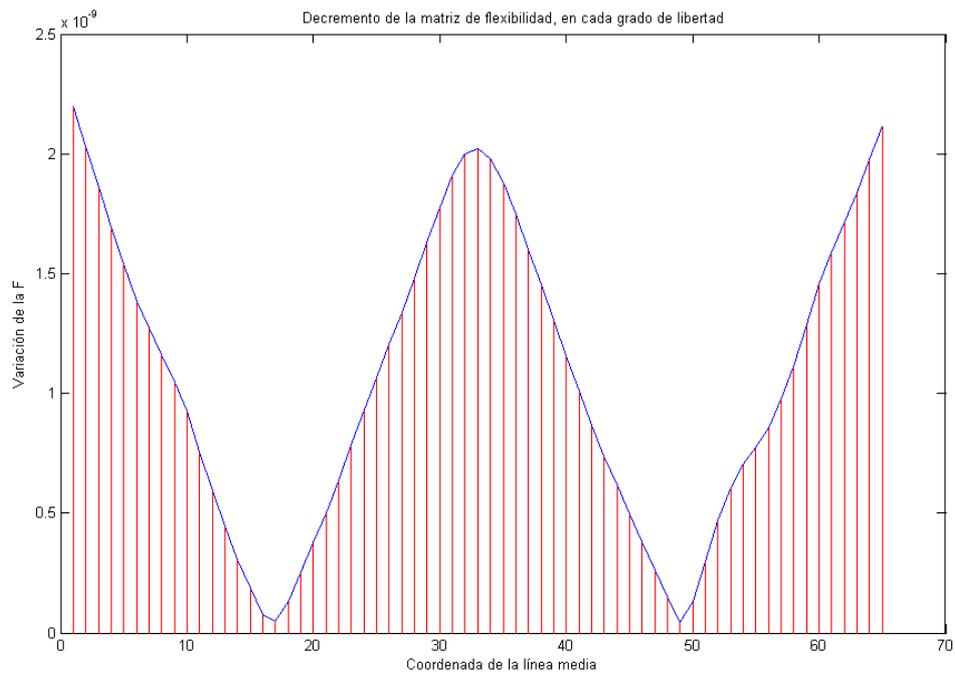


Figura 105. Variación de la matriz de flexibilidad. Modelo suavizado. Daño 0.5L medio

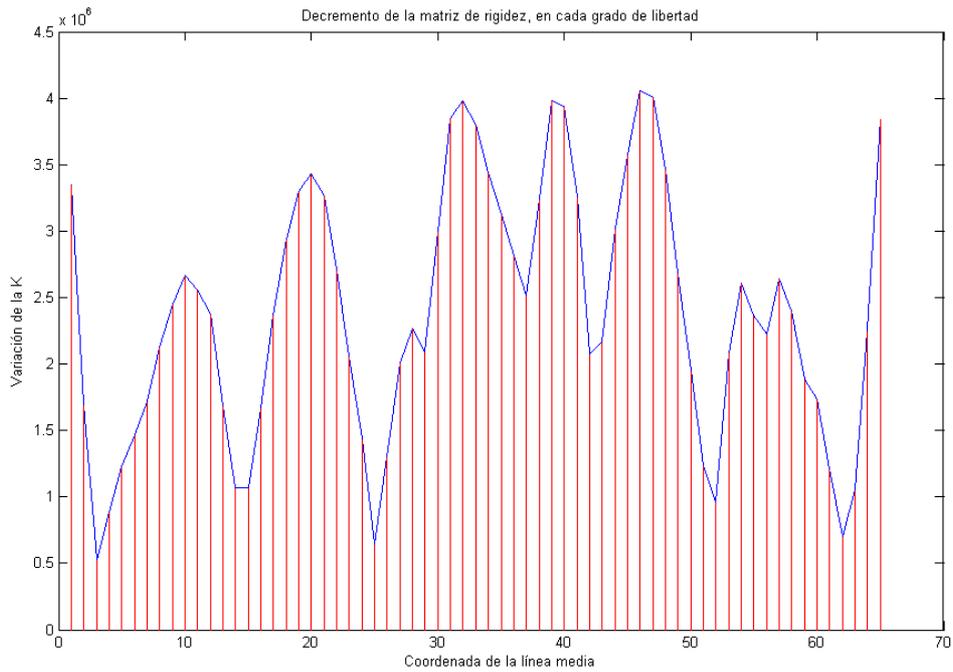


Figura 106. Variación de la matriz de rigidez. Modelo suavizado. Daño 0.5L medio

### Método de Stubbs

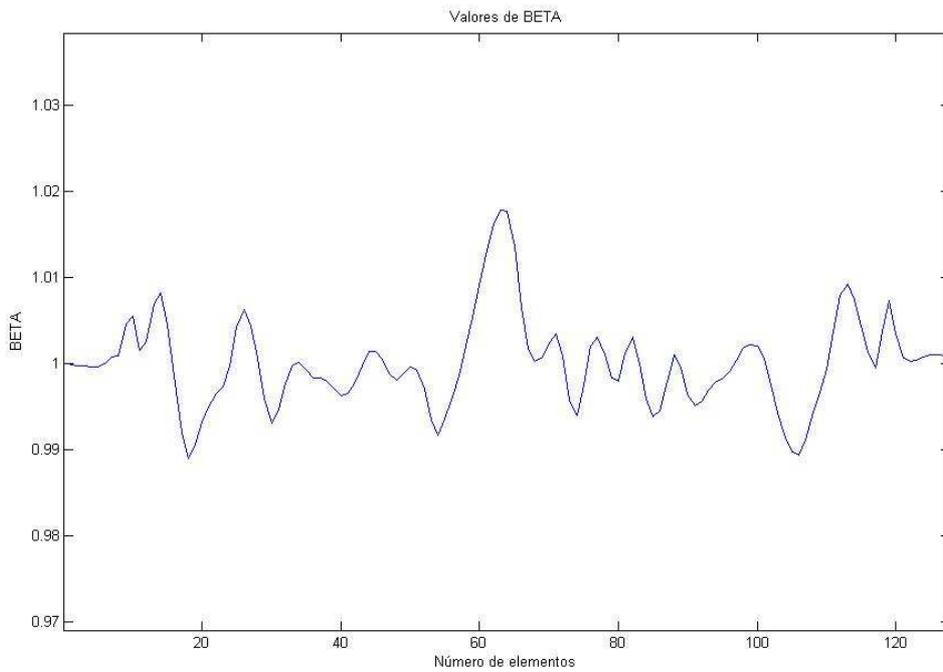


Figura 107. Parámetro  $\beta_p$ . Modelo suavizado. Daño 0.5L medio

El máximo se encuentra en la posición 62.52 cm, es decir, a menos de 1 cm de donde se encuentra el fallo realmente.

## Cambio en la curvatura de los modos

Nº de modo de vibración	Variación de curvatura	Posición (cm)
1	3.43	63.99
2	9.72	8.86
3	19.84	62.02
4	16.98	12.80
5	32.03	69.90

Tabla 23. Variación de la curvatura. Modelo suavizado. Daño 0.5L medio

Para este daño solo el primer y tercer modo da buenos resultados.

## MAC

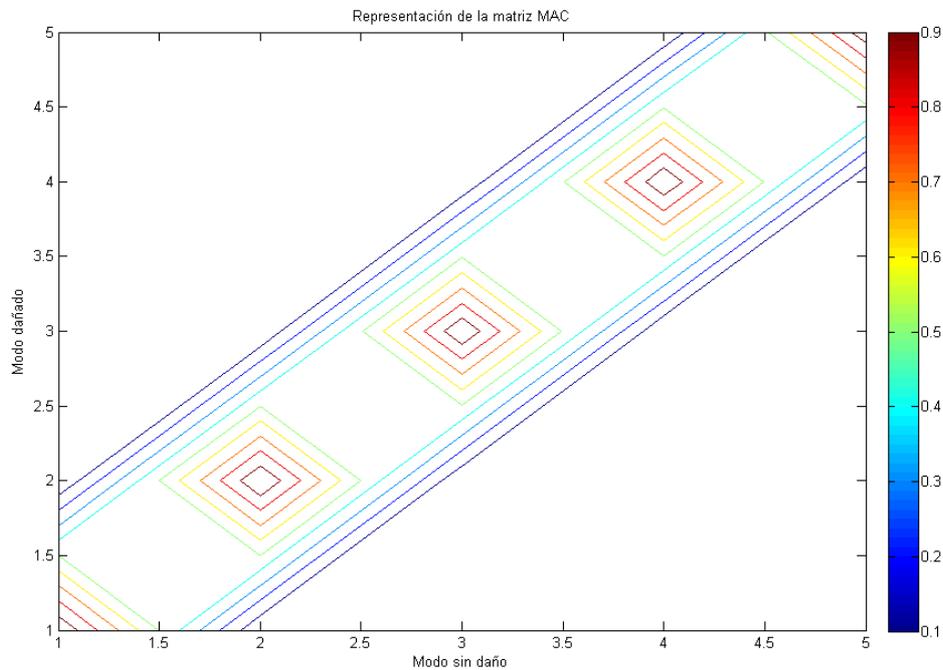


Figura 108. Representación del MAC. Modelo suavizado. Daño 0.5L medio

No detecta la grieta.

- Severidad leve

### Variación de modos de vibración

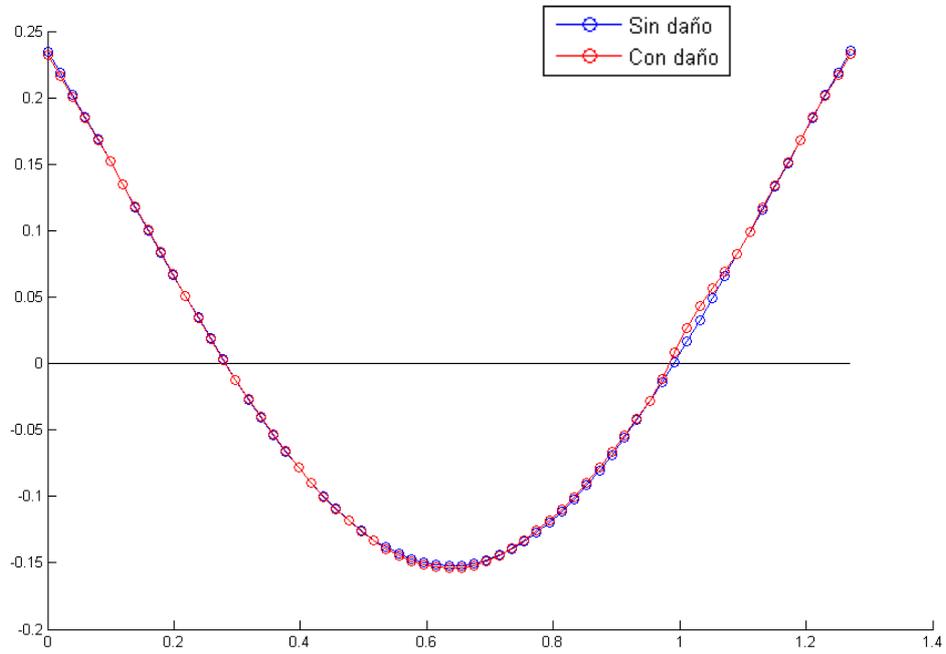


Figura 109. Primer modo de vibración. Modelo suavizado. Daño 0.5L leve

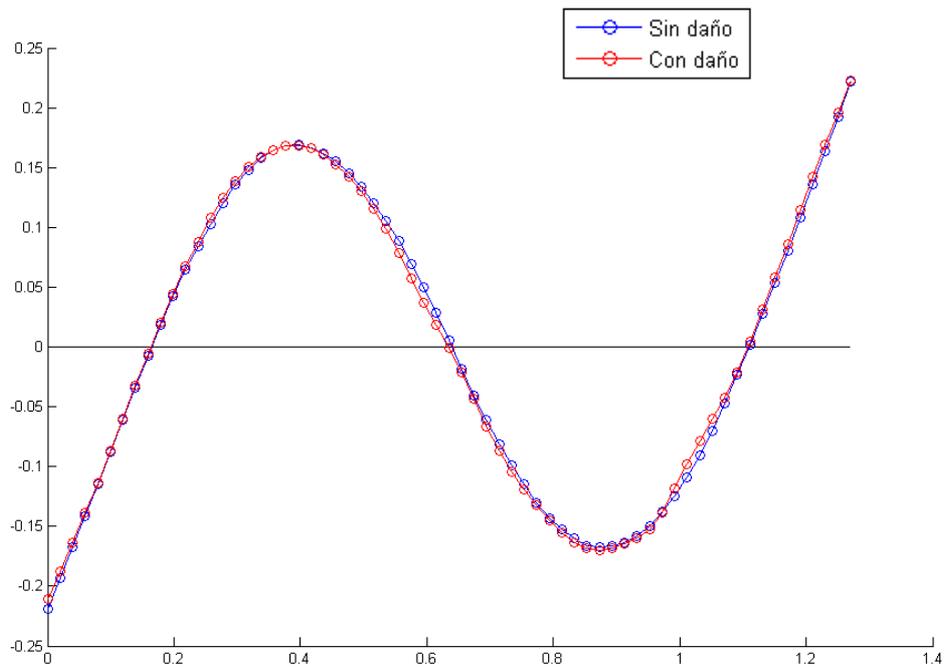


Figura 110. Segundo modo de vibración. Modelo suavizado. Daño 0.5L leve

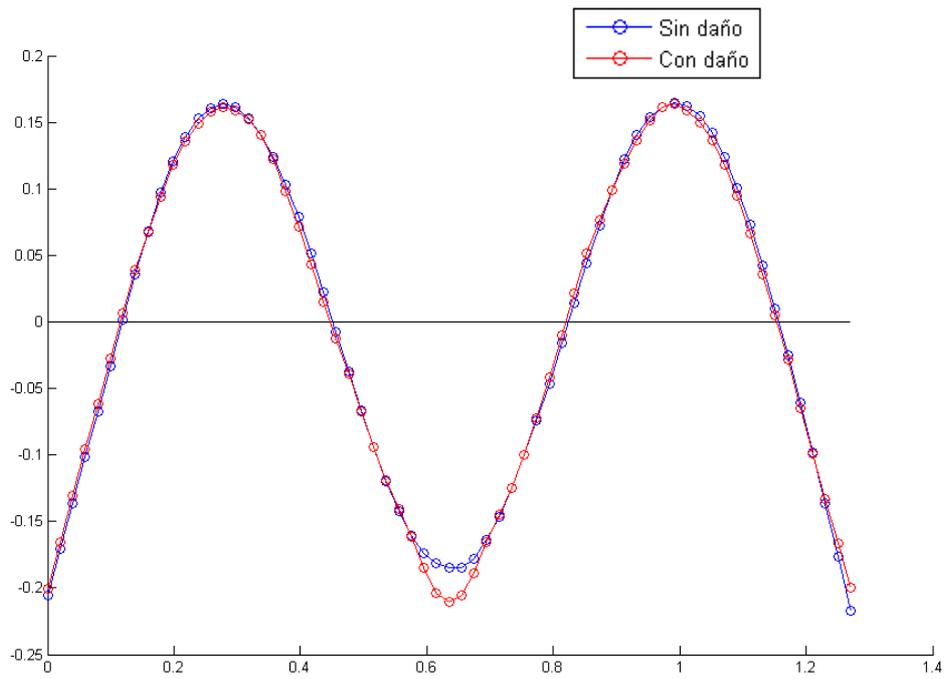


Figura 111. Tercer modo de vibración. Modelo suavizado. Daño 0.5L leve

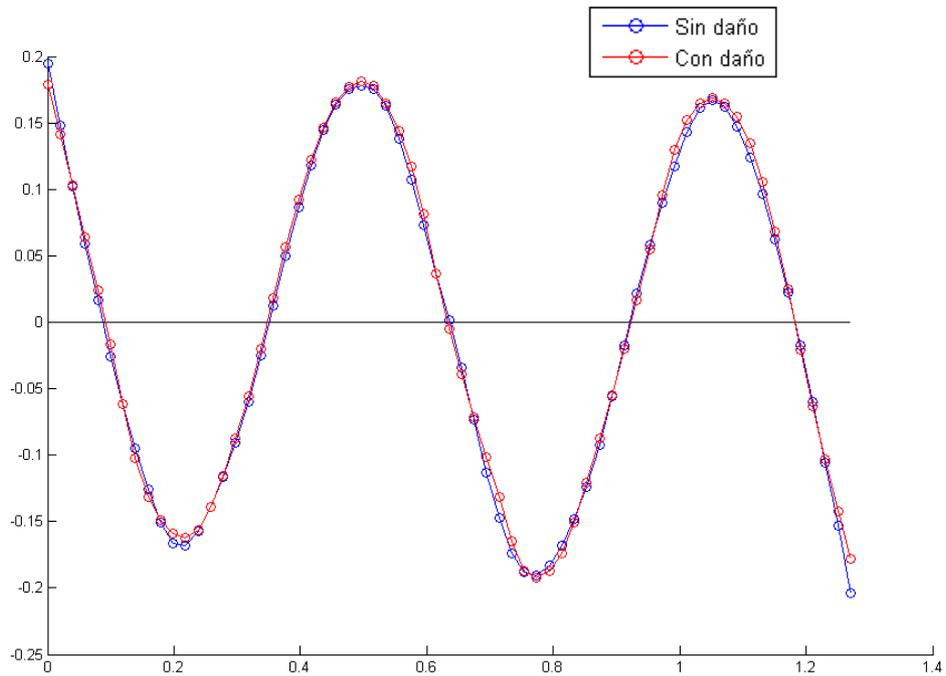


Figura 112. Cuarto modo de vibración. Modelo suavizado. Daño 0.5L leve

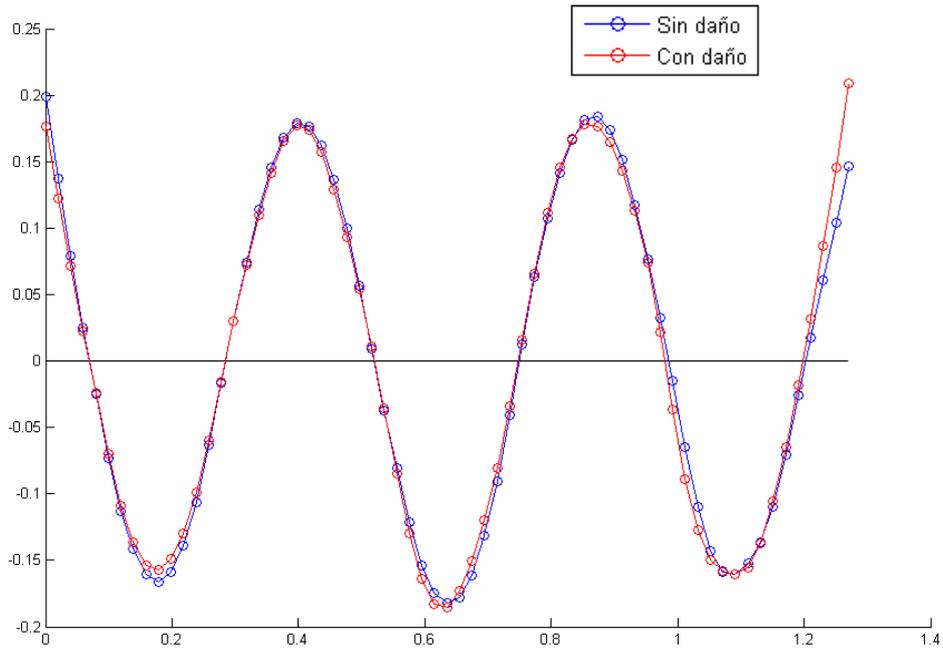


Figura 113. Quinto modo de vibración. Modelo suavizado. Daño 0.5L leve

El tercer modo delata la presencia de daño.

### Variación de la matriz de flexibilidad y rigidez

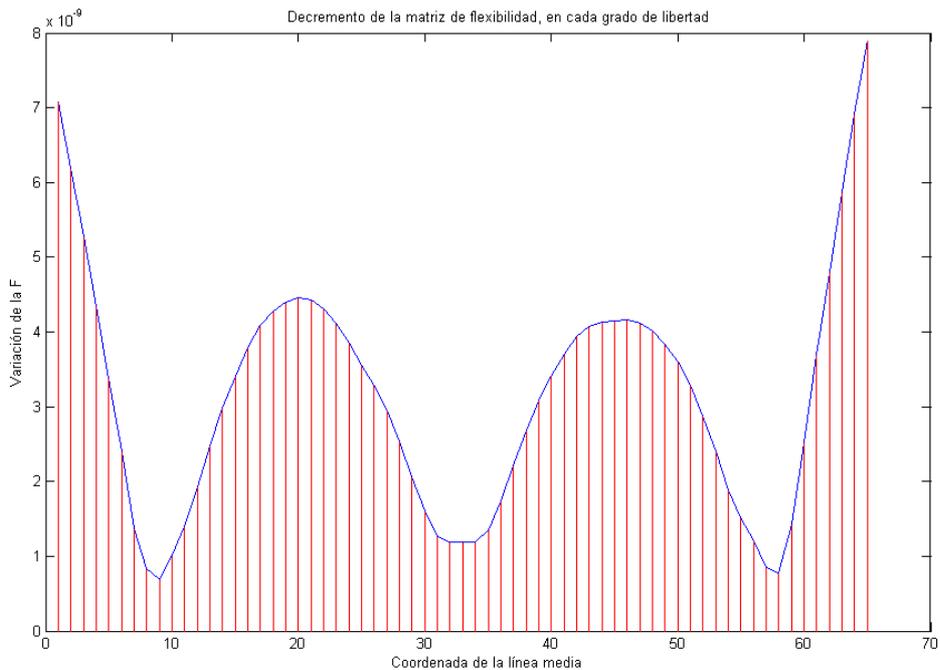


Figura 114. Variación de la matriz de flexibilidad. Modelo suavizado. Daño 0.5L leve

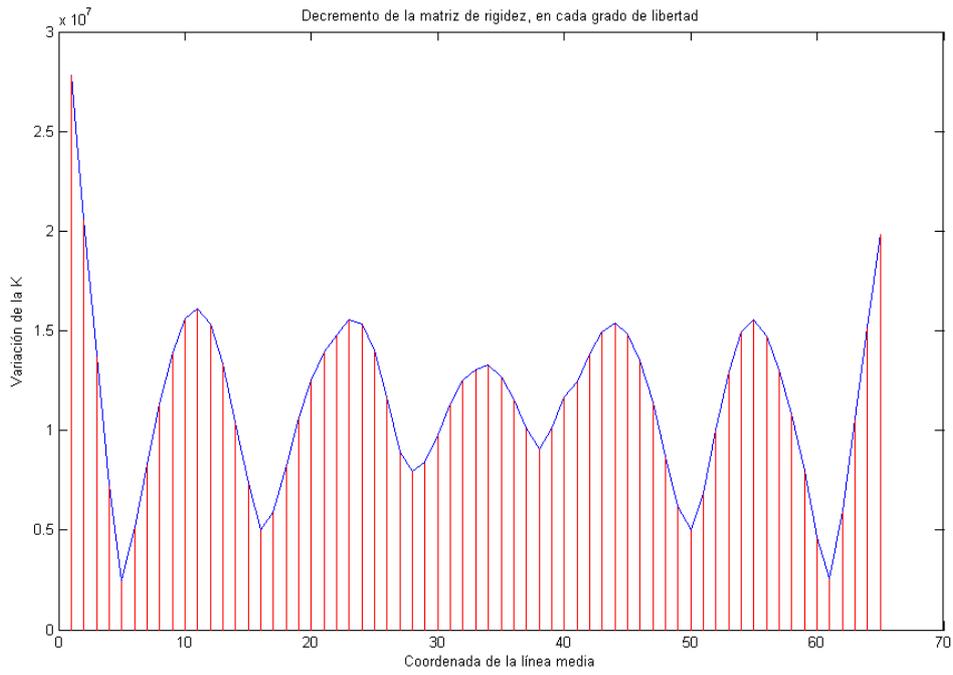


Figura 115. Variación de la matriz de rigidez. Modelo suavizado. Daño 0.5L leve

Ninguno funciona para esta severidad.

### Método de Stubbs

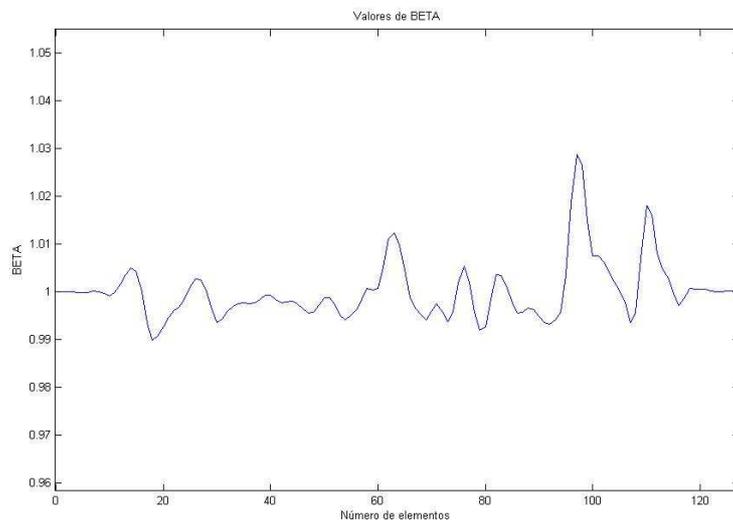


Figura 116. Parámetro  $\beta_p$ . Modelo suavizado. Daño 0.5L leve

El método no funciona para este caso.

## Cambio en la curvatura de los modos

Nº de modo de vibración	Variación de curvatura	Posición (cm)
1	9.64	108.29
2	10.97	95.50
3	27.08	61.04
4	28.84	98.45
5	30.40	94.51

Tabla 24. Variación de la curvatura. Modelo suavizado. Daño 0.5L leve

Solo para el tercer modo da un resultado coherente.

## MAC

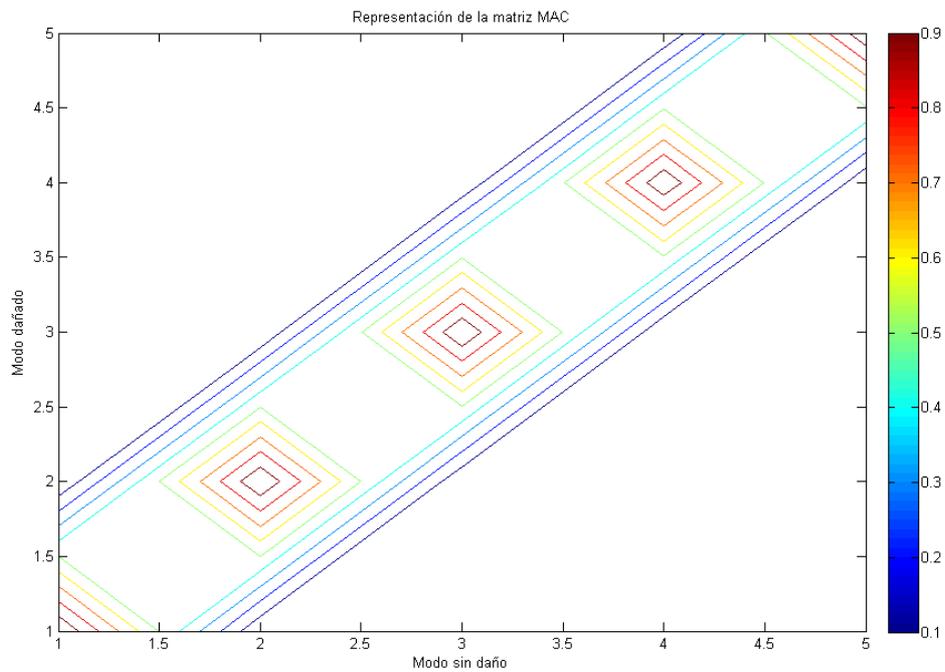


Figura 117. Representación del MAC. Modelo suavizado. Daño 0.5L leve

No se detecta el fallo.

#### 4.1.7.1.2. Daño 0.25L

- Severidad máxima

##### Variación de modos de vibración

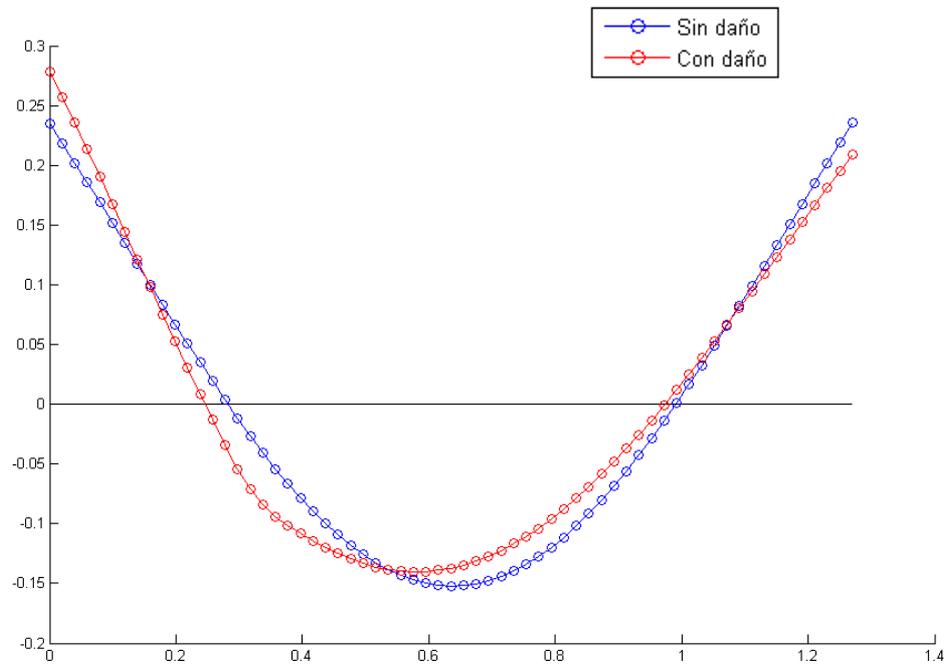


Figura 118. Primer modo de vibración. Modelo suavizado. Daño 0.25L máx.

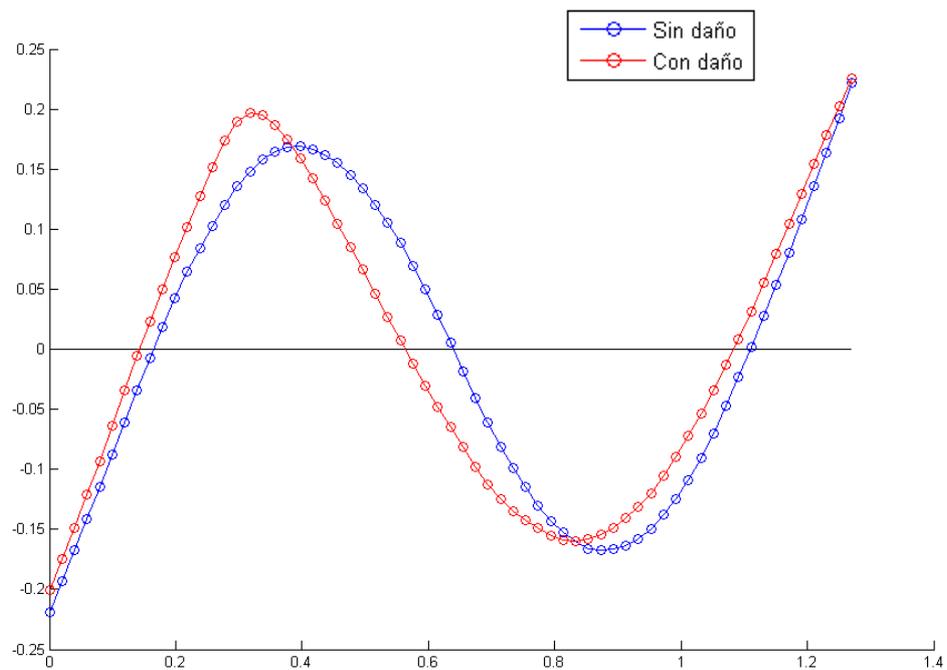


Figura 119. Segundo modo de vibración. Modelo suavizado. Daño 0.25L máx.

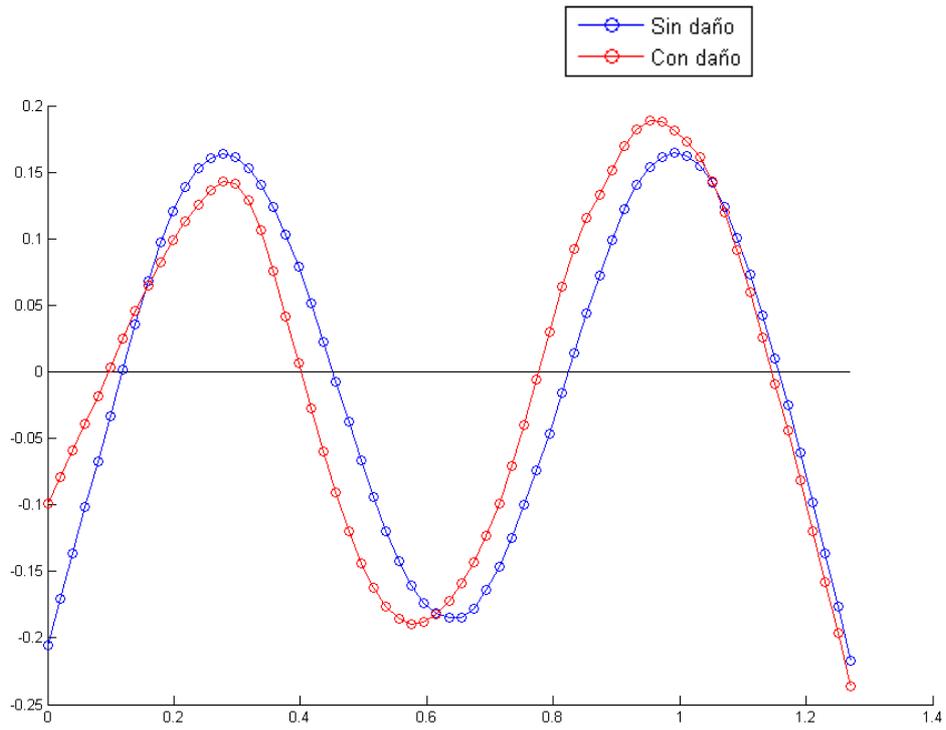


Figura 120. Tercer modo de vibración. Modelo suavizado. Daño 0.25L máx.

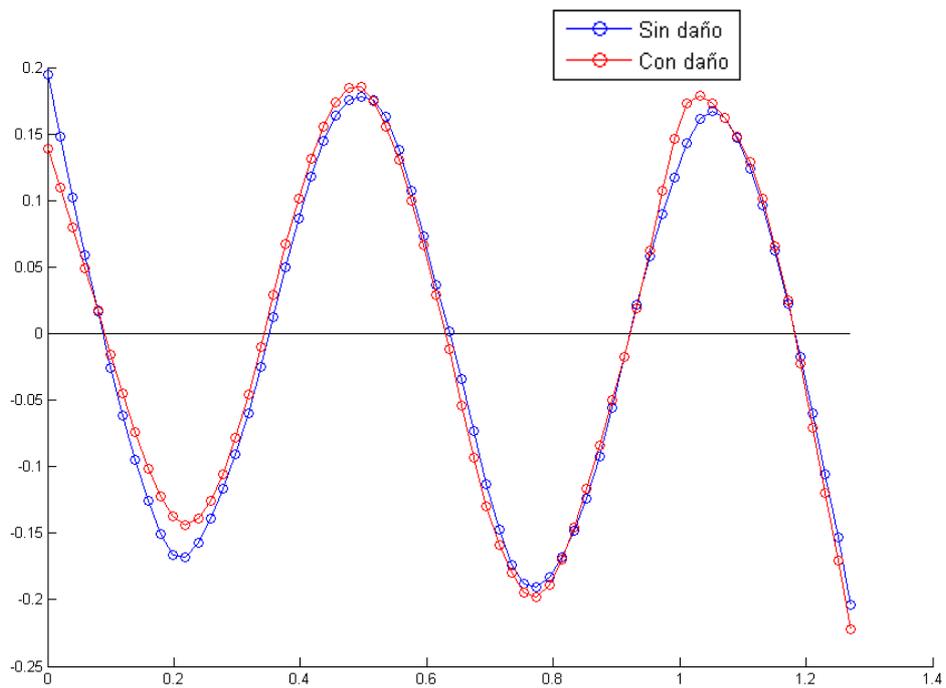


Figura 121. Cuarto modo de vibración. Modelo suavizado. Daño 0.25L máx.

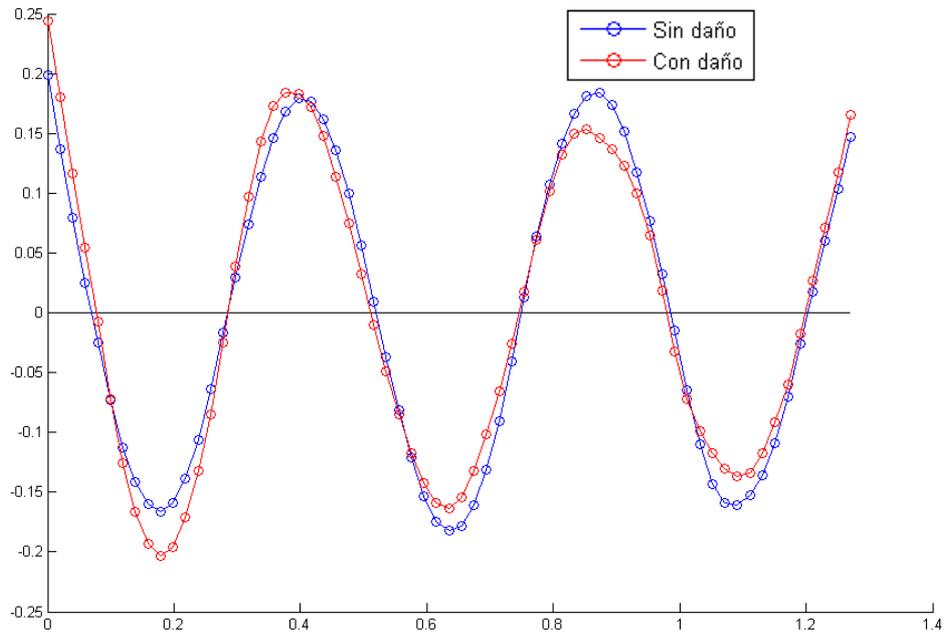


Figura 122. Quinto modo de vibración. Modelo suavizado. Daño 0.25L máx.

Las variaciones que sufren los modos a 0.25L, nos indica la presencia de daño en esta posición.

### Variación de la matriz de flexibilidad y rigidez

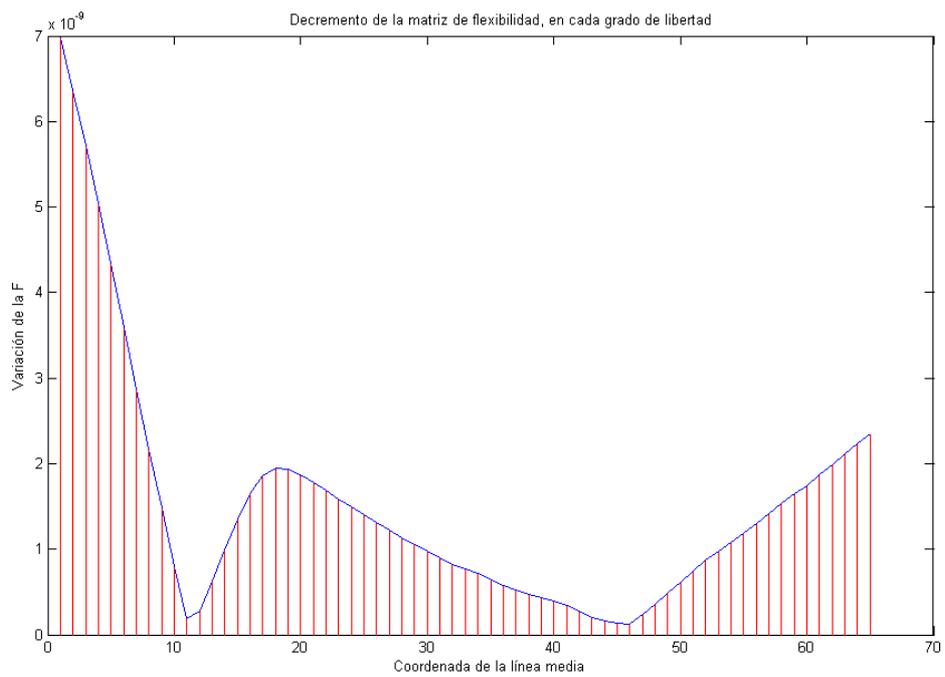


Figura 123. Variación de la matriz de flexibilidad. Modelo suavizado. Daño 0.25L máx.

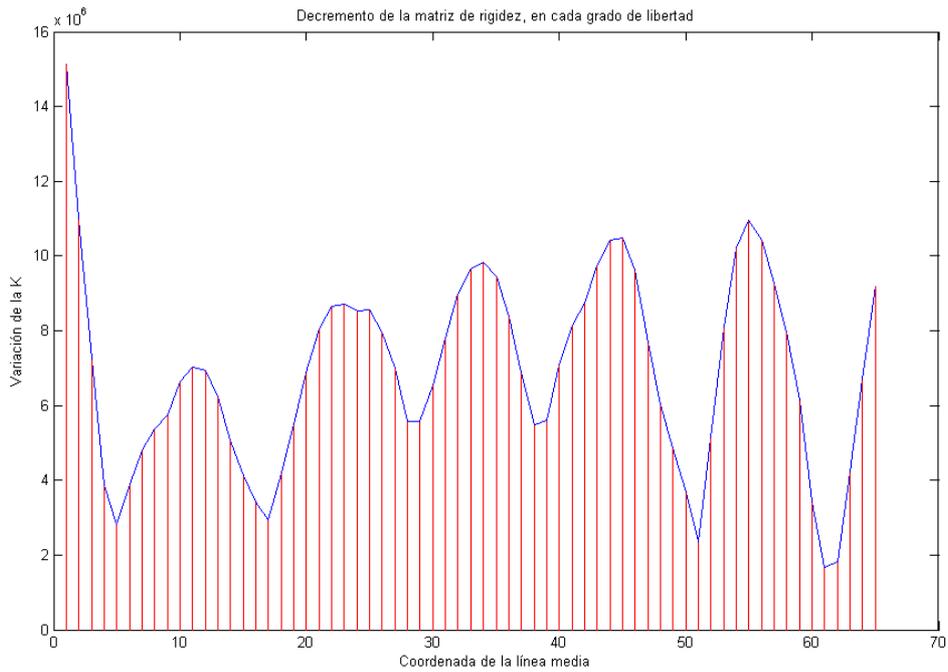


Figura 124. Variación de la matriz de rigidez. Modelo suavizado. Daño 0.25L máx.

Se identifica el fallo usando la matriz de flexibilidad.

Método de Stubbs

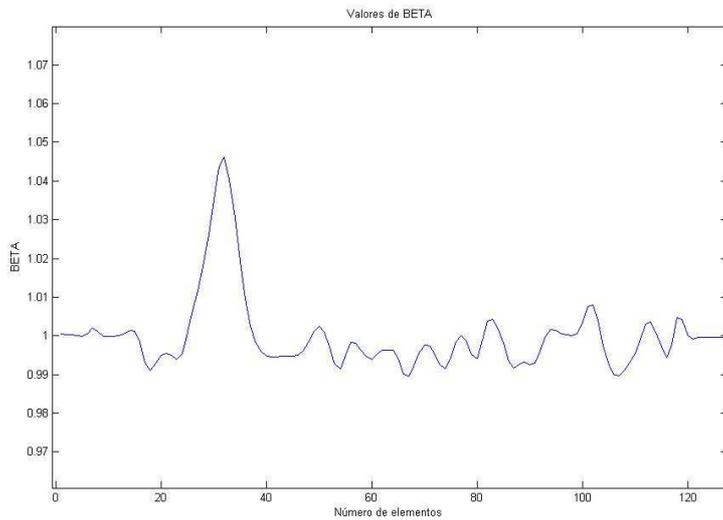


Figura 125. Parámetro  $\beta_p$ . Modelo suavizado. Daño 0.25L máx.

El método presente un máximo a 32 cm del borde izquierdo. Sabiendo que la grieta se encuentra a 31.75 cm, el método nos muestra gran precisión.

## Cambio en la curvatura de los modos

Nº de modo de vibración	Variación de curvatura	Posición (cm)
1	7.25	31.50
2	15.18	30.52
3	16.55	30.52
4	36.30	99.43
5	31.70	99.43

Tabla 25. Variación de la curvatura. Modelo suavizado. Daño 0.25L máx.

Para los tres primeros modos de vibración el método funciona.

## MAC

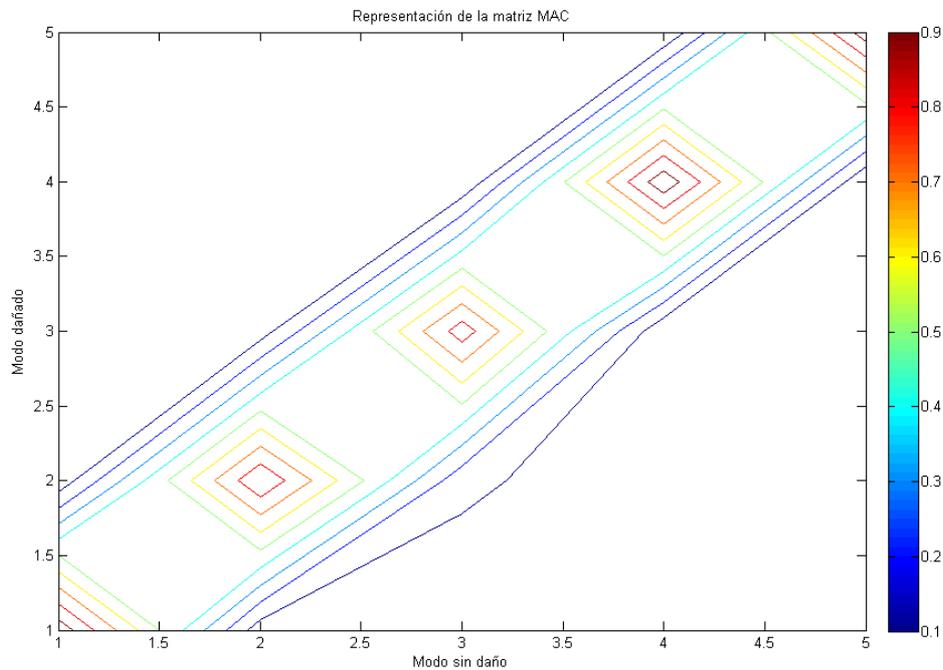
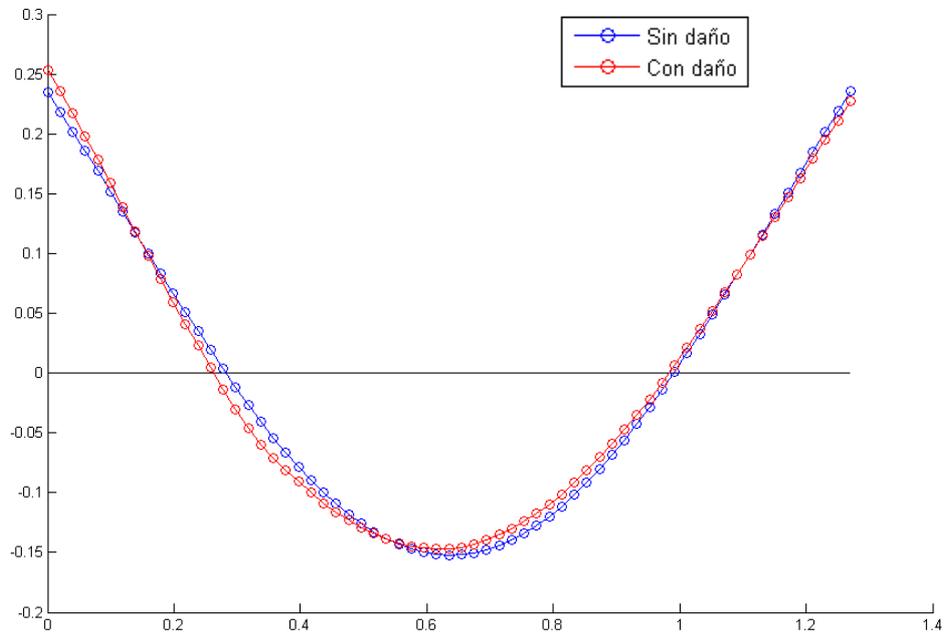


Figura 126. Representación del MAC. Modelo suavizado. Daño 0.25L máx.

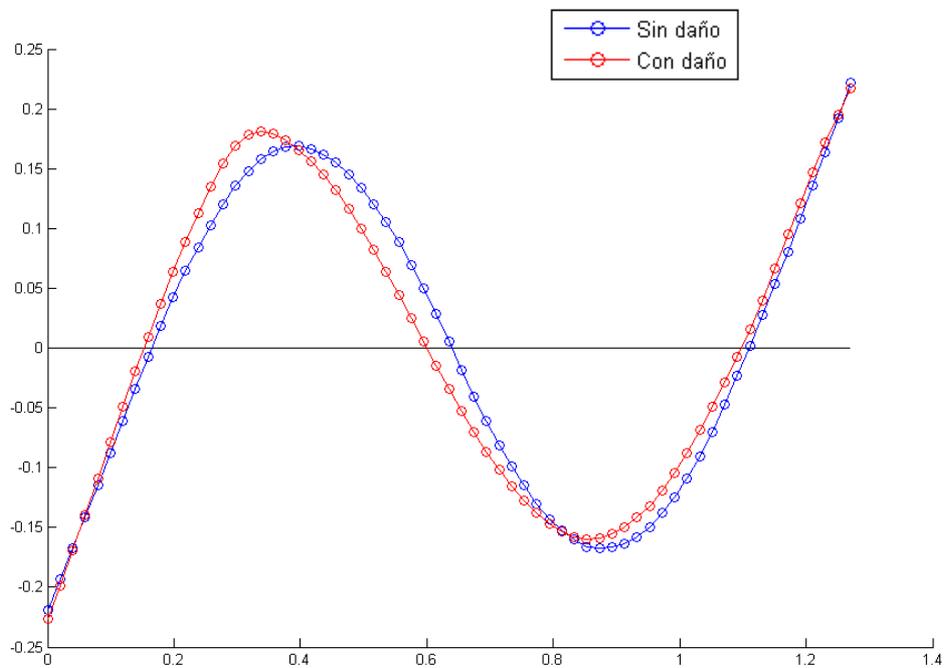
Observando la representación gráfica, el parámetro MAC detecta el daño

- Severidad media

### Variación de modos de vibración



*Figura 127. Primer modo de vibración. Modelo suavizado. Daño 0.25L medio*



*Figura 128. Segundo modo de vibración. Modelo suavizado. Daño 0.25L medio*

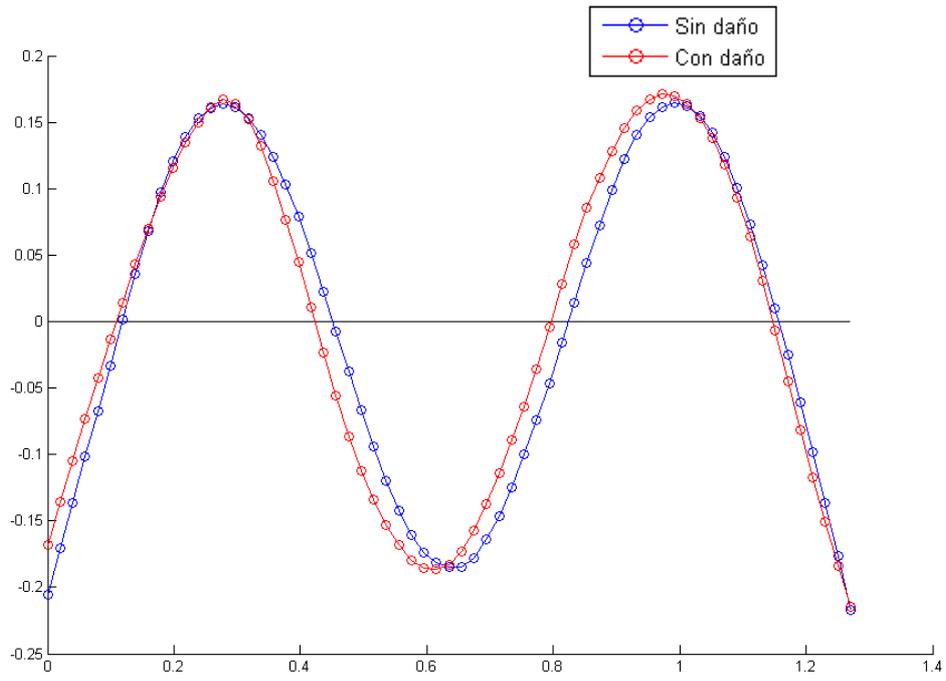


Figura 129. Tercer modo de vibración. Modelo suavizado. Daño 0.25L medio

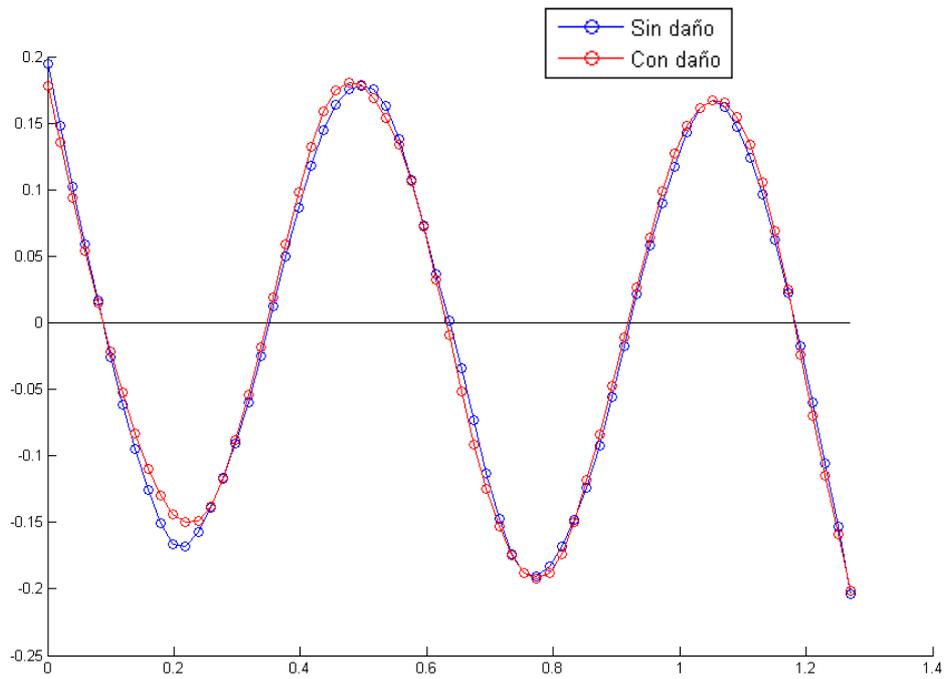


Figura 130. Cuarto modo de vibración. Modelo suavizado. Daño 0.25L medio

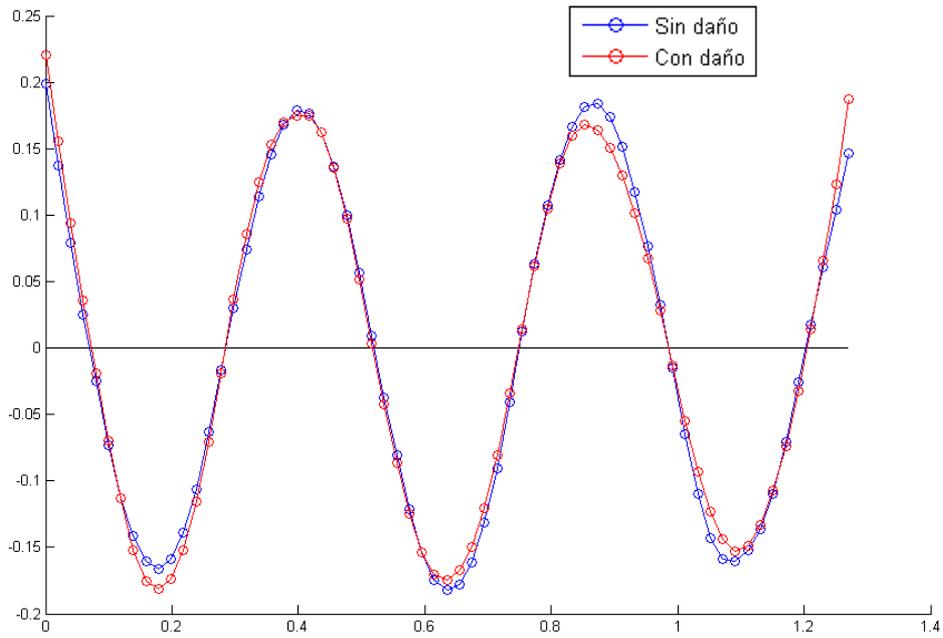


Figura 131. Quinto modo de vibración. Modelo suavizado. Daño 0.25L medio

Al ser la severidad menor que va anterior, la variación que sufren los modos es menor.

### Variación de la matriz de flexibilidad y rigidez

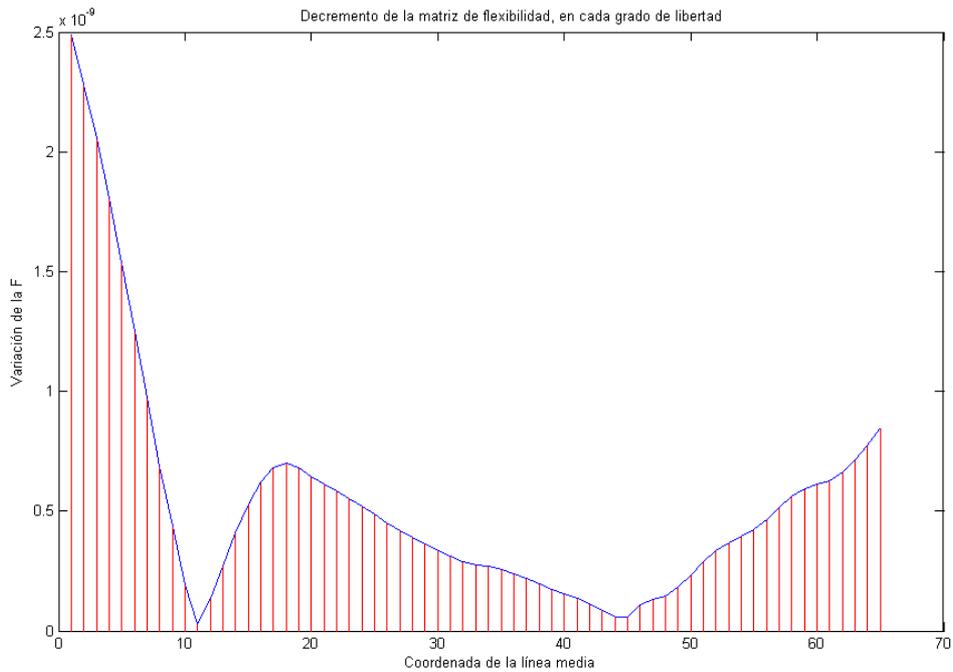


Figura 132. Variación de la matriz de flexibilidad. Modelo suavizado. Daño 0.25L medio

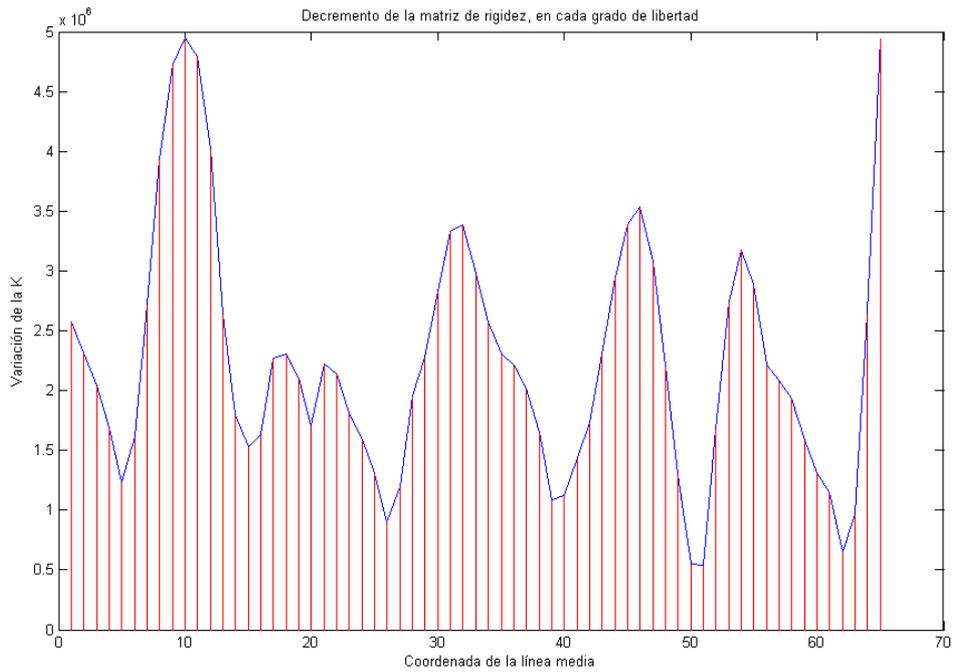


Figura 133. Variación de la matriz de rigidez. Modelo suavizado. Daño 0.25L medio

La variación que experimenta la matriz de flexibilidad nos indica la localización del daño cerca a 0.25L

### Método de Stubbs

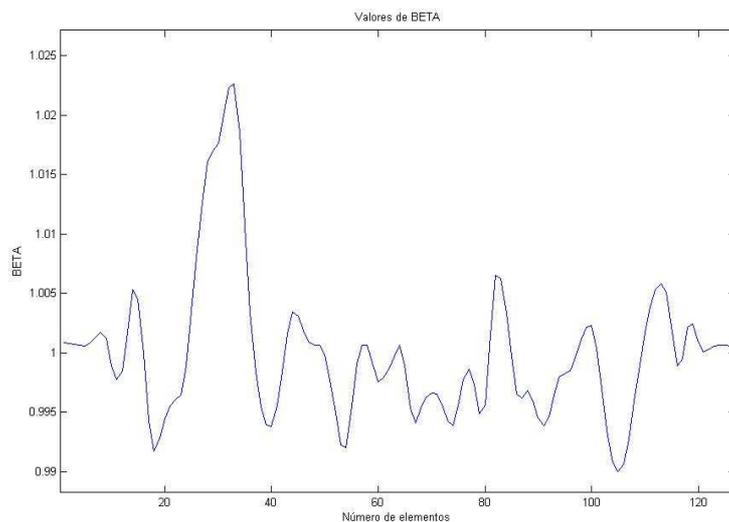


Figura 134. Parámetro  $\beta_p$ . Modelo suavizado. Daño 0.25L medio

El método localiza el fallo en la coordenada 32.98 cm, a poco más de 1 cm de donde se encuentra la grieta practicada a la viga.

## Cambio en la curvatura de los modos

Nº de modo de vibración	Variación de curvatura	Posición (cm)
1	4.24	32.49
2	8.37	27.57
3	10.59	84.67
4	19.38	80.73
5	18.20	30.52

Tabla 26. Variación de la curvatura. Modelo suavizado. Daño 0.25L medio

El primer y quinto modo localiza con precisión el fallo, y con más margen de error hace lo propio el resultado para el segundo modo.

## MAC

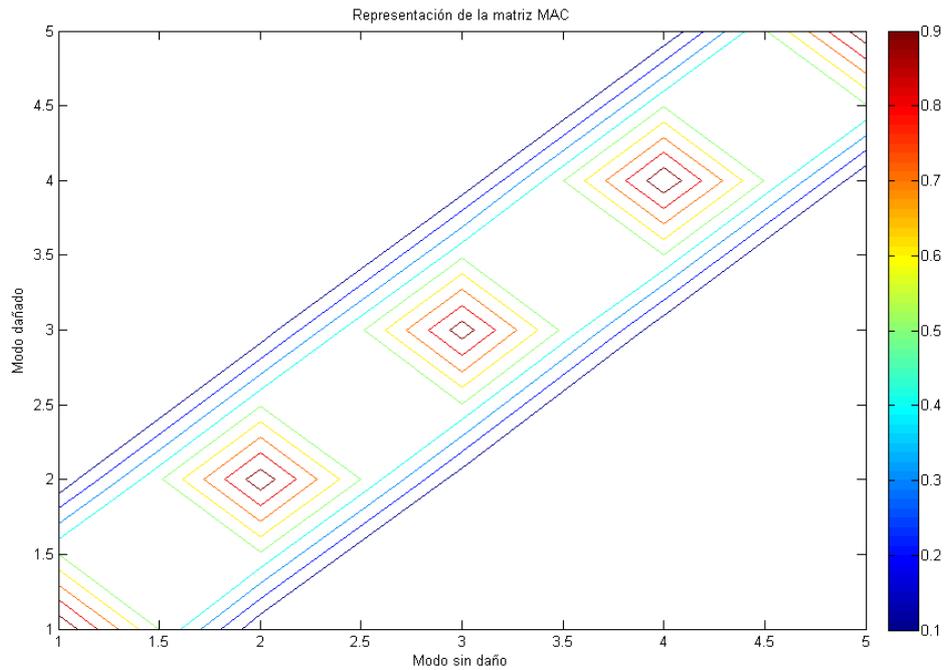


Figura 135. Representación del MAC. Modelo suavizado. Daño 0.25L medio

No se detecta la grieta.

- Severidad leve

### Variación de modos de vibración

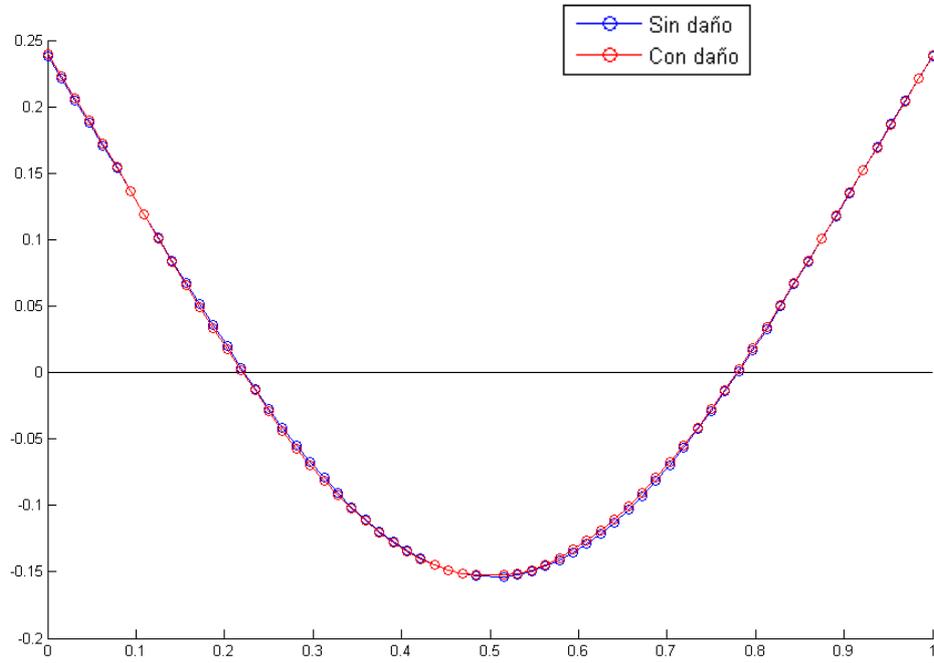


Figura 136. Primer modo de vibración, Modelo suavizado. Daño 0.25L leve

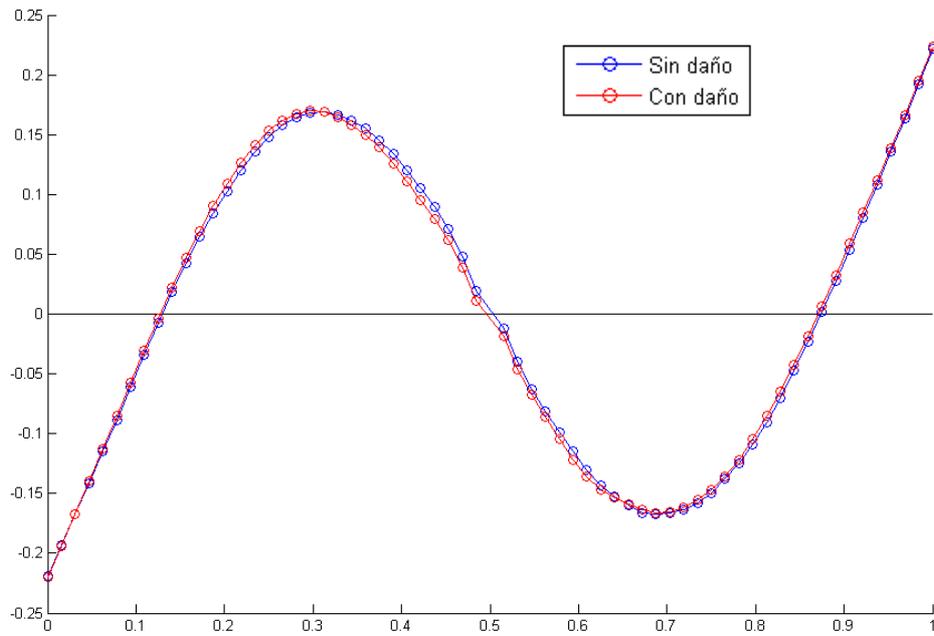


Figura 137. Segundo modo de vibración, Modelo suavizado. Daño 0.25L leve

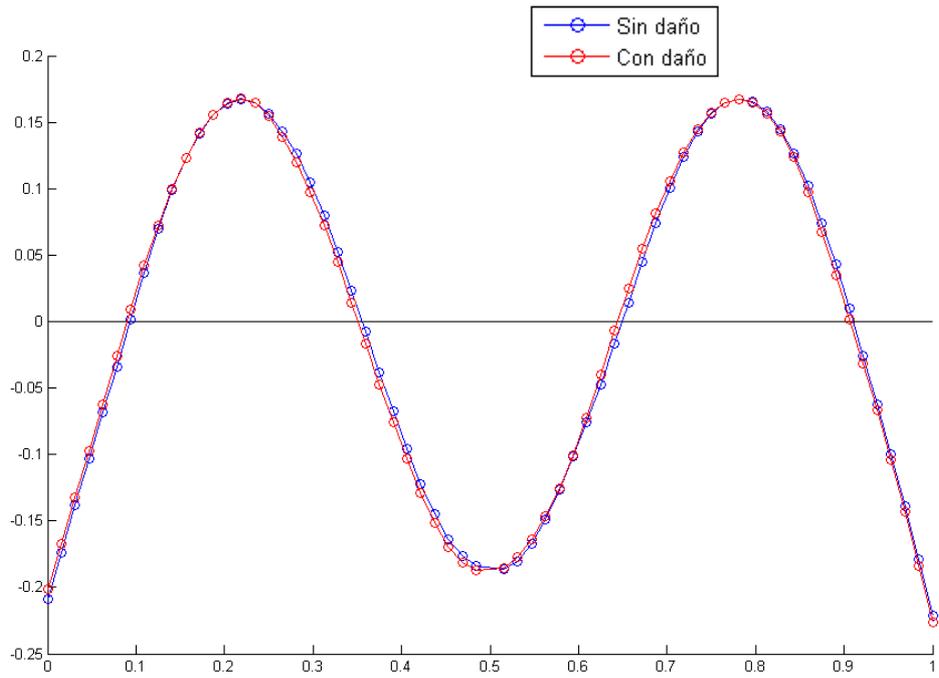


Figura 138. Tercer modo de vibración. Modelo suavizado. Daño 0.25L leve

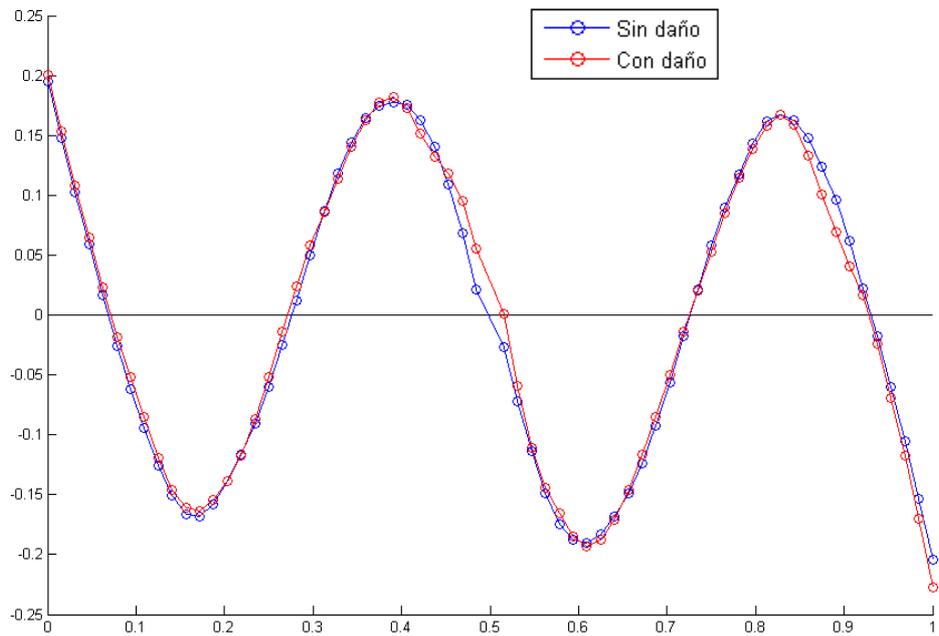


Figura 139. Cuarto modo de vibración. Modelo suavizado. Daño 0.25L leve

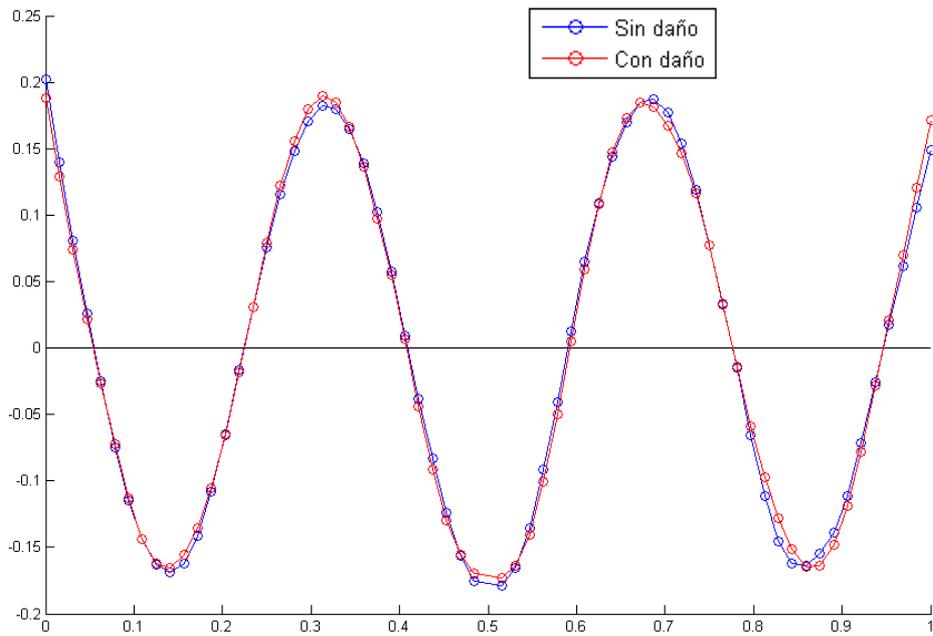


Figura 140. Quinto modo de vibración. Modelo suavizado. Daño 0.25L leve

Para una severidad leve, los modos no experimentan apenas cambios, por lo que no se puede identificar la presencia de la grieta.

### Variación de la matriz de flexibilidad y rigidez

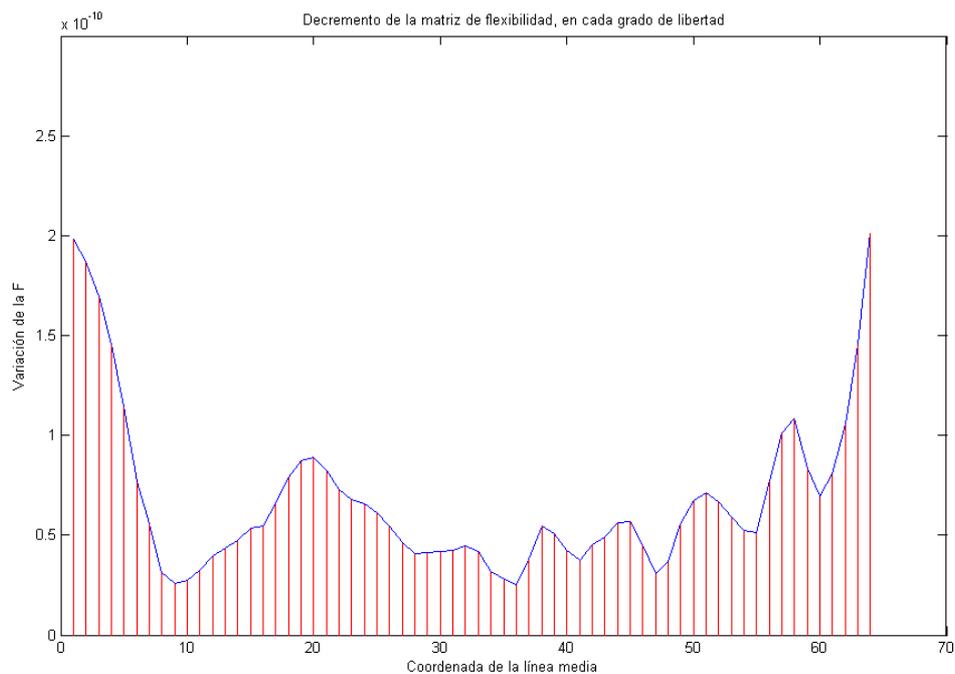


Figura 141. Variación de la matriz de flexibilidad. Modelo suavizado. Daño 0.25L leve

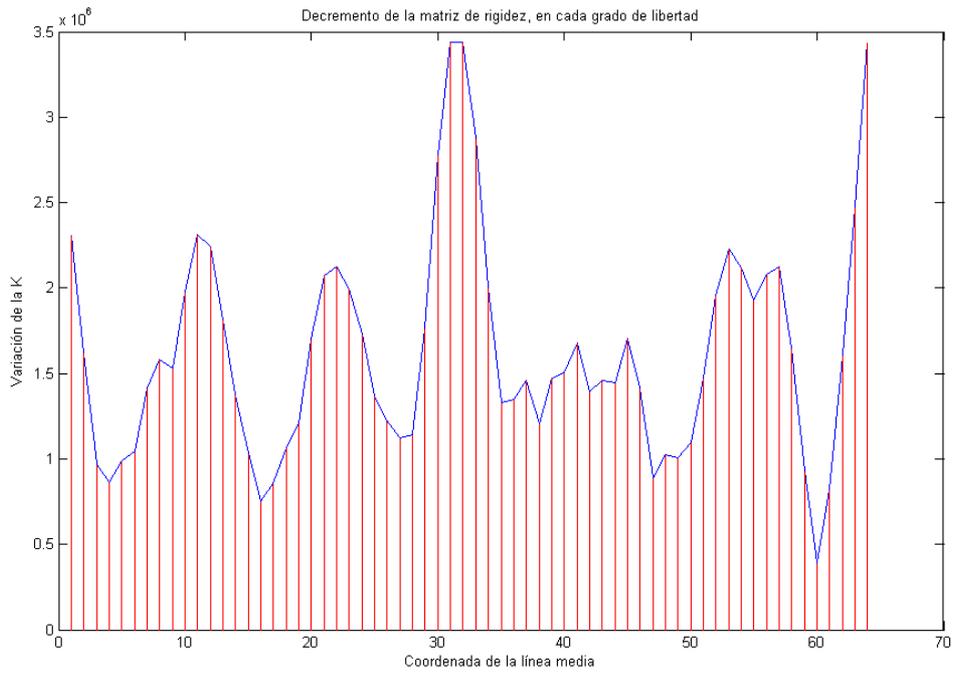


Figura 142. Variación de la matriz de rigidez. Modelo suavizado. Daño 0.25L leve

Ninguna de las matrices ofrece buenas soluciones.

### Método de Stubbs

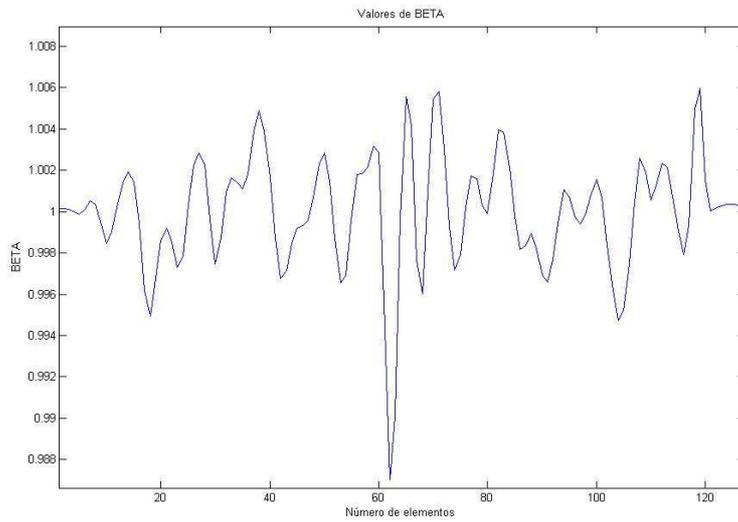


Figura 143. Parámetro  $\beta_p$ . Modelo suavizado. Daño 0.25L leve

El método falla para esta severidad.

## Cambio en la curvatura de los modos

Nº de modo de vibración	Variación de curvatura	Posición (cm)
1	2.67	28.68
2	11.10	58.91
3	10.13	58.91
4	77.11	91.47
5	34.60	86.82

Tabla 27. Variación de la curvatura. Modelo suavizado. Daño 0.25L leve

El método da unos resultados pobres. Solo para el primer modo da una solución aproximada, con una diferencia de 3 cm aproximadamente.

## MAC

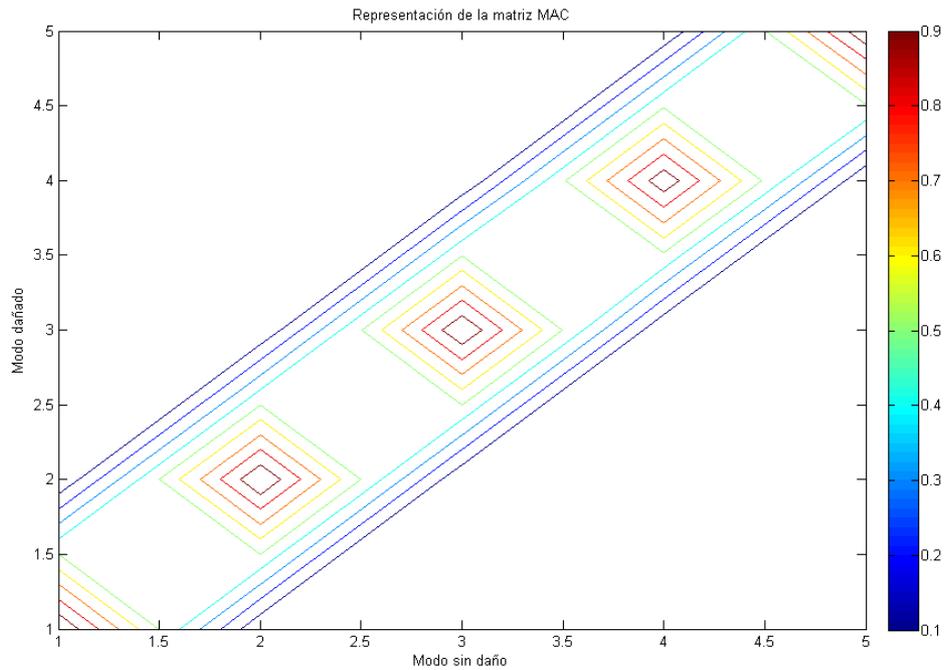


Figura 144. Representación del MAC. Modelo suavizado. Daño 0.25L leve

No se detecta el fallo.

### 4.1.7.1.3. Daño borde

#### Variación de modos de vibración

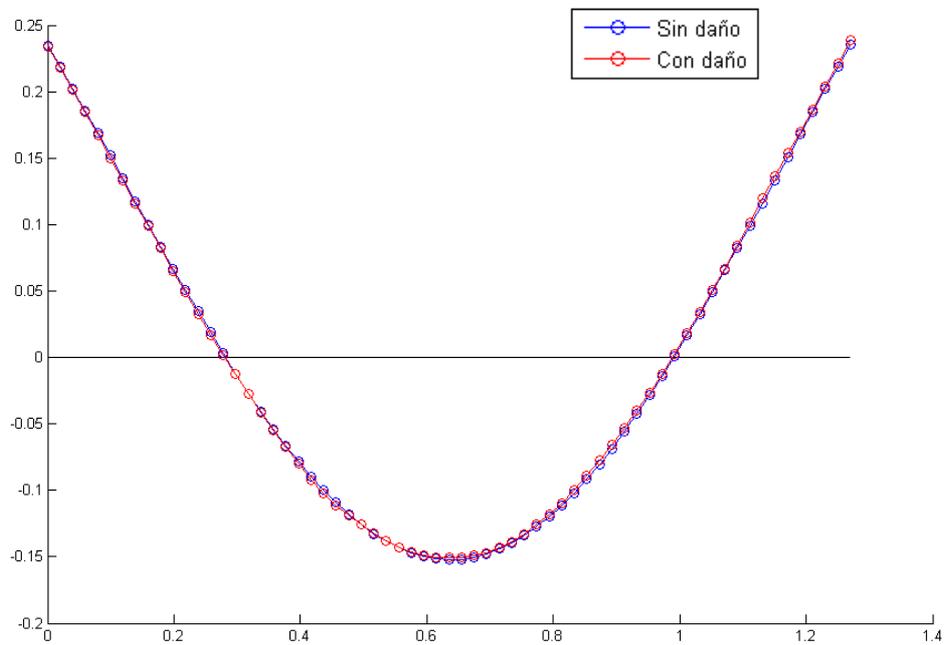


Figura 145. Primer modo de vibración. Modelo suavizado. Daño borde

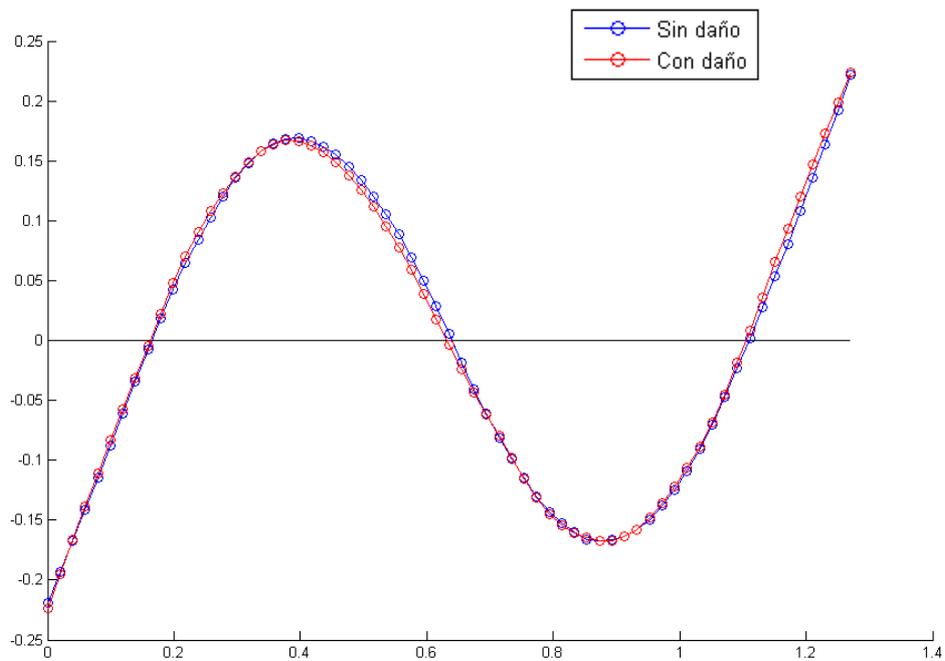


Figura 146. Segundo modo de vibración. Modelo suavizado. Daño borde

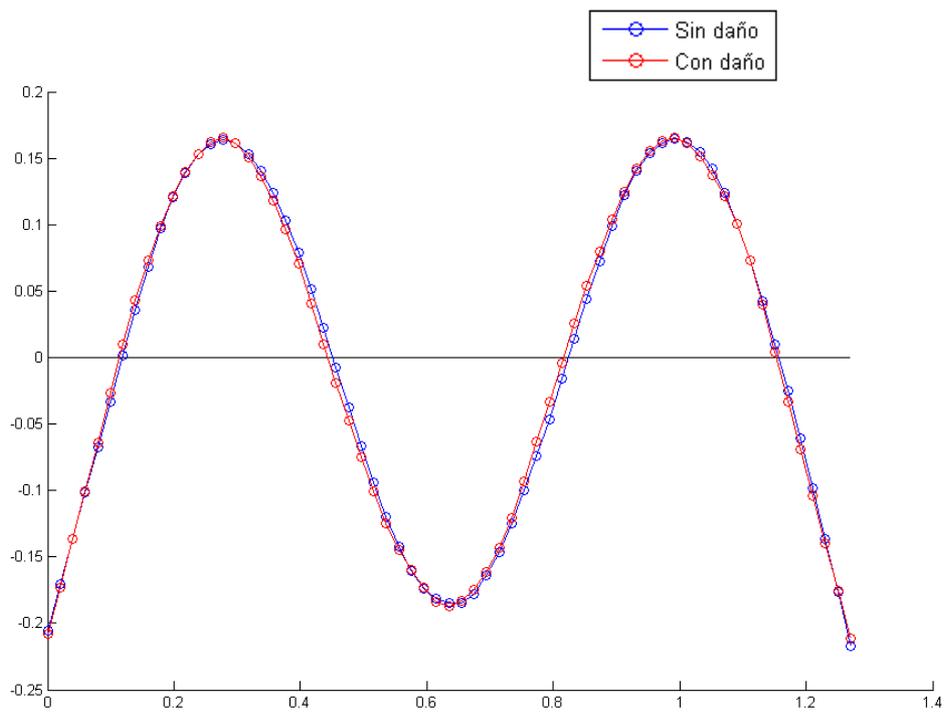


Figura 147. Tercer modo de vibración. Modelo suavizado. Daño borde

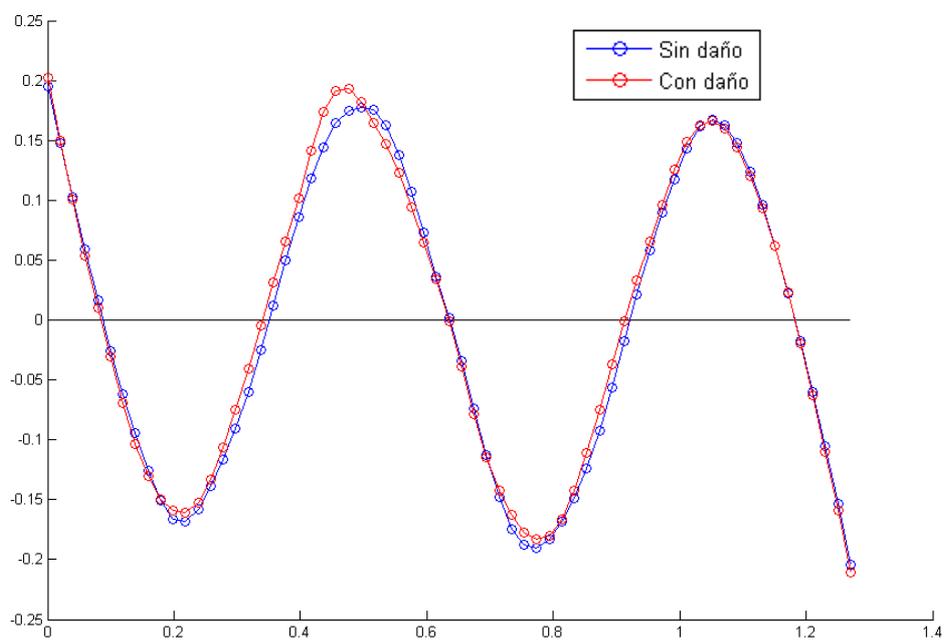


Figura 148. Cuarto modo de vibración. Modelo suavizado. Daño borde

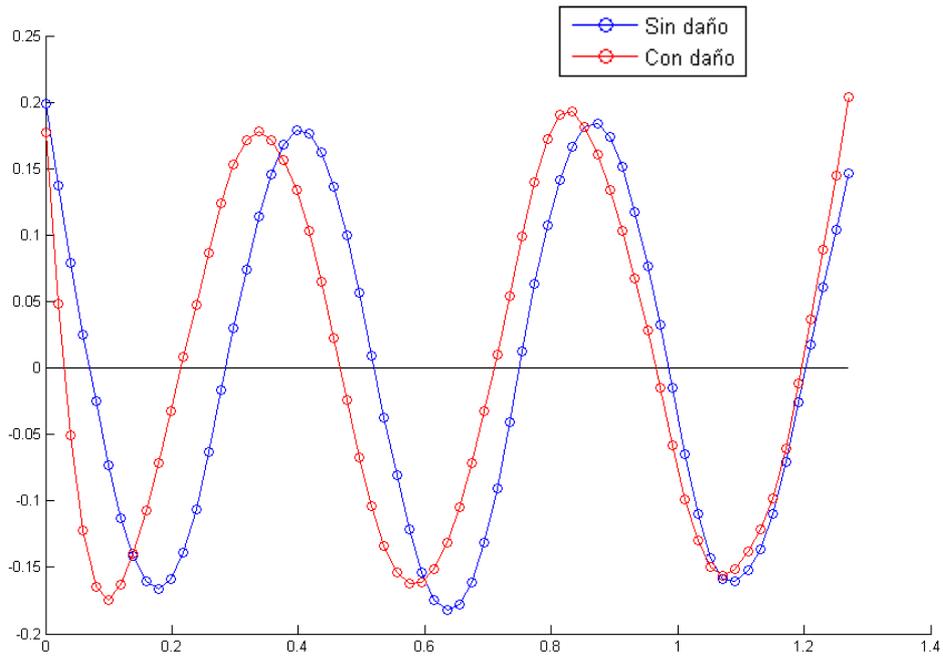


Figura 149. Quinto modo de vibración. Modelo suavizado. Daño borde

Las variaciones en el cuarto y quinto modo nos indica la presencia del daño.

### Variación de la matriz de flexibilidad y rigidez

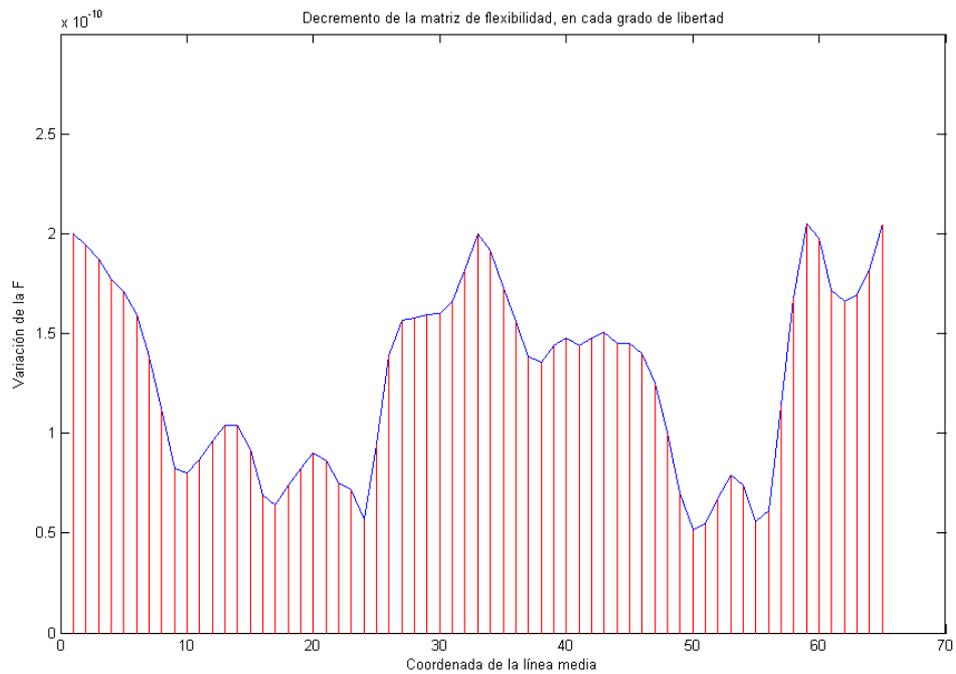


Figura 150. Variación de la matriz de flexibilidad. Modelo suavizado. Daño borde



Figura 151. Variación de la matriz de rigidez. Modelo suavizado. Daño borde

No funciona para un daño en el extremo.

### Método de Stubbs

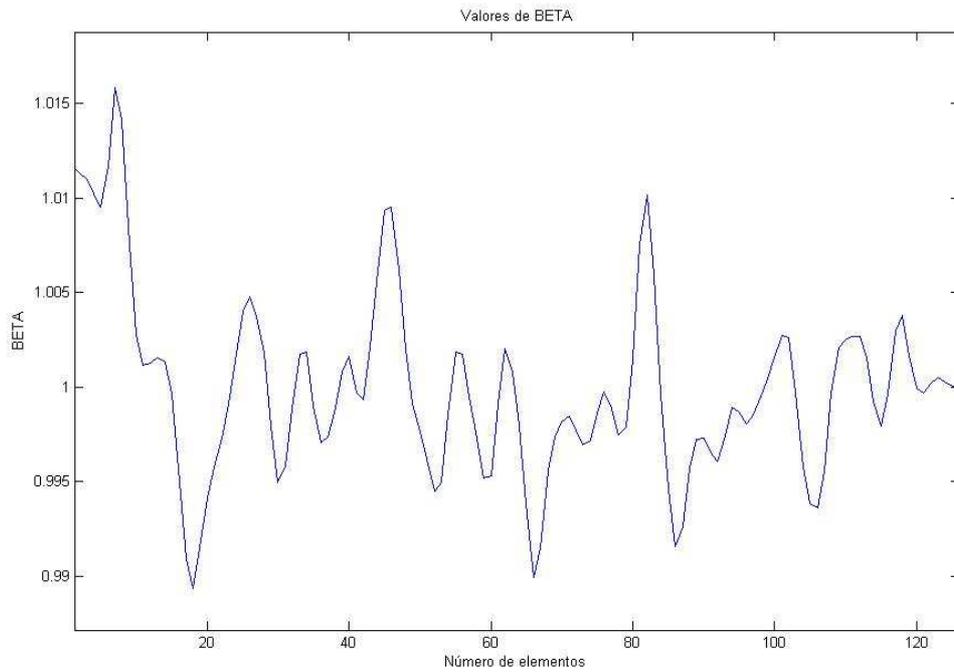


Figura 152. Parámetro  $\beta_p$ . Modelo suavizado. Daño borde

Nos localiza el fallo en la coordenada 7.38 cm, es decir, próxima al borde.

### Cambio en la curvatura de los modos

Nº de modo de vibración	Variación de curvatura	Posición (cm)
1	2.41	44.30
2	5.36	80.73
3	12.01	61.04
4	22.73	43.32
5	89.15	6.89

Tabla 28. Variación de la curvatura. Modelo suavizado. Daño borde

El método nos da muy malos resultados en esta ocasión.

### MAC

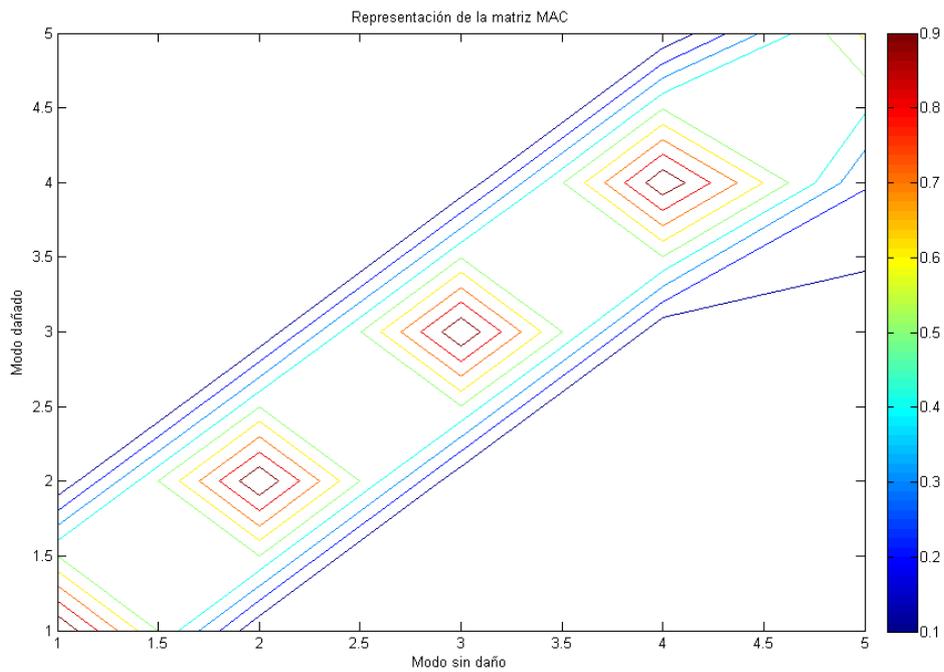


Figura 153. Representación del MAC. Modelo suavizado. Daño borde

Se identifica la grieta como se puede observar en el cambio de la geometría.

### 4.1.7.2. Resultados sobre modos numéricos

Mostramos los resultados obtenidos al aplicar DIBEMA sobre el modelo de elementos finitos. En este modelo la viga se modela con elementos *shell* y se simula la grieta como una discontinuidad. Estos resultados numéricos fueron obtenidos por Mario Algaba en su trabajo de investigación de postgrado en la Universidad de Sevilla [8].

Todas las estructuras, incluida la viga sin daño, pertenecen al modelo numérico en el que se obtuvieron 128 puntos para cada modo de vibración. Los resultados deben de ser parecidos a los experimentales.

#### 4.1.7.2.1. Daño 0.5 L

- Severidad máxima

#### Variación de frecuencias naturales

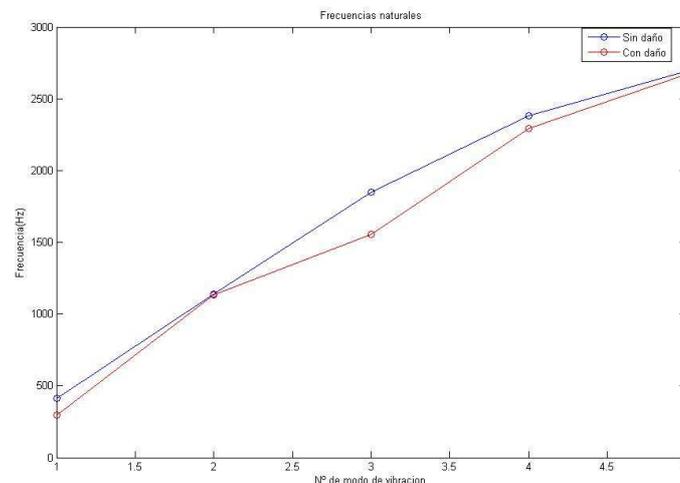


Figura 154. Variación de las frecuencias naturales. Modelo numérico suavizado. Daño 0.5L máx.

Se observa la variación que existe, principalmente en la tercera frecuencia natural.

## Variación de modos de vibración

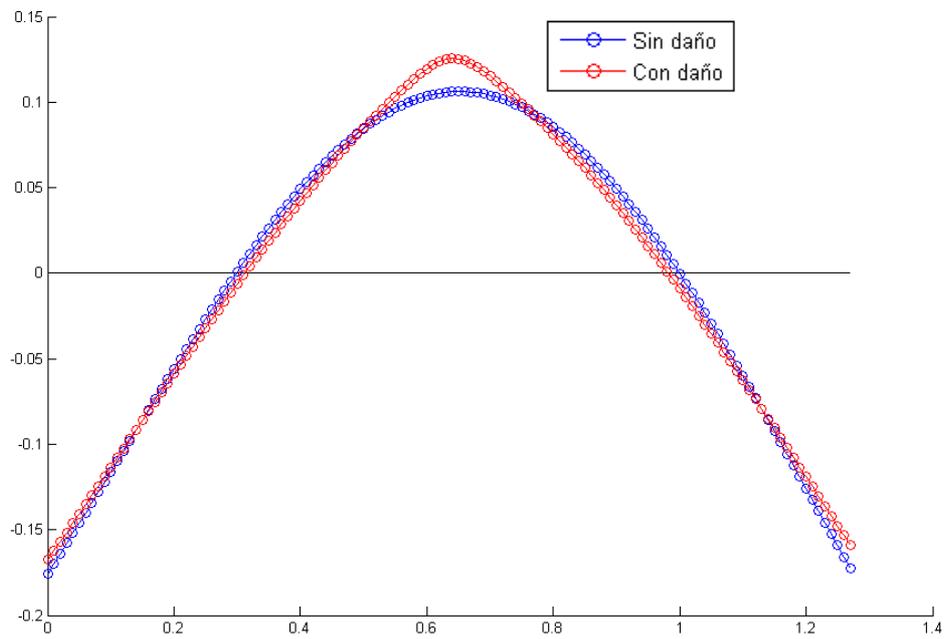


Figura 155. Primer modo de vibración, Modelo numérico suavizado. Daño 0.5L máx.

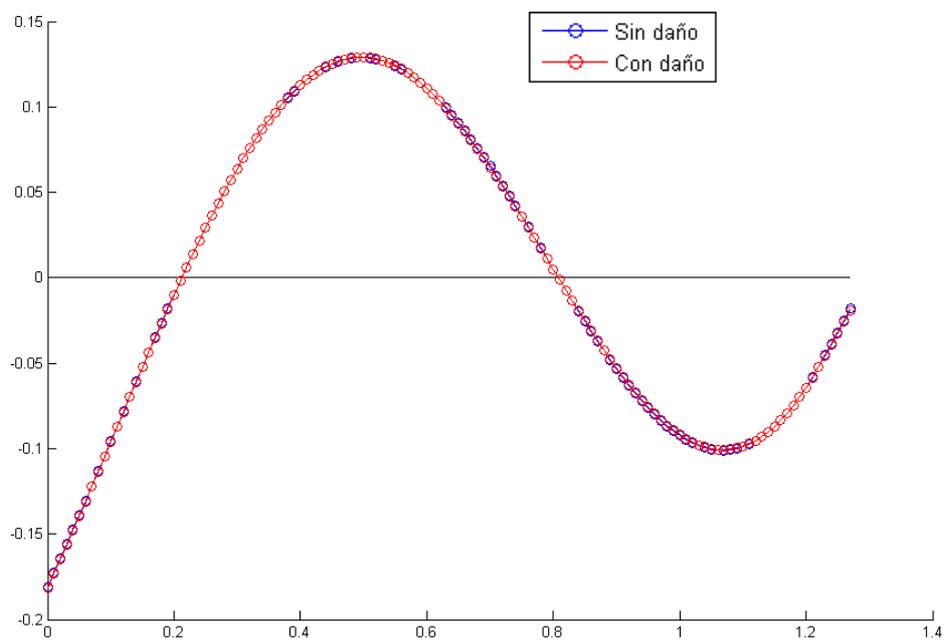


Figura 156. Segundo modo de vibración, Modelo numérico suavizado. Daño 0.5L máx.

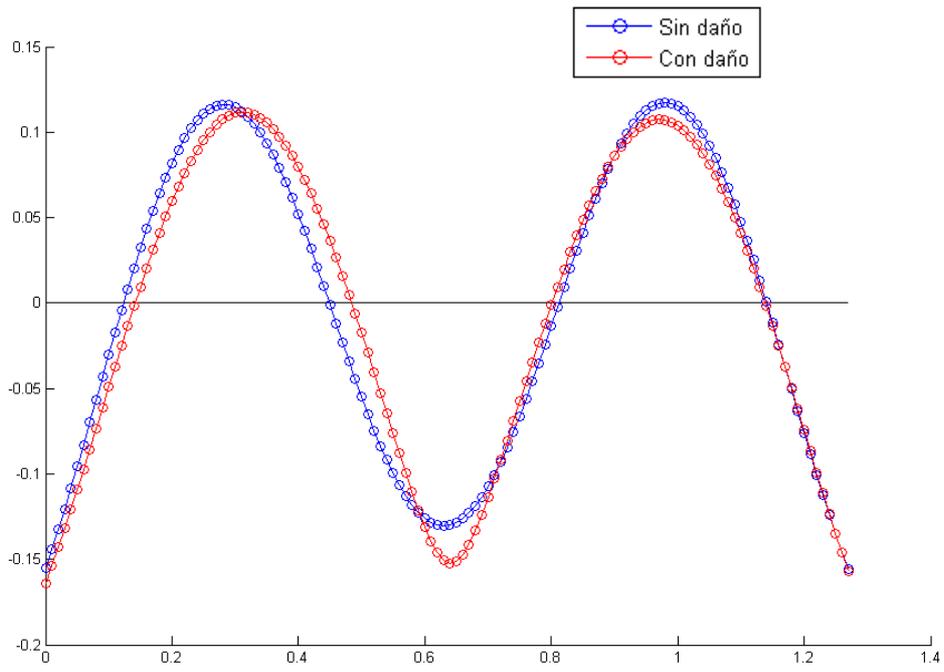


Figura 157. Tercer modo de vibración. Modelo numérico suavizado. Daño 0.5L máx.

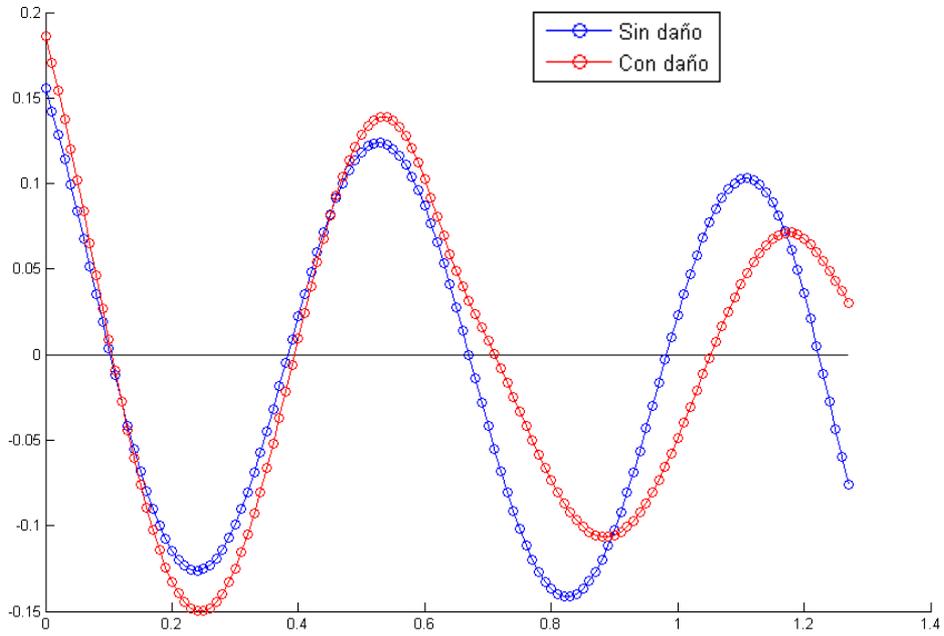


Figura 158. Cuarto modo de vibración. Modelo numérico suavizado. Daño 0.5L máx.

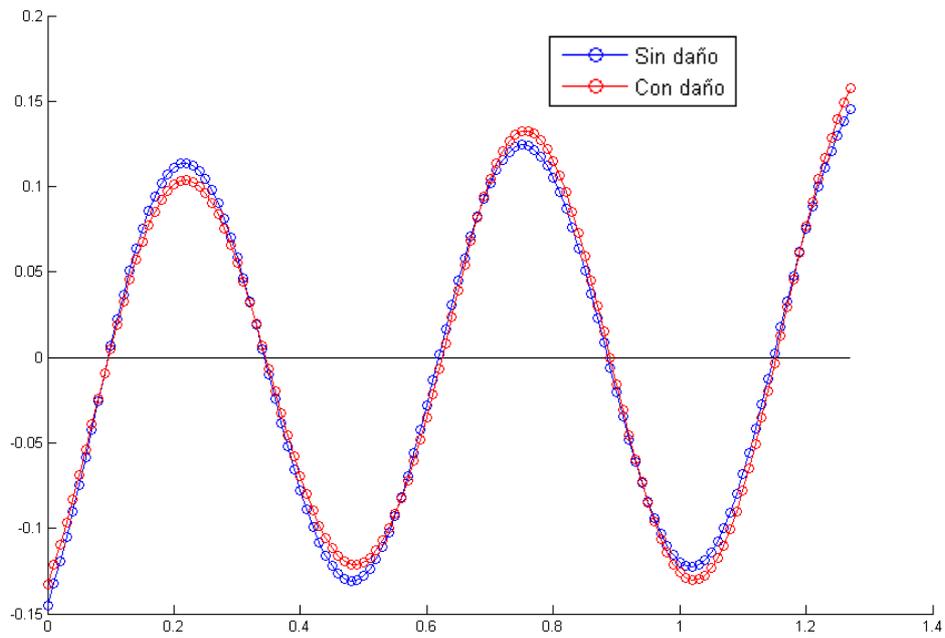


Figura 159. Quinto modo de vibración. Modelo numérico suavizado. Daño 0.5L máx.

Se observa la variación que existe en la sección intermedia en aquellos modos donde no exista un nodo en esta posición.

### Variación de la matriz de flexibilidad y rigidez

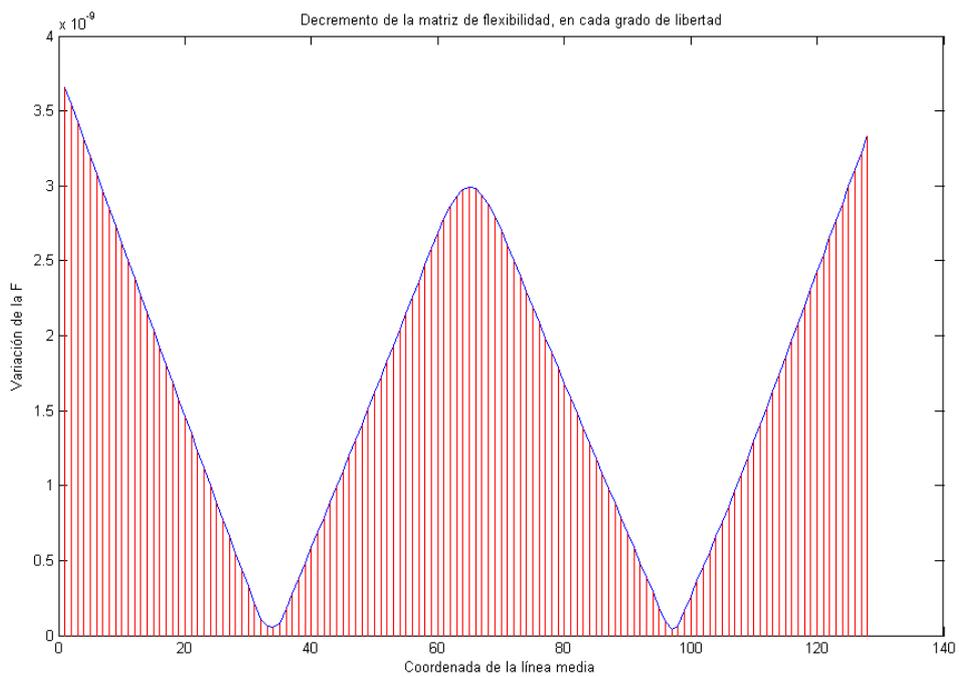


Figura 160. Variación de la matriz de flexibilidad. Modelo numérico suavizado. Daño 0.5L máx.

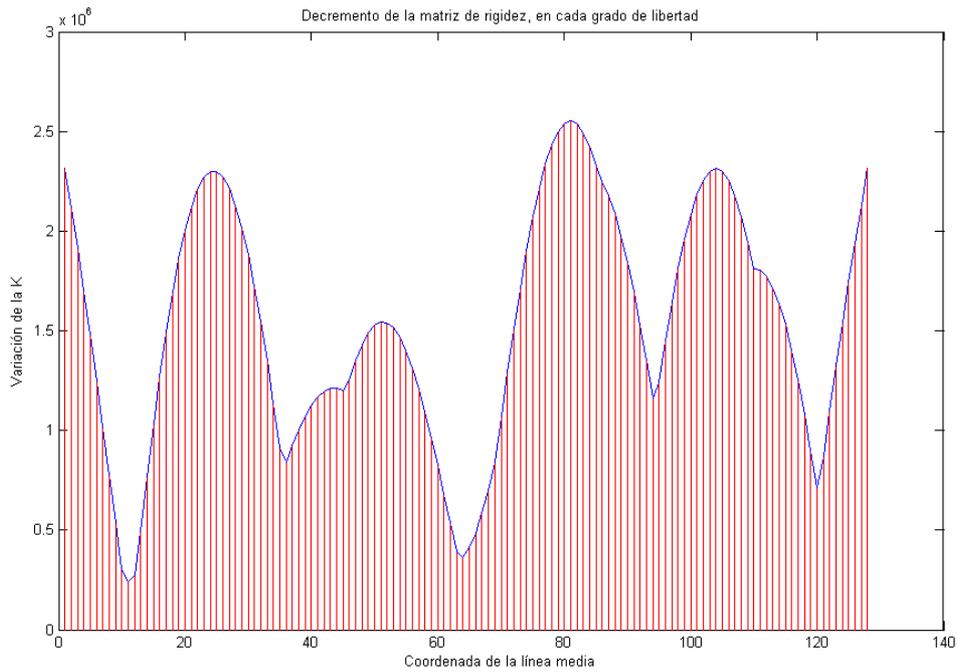


Figura 161. Variación de la matriz de rigidez. Modelo numérico suavizado. Daño 0.5L máx.

La primera gráfica nos muestra claramente la posición de la grieta en el centro, mientras que la matriz de rigidez no nos aporta información útil.

### Método de Stubbs

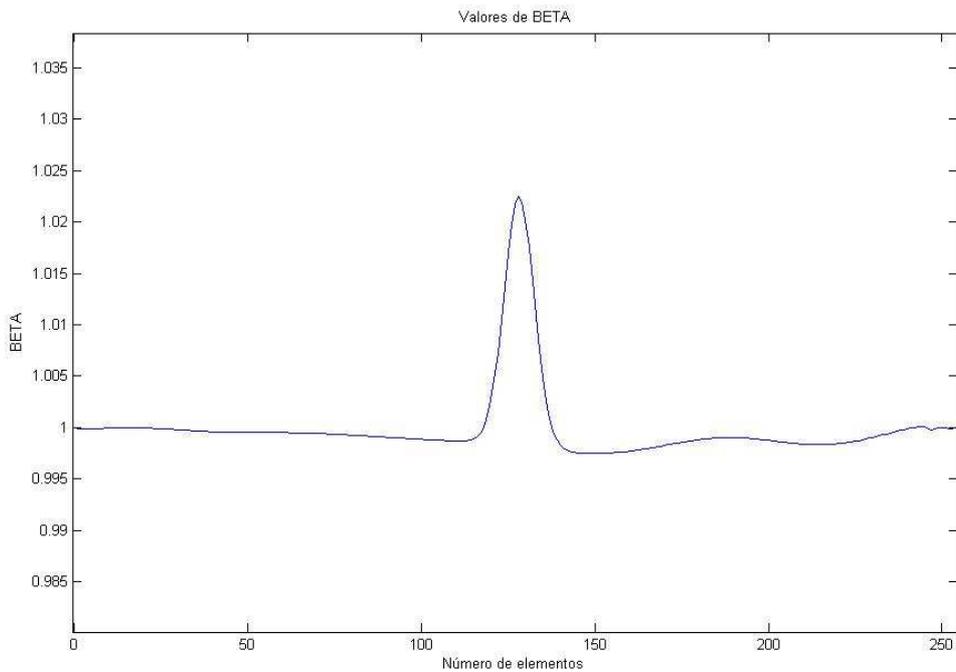


Figura 162. Parámetro  $\beta_p$ . Modelo numérico suavizado. Daño 0.5L máx.

La grieta se encuentra realmente en la posición 63.50 cm. Este método nos propone la localización de 64 cm. Muy próximo a donde se encuentra.

Cambio en la curvatura de los modos

Nº de modo de vibración	Variación de curvatura	Posición (cm)
1	6.11	63.75
2	0.31	59.76
3	18.45	63.75
4	6.24	96.12
5	5.81	61.26

Tabla 29. Variación de la curvatura. Modelo numérico suavizado. Daño 0.5L máx.

Exceptuando el 4º modo, los demás dan una buena precisión sobre la localización del daño.

MAC

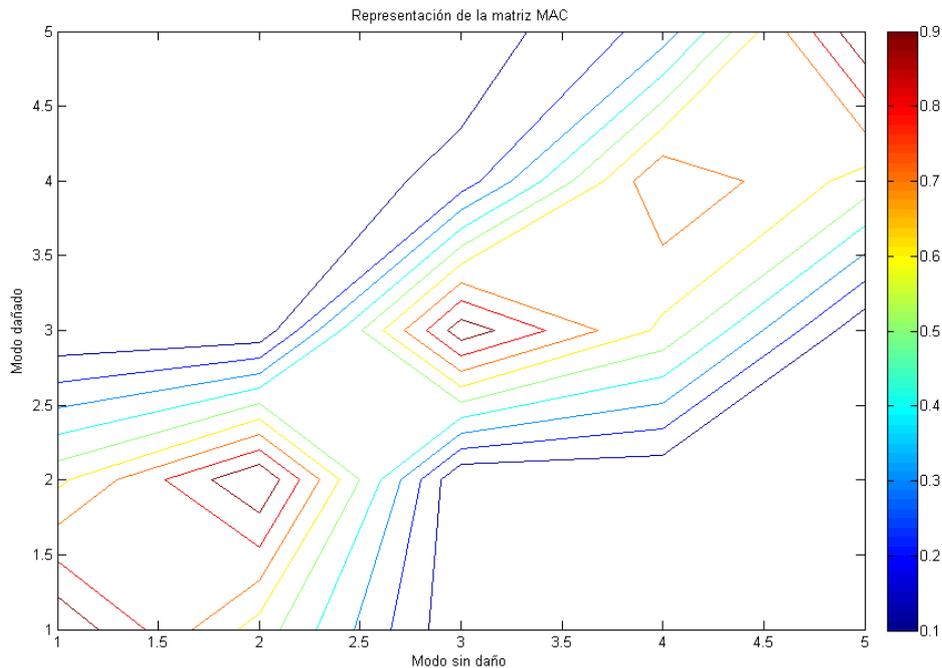


Figura 163. Representación del MAC. Modelo numérico suavizado. Daño 0.5L máx.

Observamos como el MAC no es una matriz de banda, es decir, existe términos en su diagonal que no son próximos a la unidad, por lo que nos informa de que existe un fallo en la estructura.

- Severidad media

### Variación de frecuencias naturales

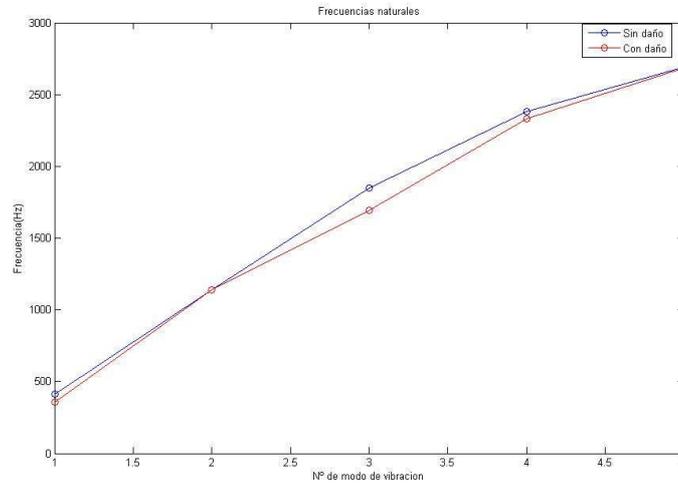


Figura 164. Variación de las frecuencias naturales. Modelo numérico suavizado. Daño 0.5L medio

### Variación de modos de vibración

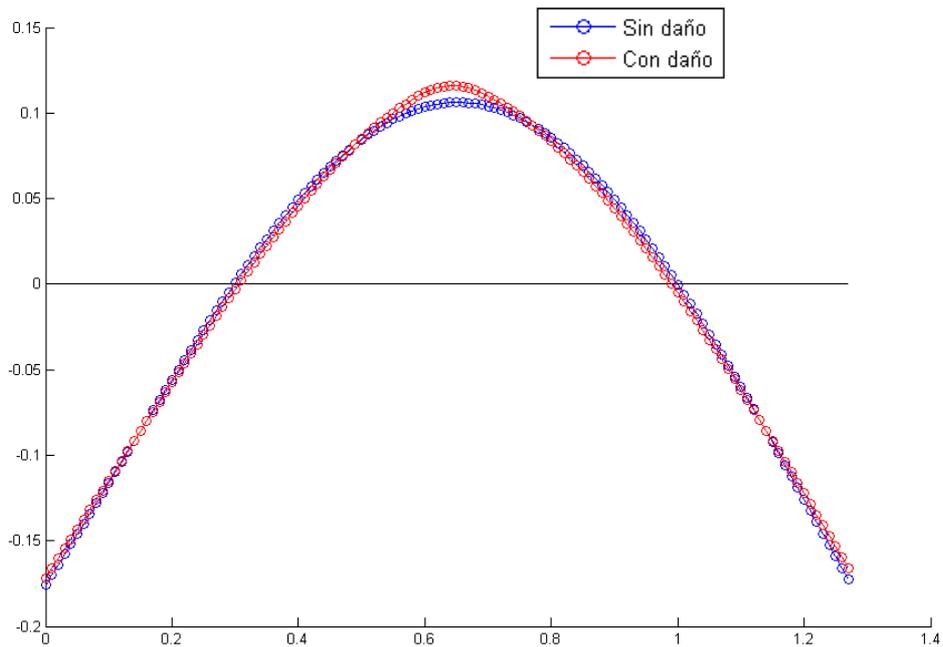


Figura 165. Primer modo de vibración. Modelo numérico suavizado. Daño 0.5L medio

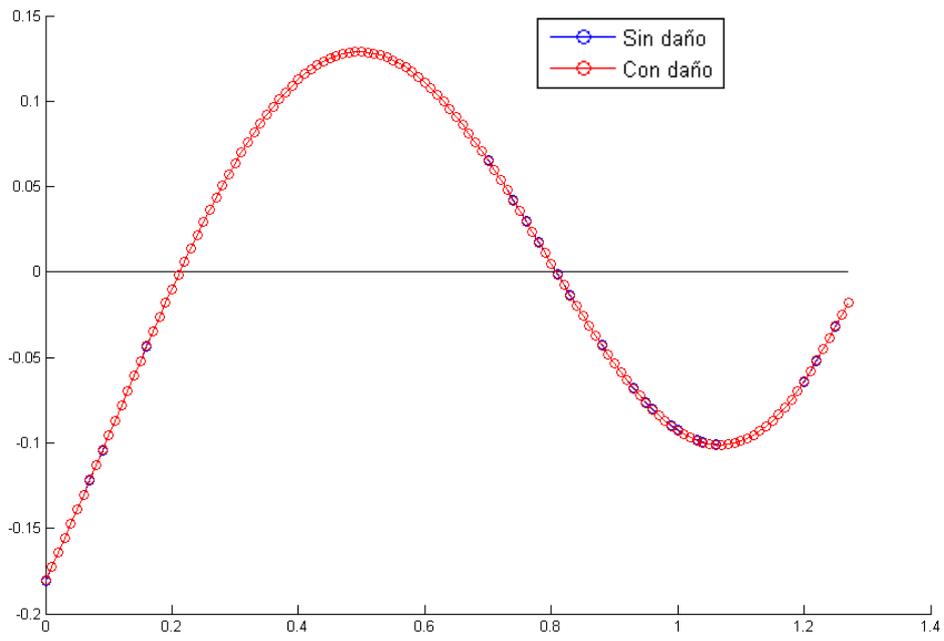


Figura 166. Segundo modo de vibración. Modelo numérico suavizado. Daño 0.5L medio

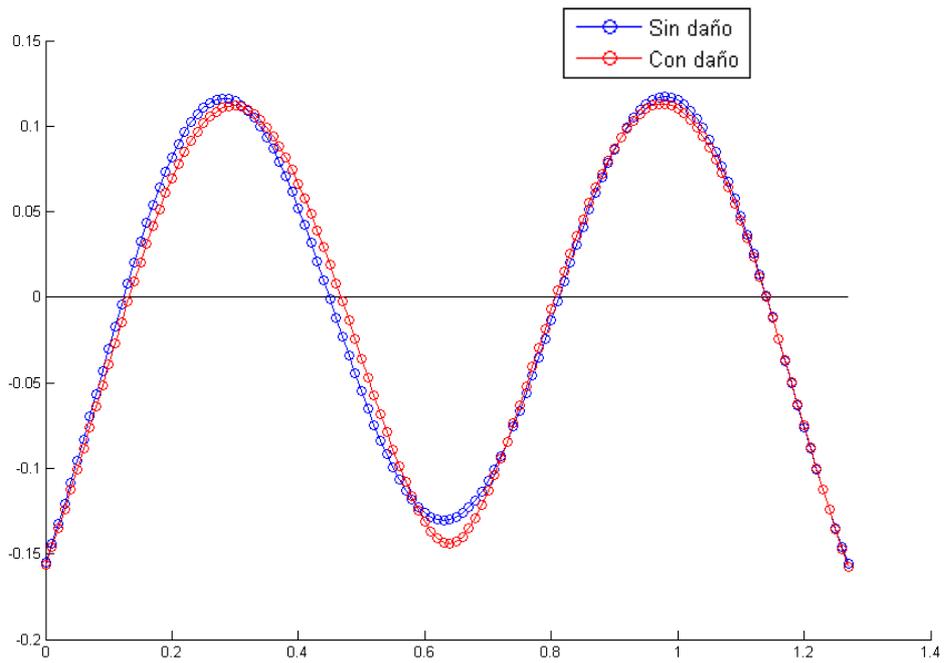


Figura 167. Tercer modo de vibración. Modelo numérico suavizado. Daño 0.5L medio

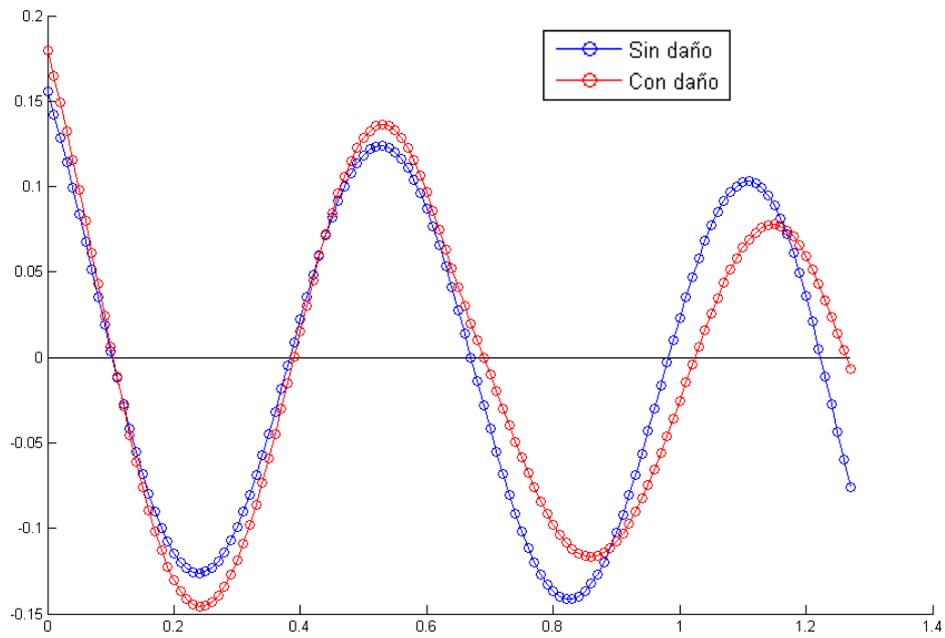


Figura 168. Cuarto modo de vibración. Modelo numérico suavizado. Daño 0.5L medio

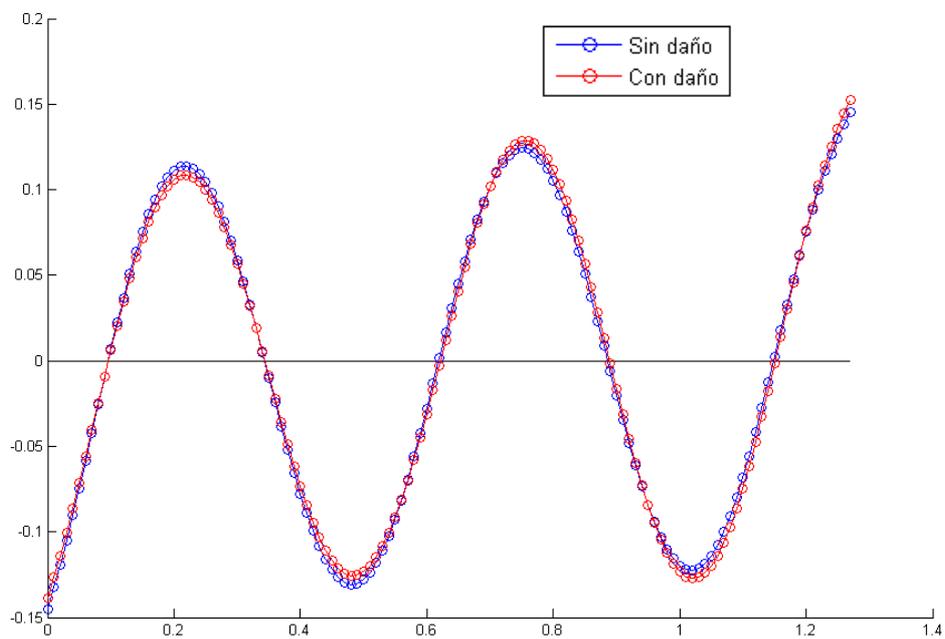


Figura 169. Quinto modo de vibración. Modelo numérico suavizado. Daño 0.5L medio

Los cambios que existen en el centro del primer y tercer modo nos informan de la presencia del fallo en esta posición.

## Variación de la matriz de flexibilidad y rigidez

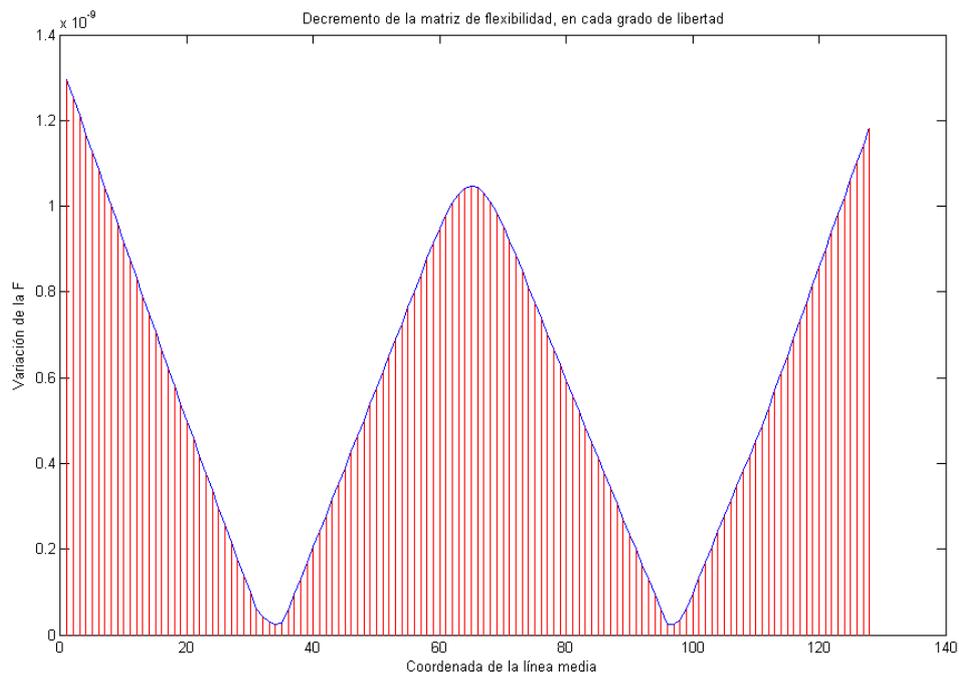


Figura 170. Variación de la matriz de flexibilidad. Modelo numérico suavizado. Daño 0.5L medio

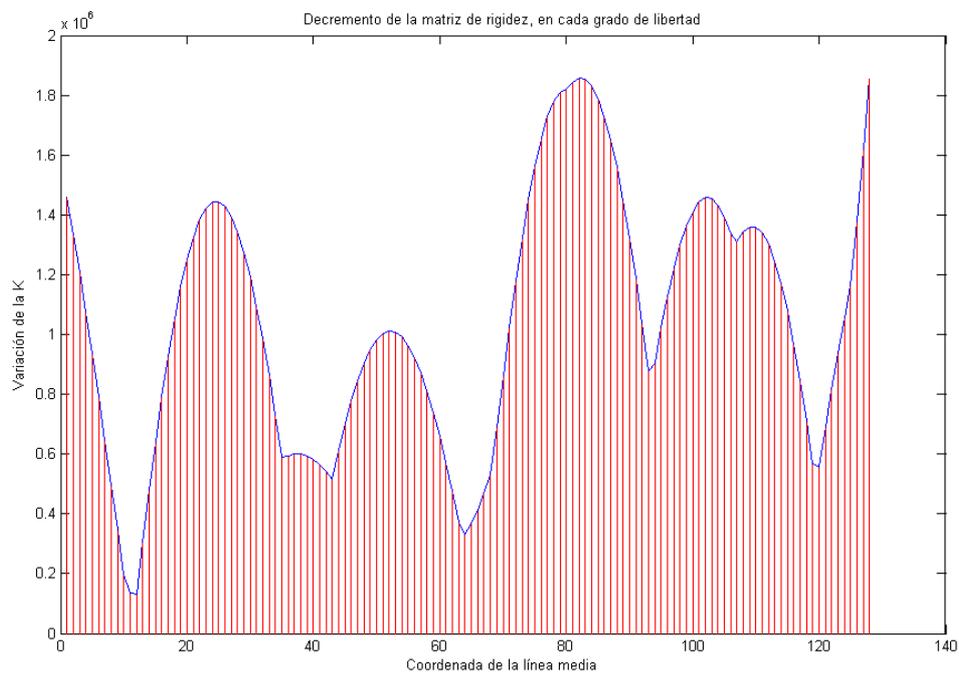


Figura 171. Variación de la matriz de rigidez. Modelo numérico suavizado. Daño 0.5L medio

## Método de Stubbs

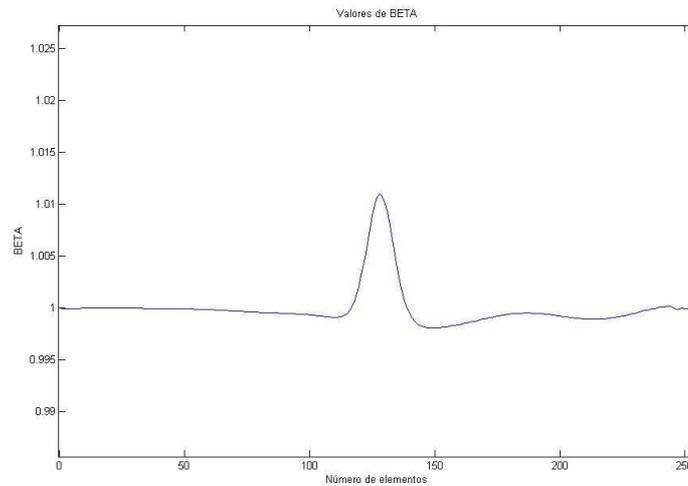


Figura 172. Parámetro  $\beta_p$ . Modelo numérico suavizado. Daño 0.5L medio

De nuevo el daño se encuentra a 64 cm.

## Cambio en la curvatura de los modos

Nº de modo de vibración	Variación de curvatura	Posición (cm)
1	2.78	63.75
2	0.06	61.26
3	9.14	63.75
4	4.35	93.12
5	2.03	60.76

Tabla 30. Variación de la curvatura. Modelo numérico suavizado. Daño 0.5L medio

Exceptuando el cuarto modo, los demás son muy precisos.

## MAC

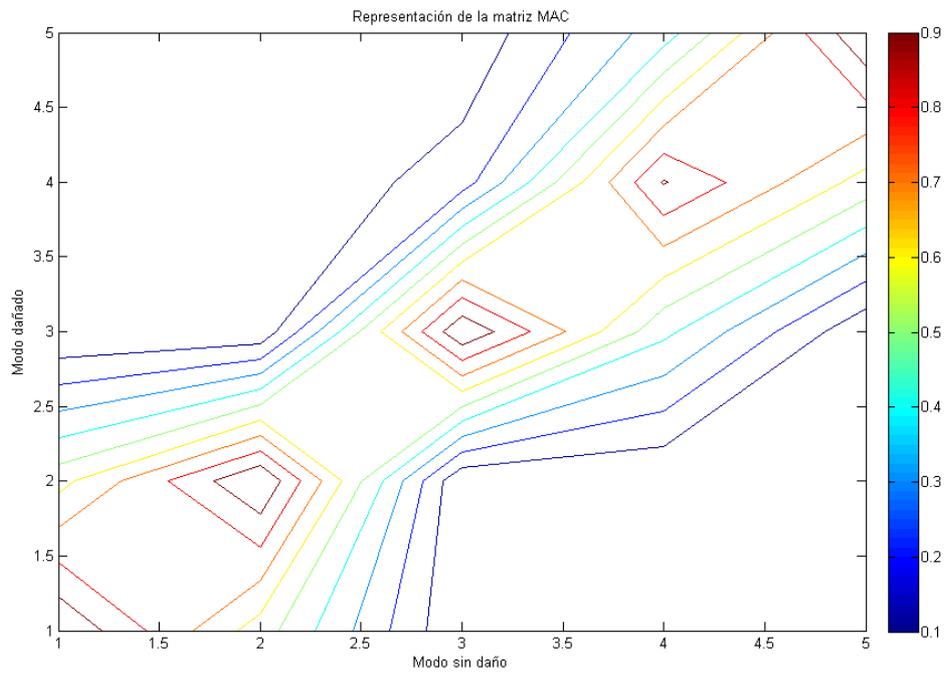


Figura 173. Representación del MAC. Modelo numérico suavizado. Daño 0.5L medio

Claramente se detecta el daño con el MAC.

- Severidad leve

### Variación de frecuencias naturales

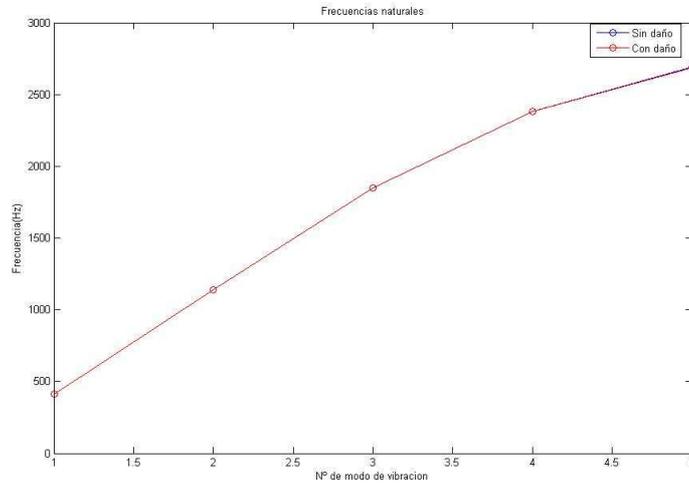


Figura 174. Variación de las frecuencias naturales. Modelo numérico suavizado. Daño 0.5L leve

En este caso, las diferencias son mínimas, por lo que no se podría aclarar si existe daño o no.

### Variación de modos de vibración

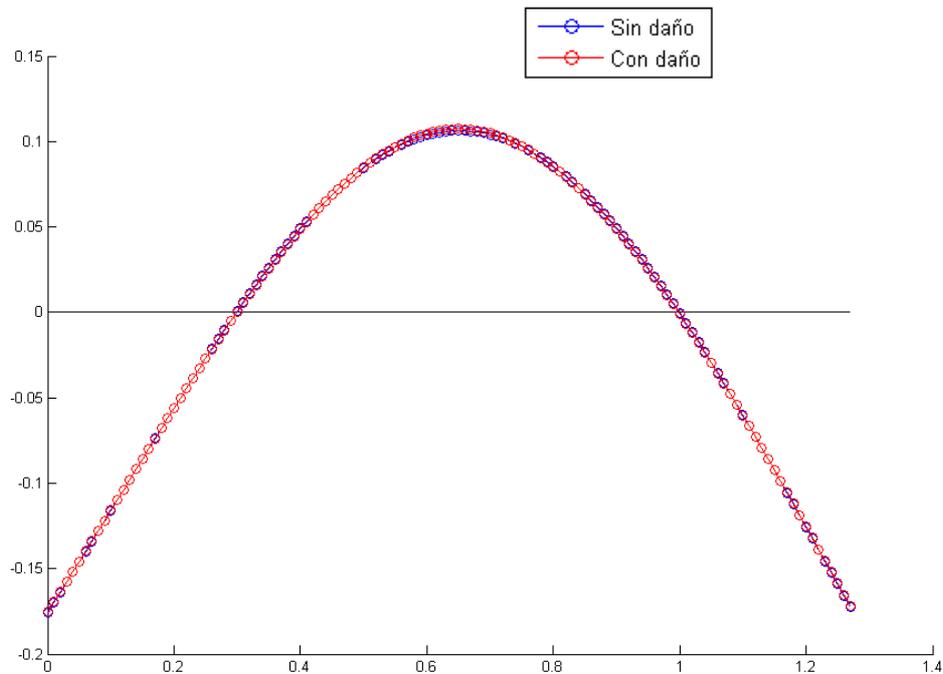


Figura 175. Primer modo de vibración. Modelo numérico suavizado. Daño 0.5L leve

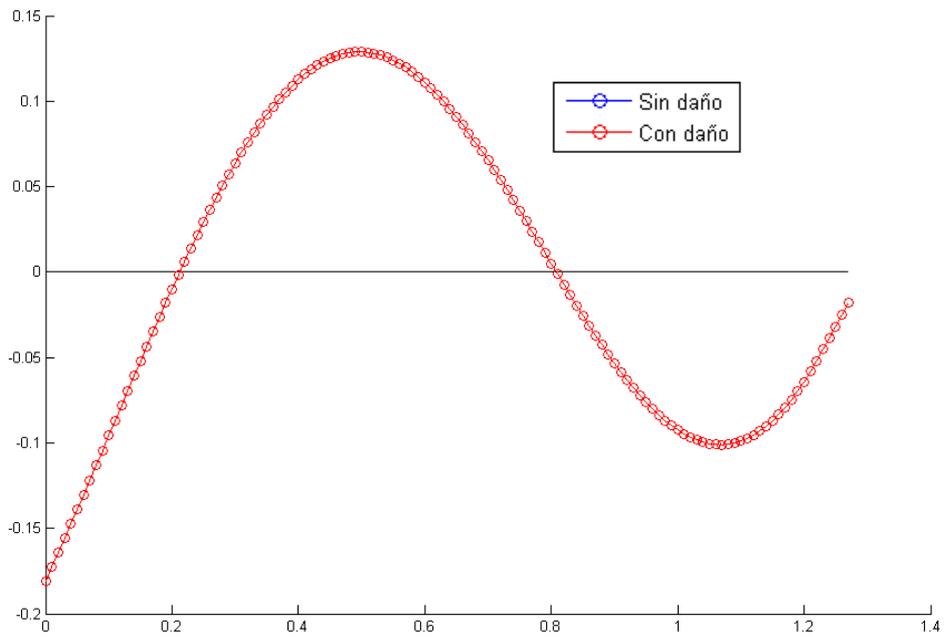


Figura 176. Segundo modo de vibración. Modelo numérico suavizado. Daño 0.5L leve

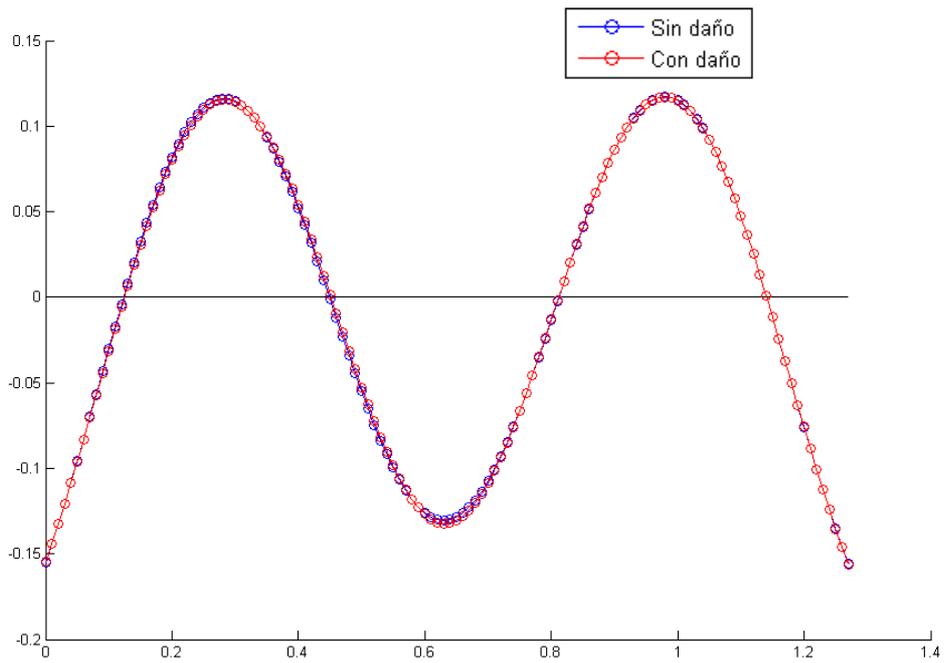


Figura 177. Tercer modo de vibración. Modelo numérico suavizado. Daño 0.5L leve

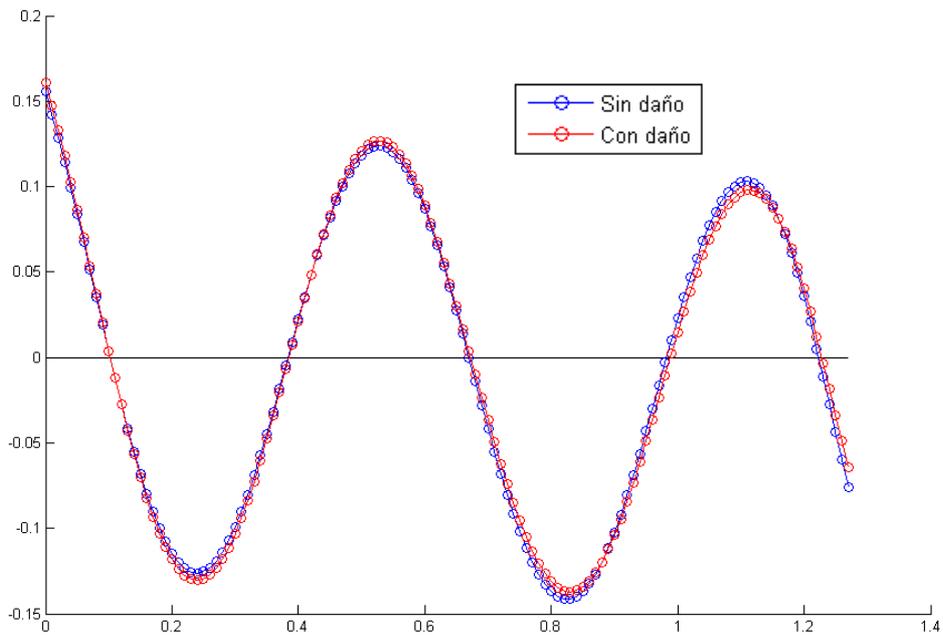


Figura 178. Cuarto modo de vibración. Modelo numérico suavizado. Daño 0.5L leve

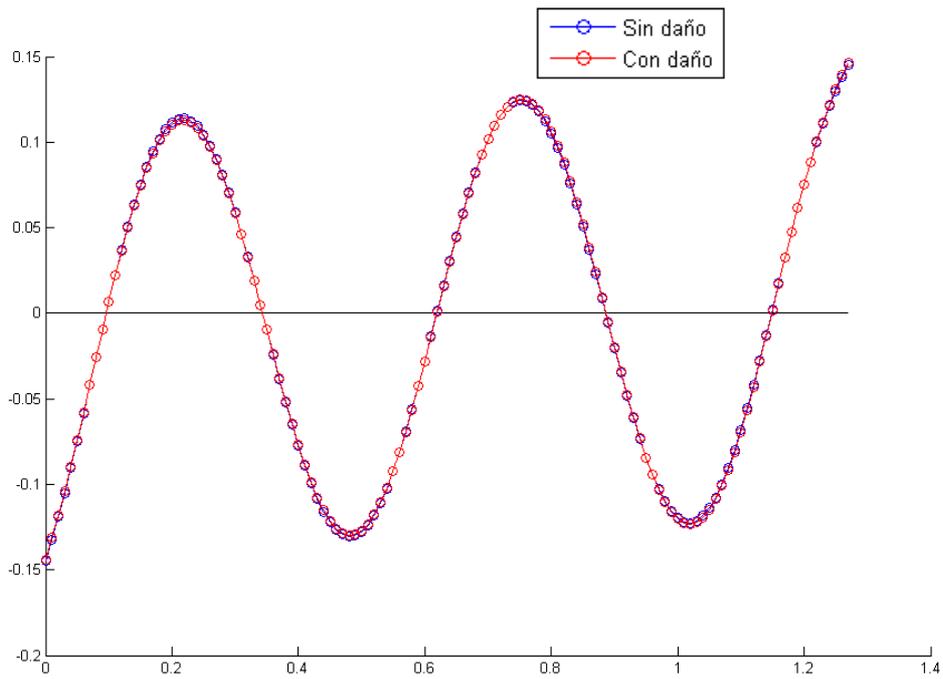


Figura 179. Quinto modo de vibración. Modelo numérico suavizado. Daño 0.5L leve

Para esta severidad, los modos no presentan grandes variaciones, por lo que no es posible averiguar si la viga se encuentra dañada.

## Variación de la matriz de flexibilidad y rigidez

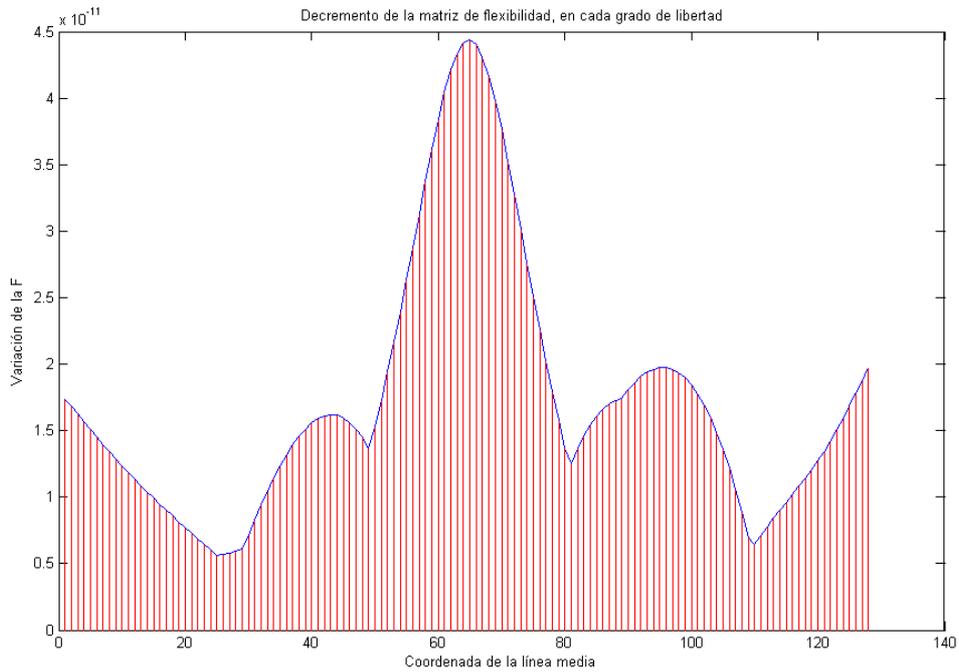


Figura 180. Variación de la matriz de flexibilidad. Modelo numérico suavizado. Daño 0.5L leve

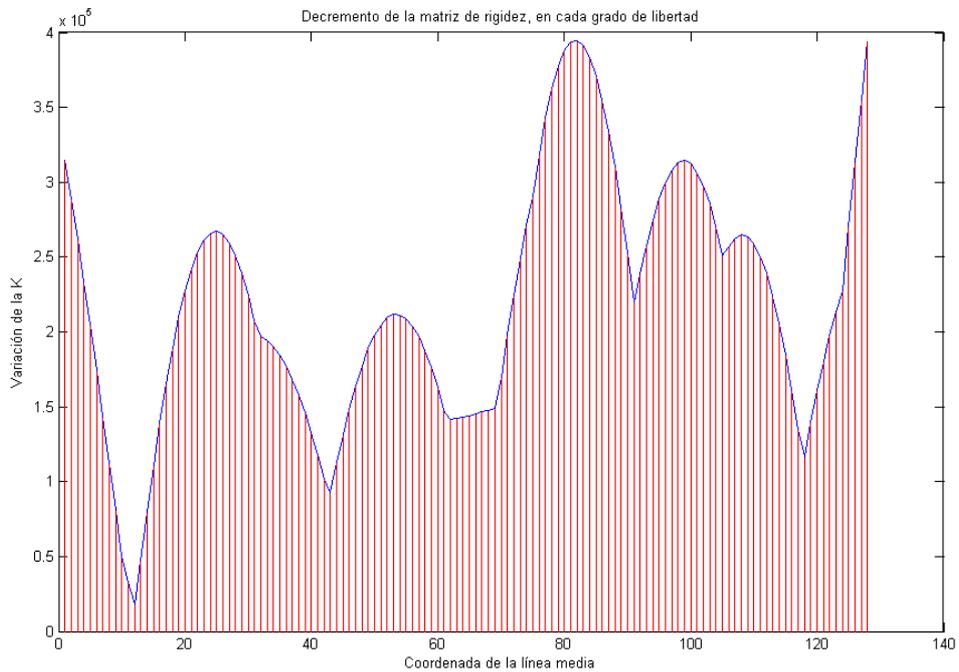


Figura 181. Variación de la matriz de rigidez. Modelo numérico suavizado. Daño 0.5L leve

Con una severidad leve, el cambio que sufre la matriz de flexibilidad nos muestra claramente la presencia de daño en la sección central de la viga.

## Método de Stubbs

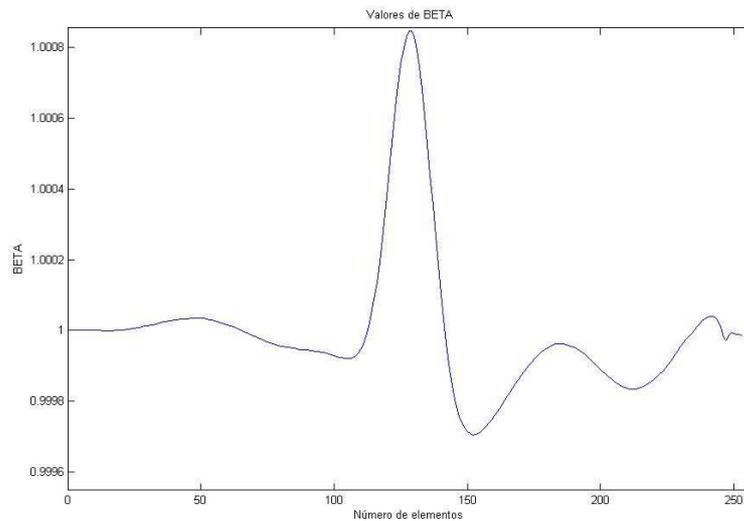


Figura 182. Parámetro  $\beta_p$ . Modelo numérico suavizado. Daño 0.5L leve

Nos localiza el daño en 64 cm.

## Cambio en la curvatura de los modos

Nº de modo de vibración	Variación de curvatura	Posición (cm)
1	0.28	63.75
2	0.005	62.25
3	0.94	63.75
4	0.78	96.12
5	0.29	60.76

Tabla 31. Variación de la curvatura. Modelo numérico suavizado. Daño 0.5L leve

El cuarto modo es el único que da un resultado incoherente.

## MAC

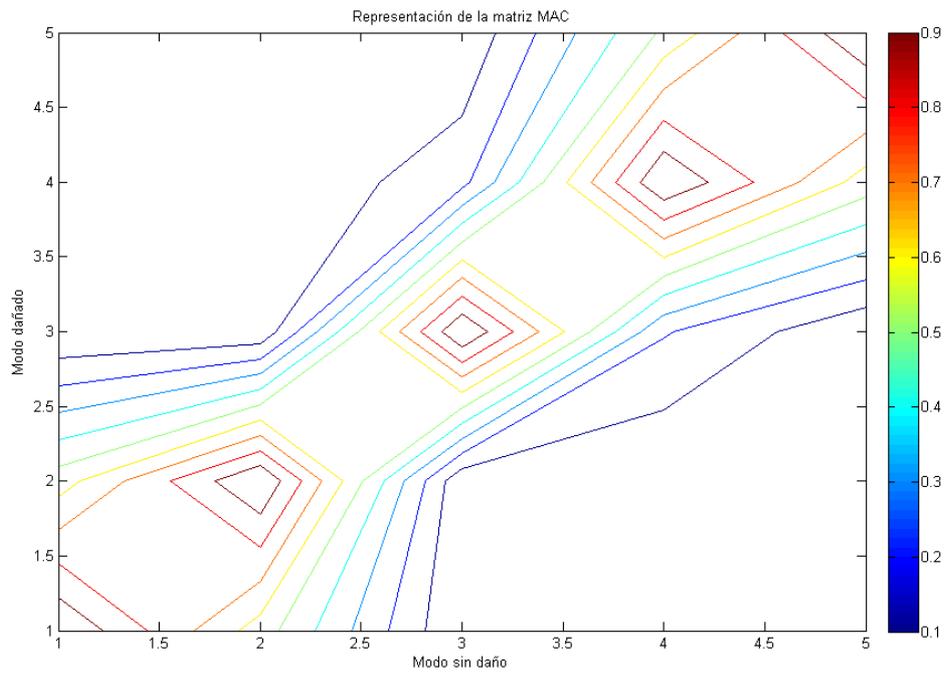


Figura 183. Representación del MAC. Modelo numérico suavizado. Daño 0.5L leve

Se detecta el daño.

#### 4.1.7.2.2. Daño 0.25 L

- Severidad máxima

#### Variación de frecuencias naturales

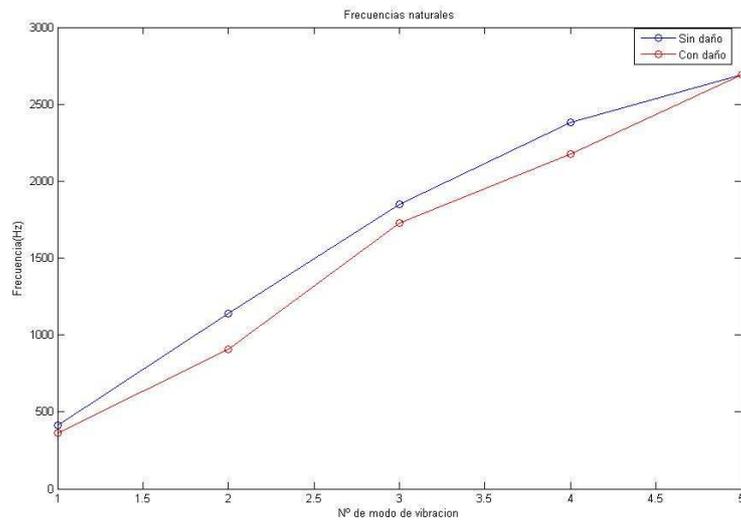


Figura 184. Variación de las frecuencias naturales. Modelo numérico suavizado. Daño 0.25L máx.

Se observa variaciones en la segunda, tercera y cuarta frecuencia natural, avisándonos de un posible daño en la viga.

## Variación de modos de vibración

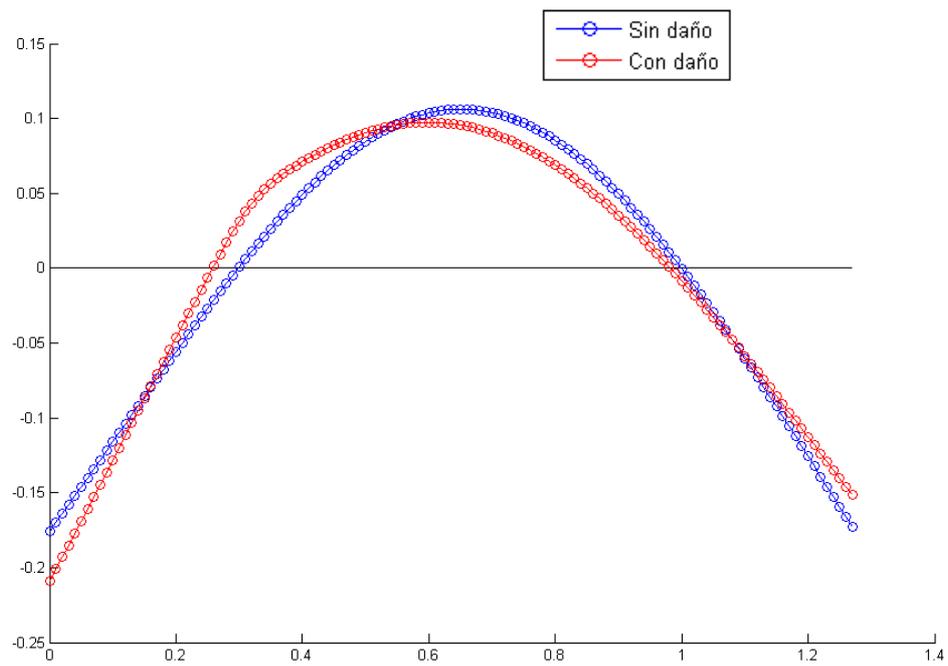


Figura 185. Primer modo de vibración. Modelo numérico suavizado. Daño 0.25L máx.

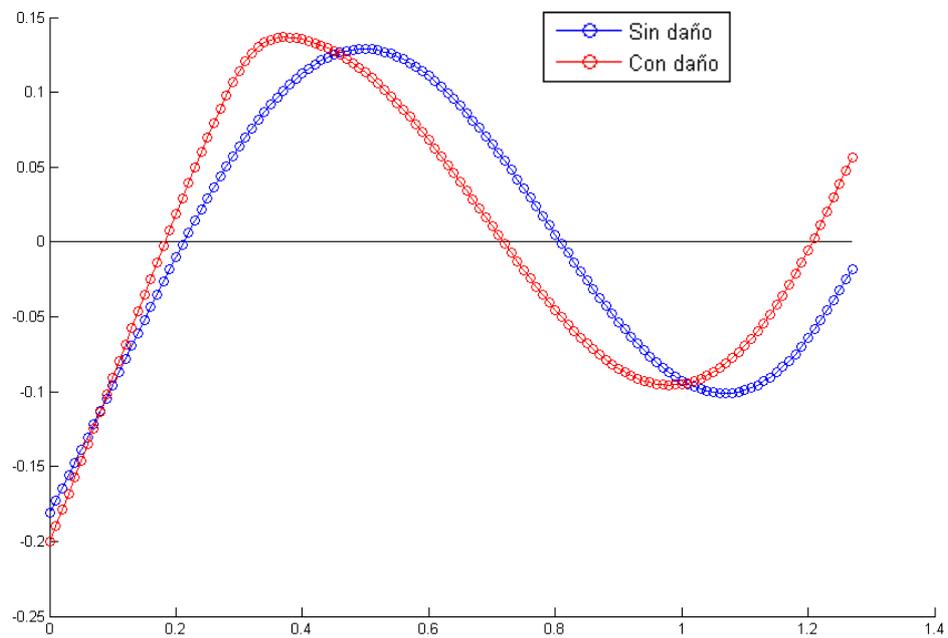


Figura 186. Segundo modo de vibración. Modelo numérico suavizado. Daño 0.25L máx.

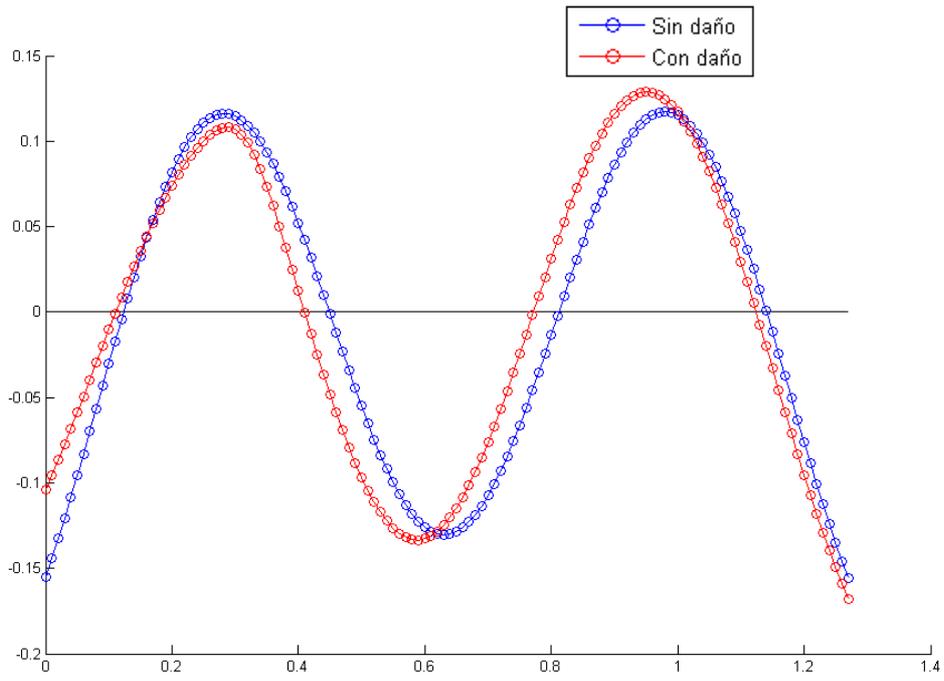


Figura 187. Tercer modo de vibración. Modelo numérico suavizado. Daño 0.25L máx.

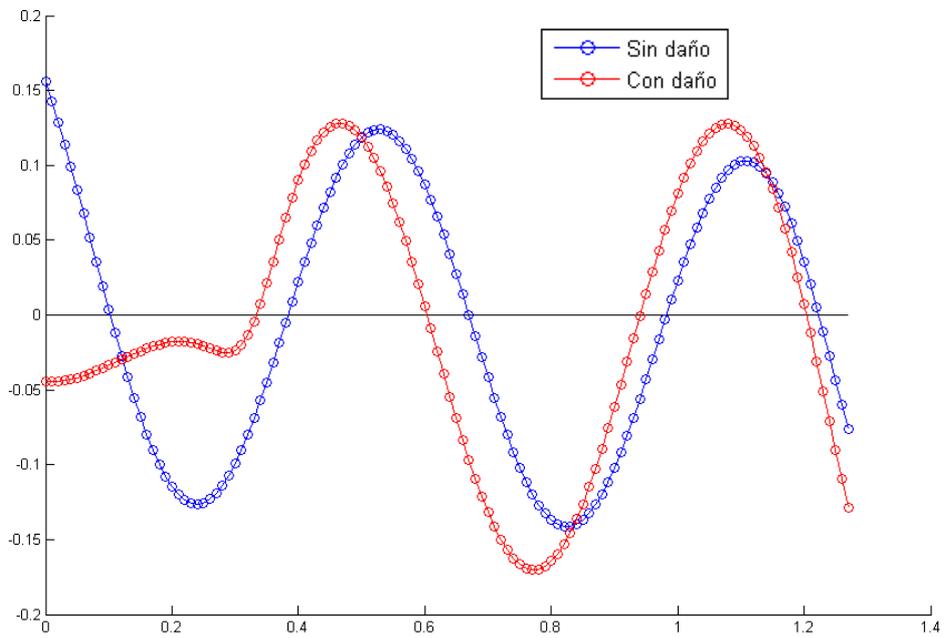


Figura 188. Cuarto modo de vibración. Modelo numérico suavizado. Daño 0.25L máx.

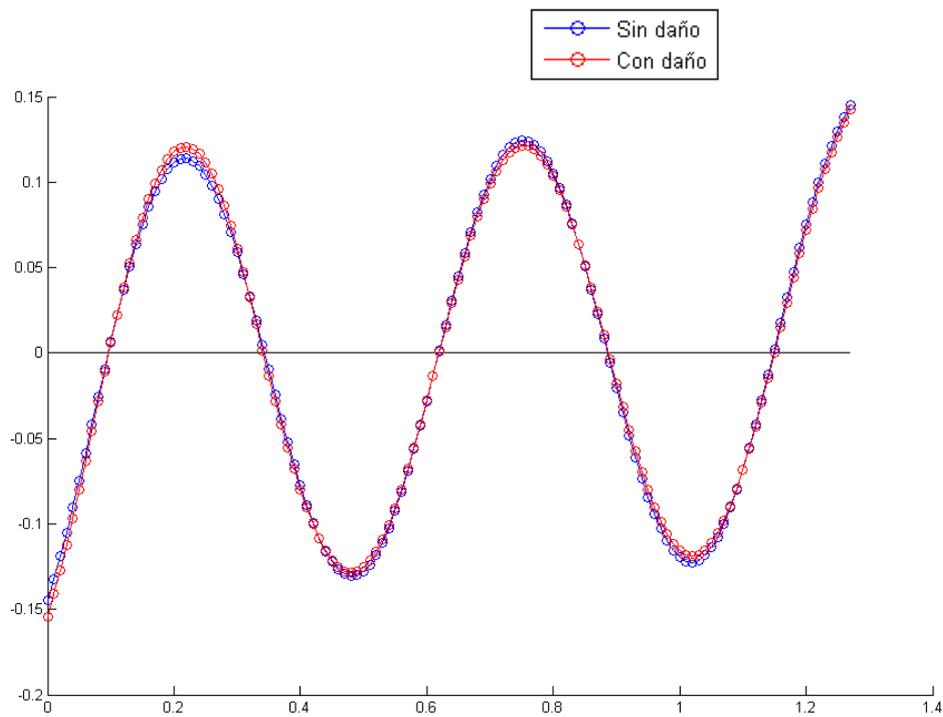


Figura 189. Quinto modo de vibración. Modelo numérico suavizado. Daño 0.25L máx.

Podemos observar, sobre todo, en el primer y segundo modo, cómo a un cuarto de la longitud de la viga, existe grandes variaciones entre los modos debido al fallo en esta posición.

### Variación de la matriz de flexibilidad y rigidez

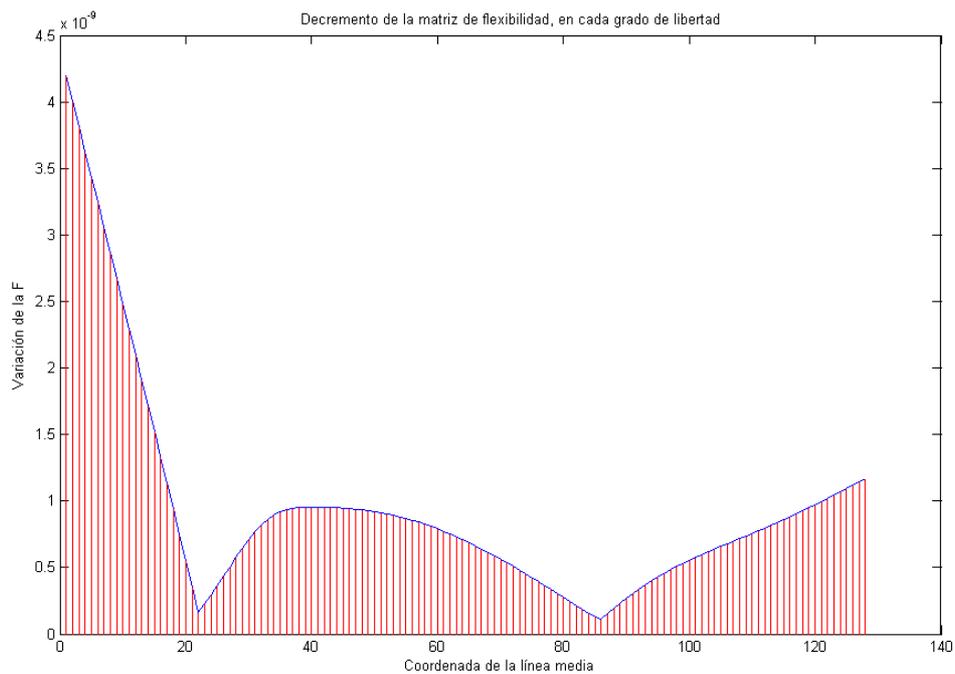


Figura 190. Variación de la matriz de flexibilidad. Modelo numérico suavizado. Daño 0.25L máx.

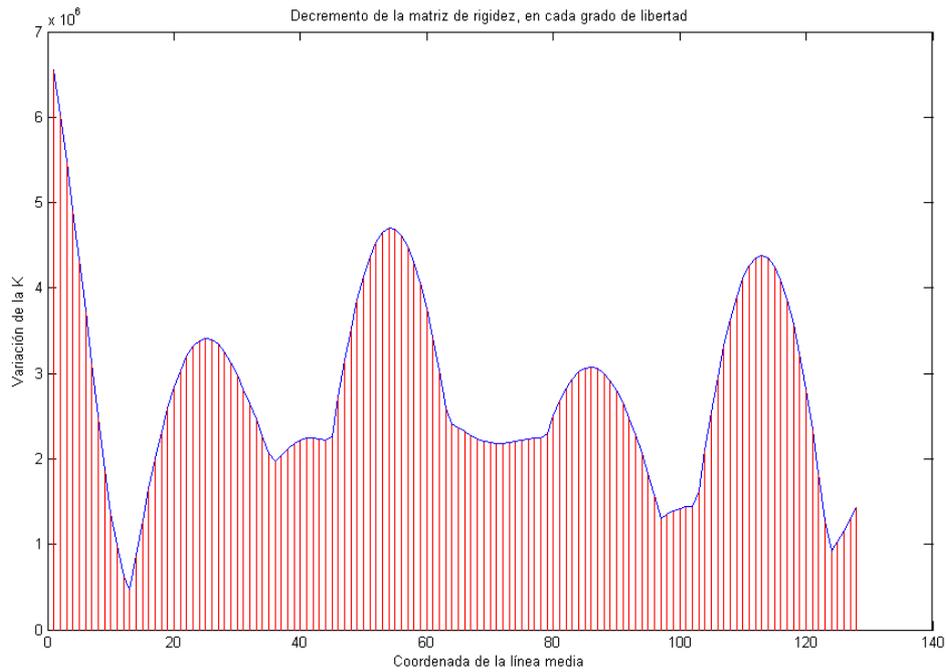


Figura 191. Variación de la matriz de rigidez. Modelo numérico suavizado. Daño 0.25L máx.

La variación de la matriz de flexibilidad localiza la grieta.

### Método de Stubbs

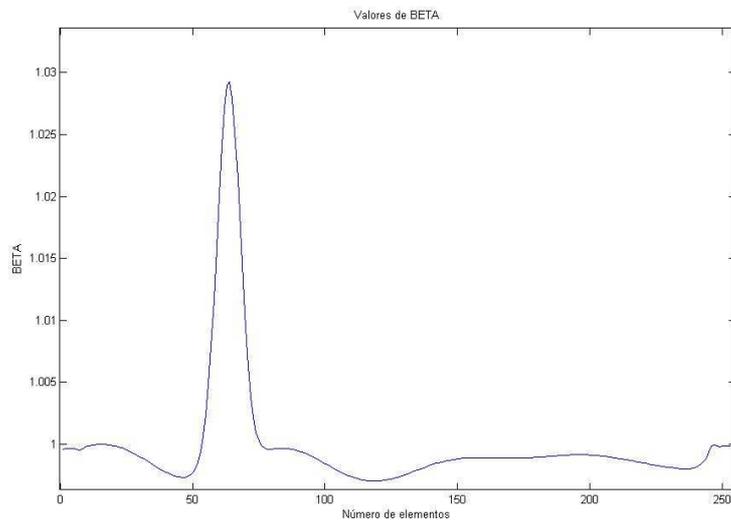


Figura 192. Parámetro  $\beta_p$ . Modelo numérico suavizado. Daño 0.25L máx.

El fallo real se encuentra a 31.75 cm. El método nos lo localiza a 32.12 cm, por lo que se aproxima muy bien

## Cambio en la curvatura de los modos

Nº de modo de vibración	Variación de curvatura	Posición (cm)
1	5.87	31.38
2	9.63	31.38
3	10.14	31.38
4	19.08	31.38
5	4.08	34.36

Tabla 32. Variación de la curvatura. Modelo numérico suavizado. Daño 0.25L máx.

Todos los modos dan buenos resultados, aunque el quinto es el que más difiere.

## MAC

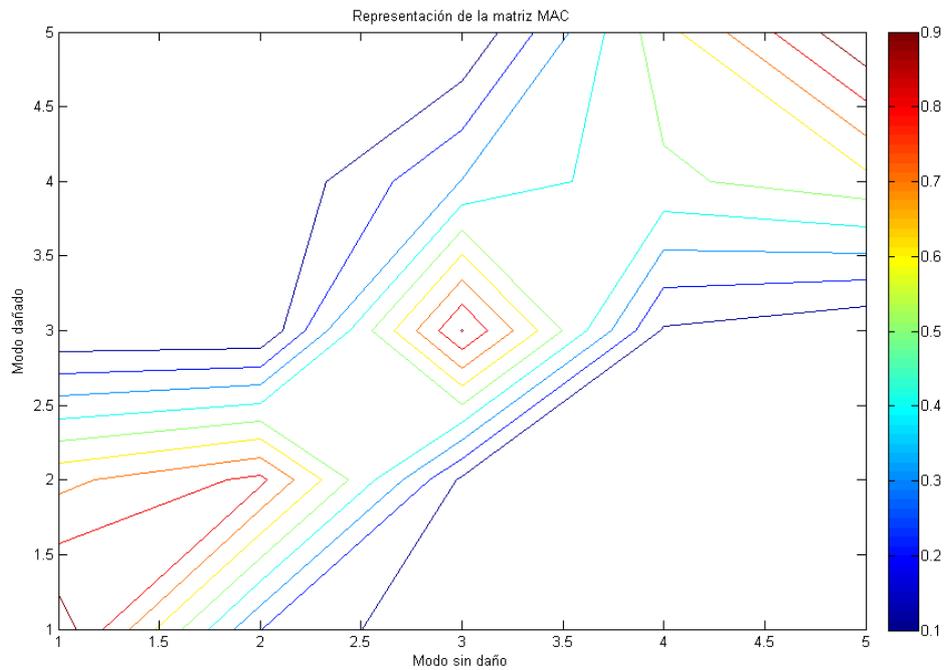


Figura 193. Representación del MAC. Modelo numérico suavizado. Daño 0.25L máx.

Se detecta el fallo.

- Severidad media

### Variación de frecuencias naturales

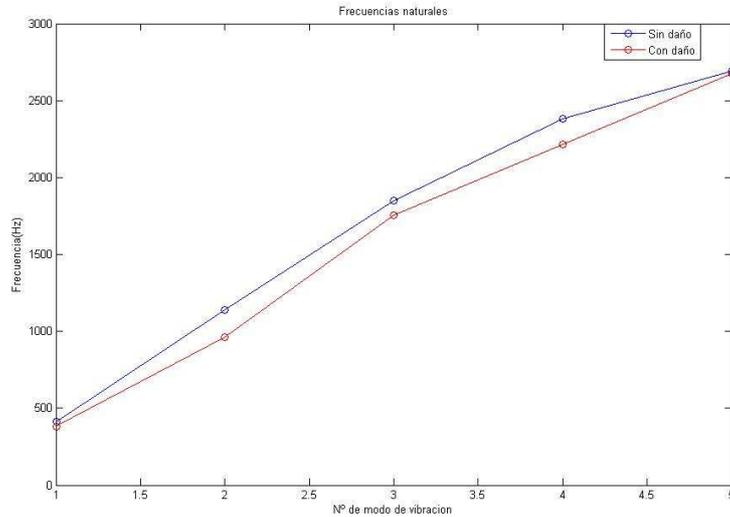


Figura 194. Variación de las frecuencias naturales. Modelo numérico suavizado. Daño 0.25L medio

Vuelven a existir variaciones en las frecuencias

### Variación de modos de vibración

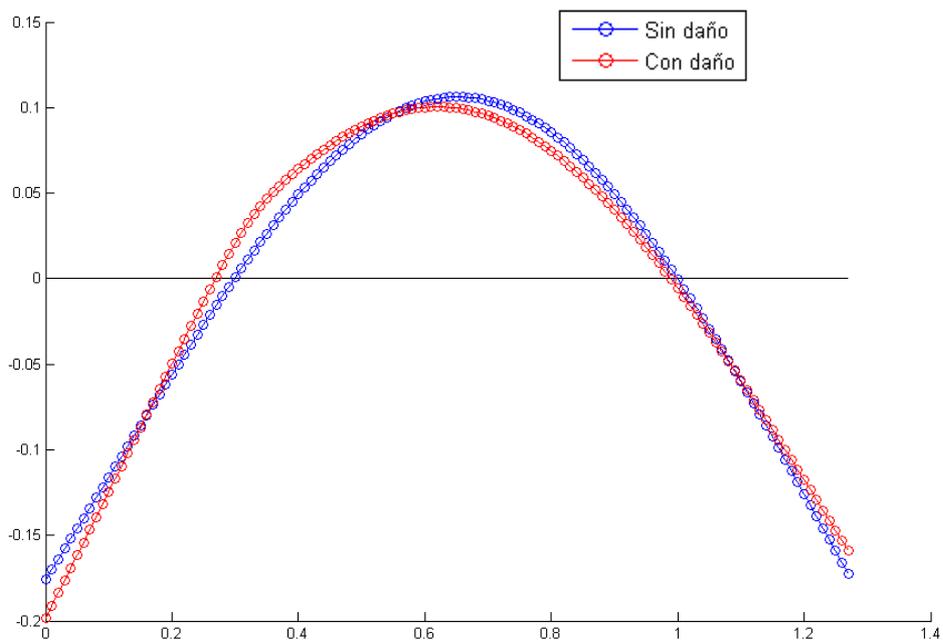


Figura 195. Primer modo de vibración. Modelo numérico suavizado. Daño 0.25L medio

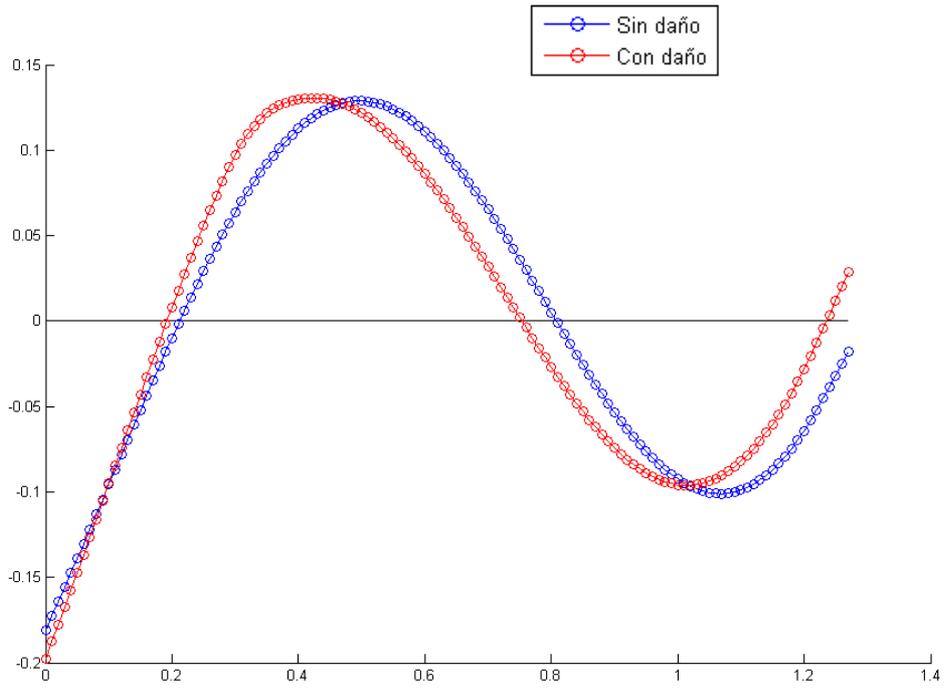


Figura 196. Segundo modo de vibración. Modelo numérico suavizado. Daño 0.25L medio

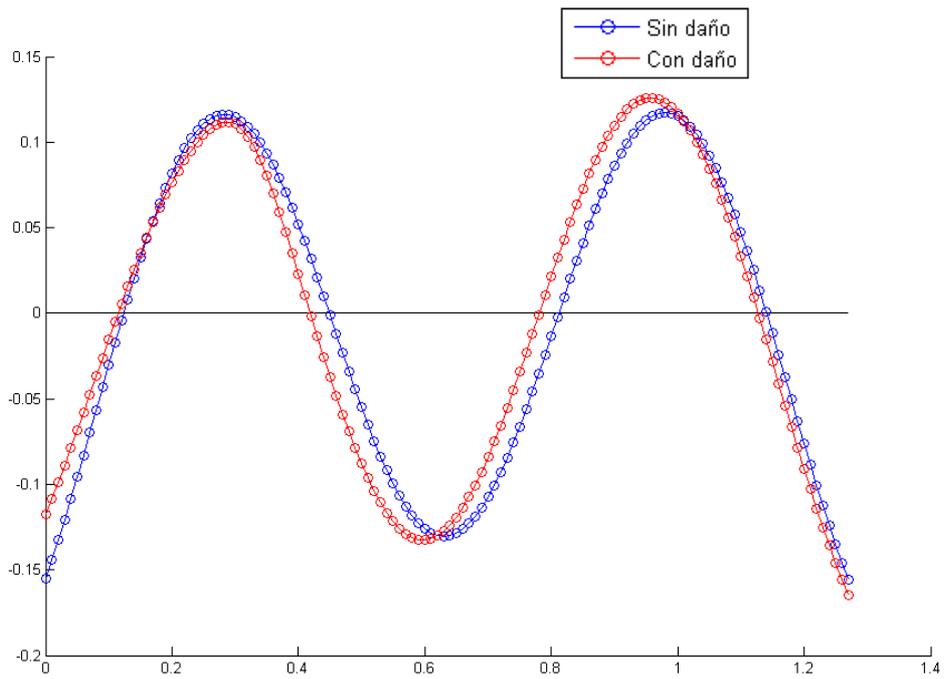


Figura 197. Tercer modo de vibración. Modelo numérico suavizado. Daño 0.25L medio

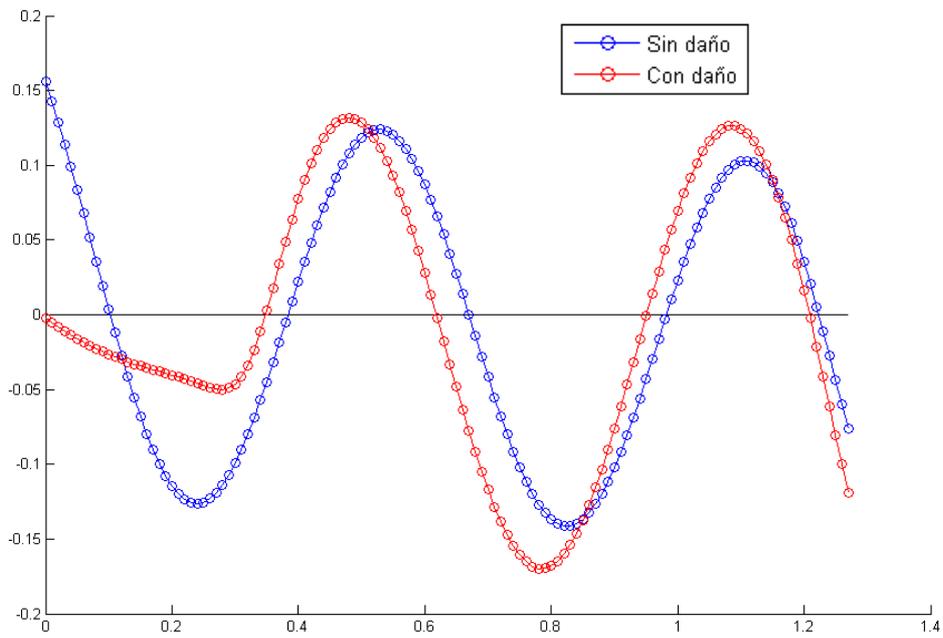


Figura 198. Cuarto modo de vibración. Modelo numérico suavizado. Daño 0.25L medio

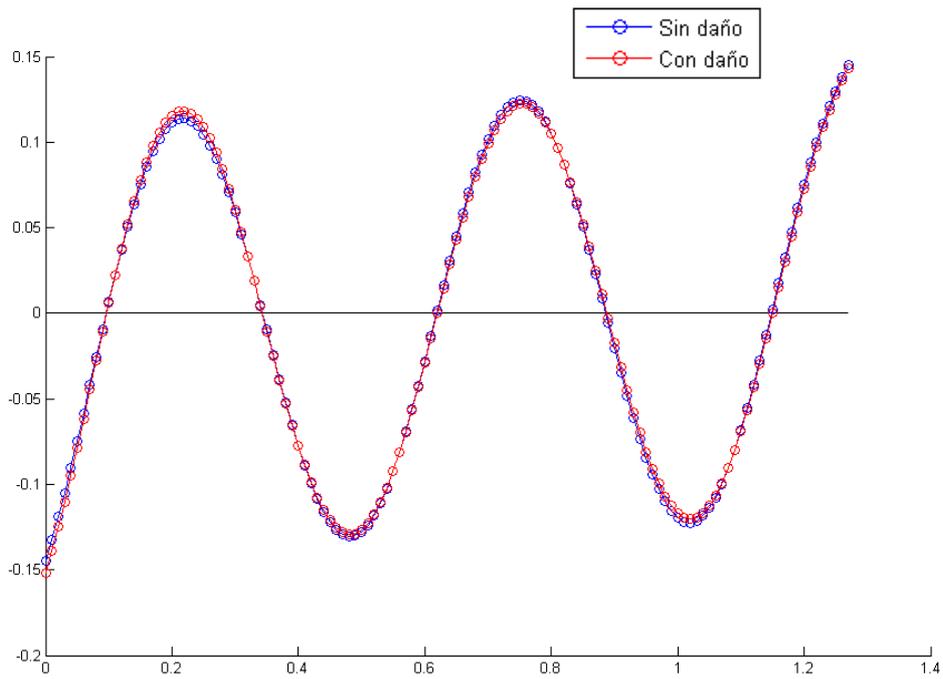


Figura 199. Quinto modo de vibración. Modelo numérico suavizado. Daño 0.25L medio

Se observan las mismas variaciones que con severidad máxima pero con menor amplitud.

## Variación de la matriz de flexibilidad y rigidez

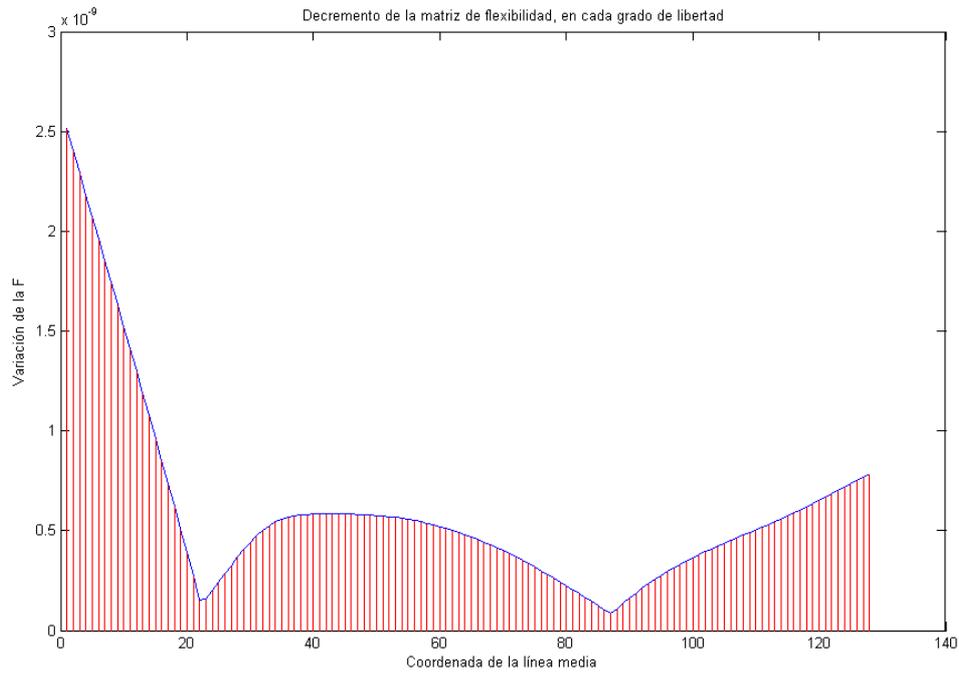


Figura 200. Variación de la matriz de flexibilidad. Modelo numérico suavizado. Daño 0.25L medio

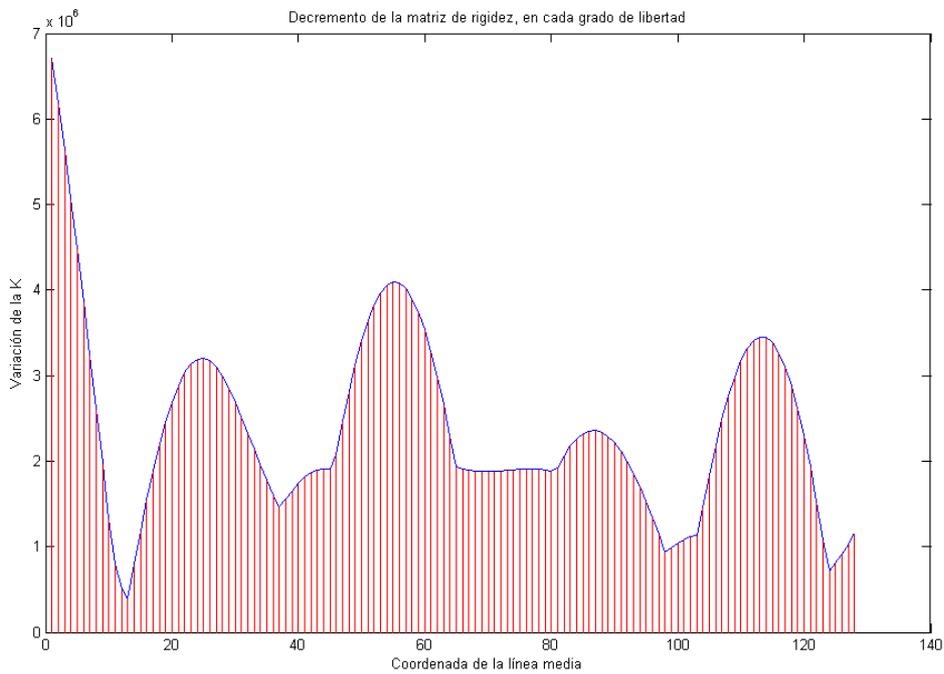


Figura 201. Variación de la matriz de rigidez. Modelo numérico suavizado. Daño 0.25L medio

La variación de la matriz de flexibilidad nos indica la existencia de la grieta cercana a una cuarta parte de la longitud de la viga.

## Método de Stubbs

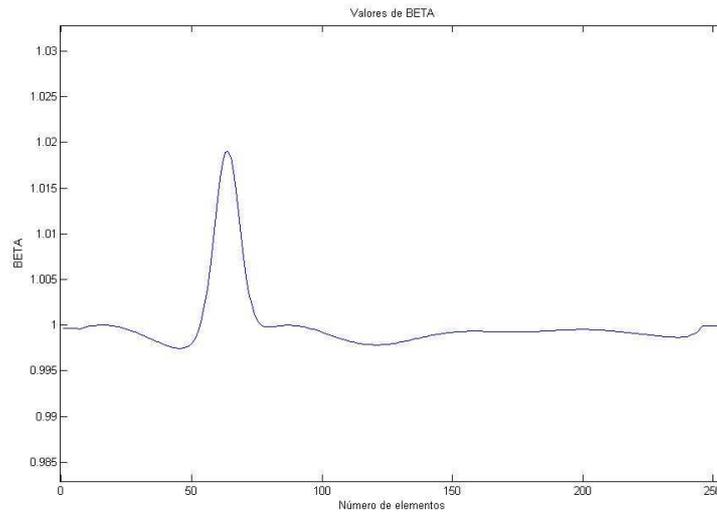


Figura 202. Parámetro  $\beta_p$ . Modelo numérico suavizado. Daño 0.25L medio

El método localiza el fallo en la coordenada 32.12 cm

## Cambio en la curvatura de los modos

Nº de modo de vibración	Variación de curvatura	Posición (cm)
1	3.65	31.38
2	5.86	31.38
3	7.61	31.38
4	16.55	31.38
5	1.75	34.36

Tabla 33. Variación de la curvatura. Modelo numérico suavizado. Daño 0.25L medio

Los resultados son idénticos a los de severidad máxima.

## MAC

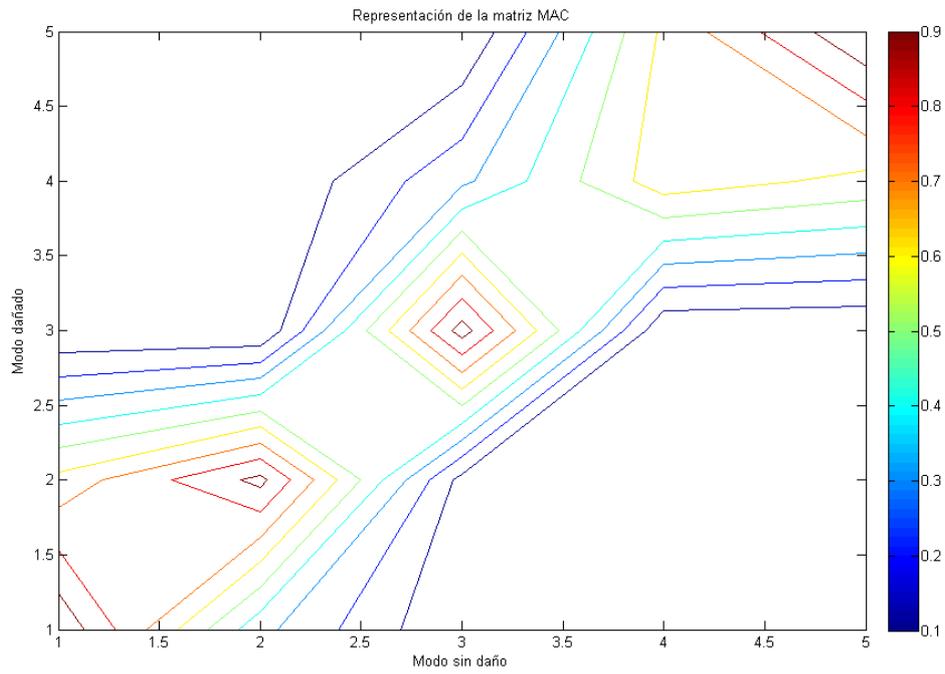


Figura 203. Representación del MAC. Modelo numérico suavizado. Daño 0.25L medio

- Severidad leve

## Variación de frecuencias naturales

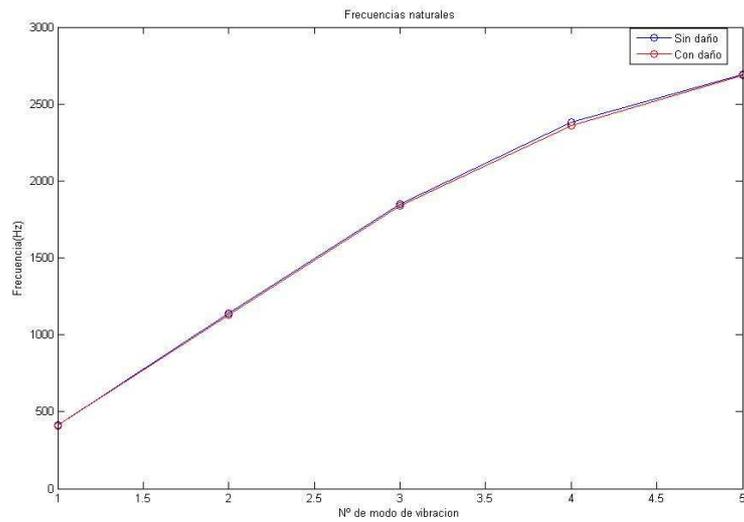


Figura 204. Variación de las frecuencias naturales. Modelo numérico suavizado. Daño 0.25L leve

Como ya surgiera en la configuración de daño en 0.5L severidad leve, de nuevo, este método no nos ofrece un resultado claro de la existencia del daño.

### Variación de modos de vibración

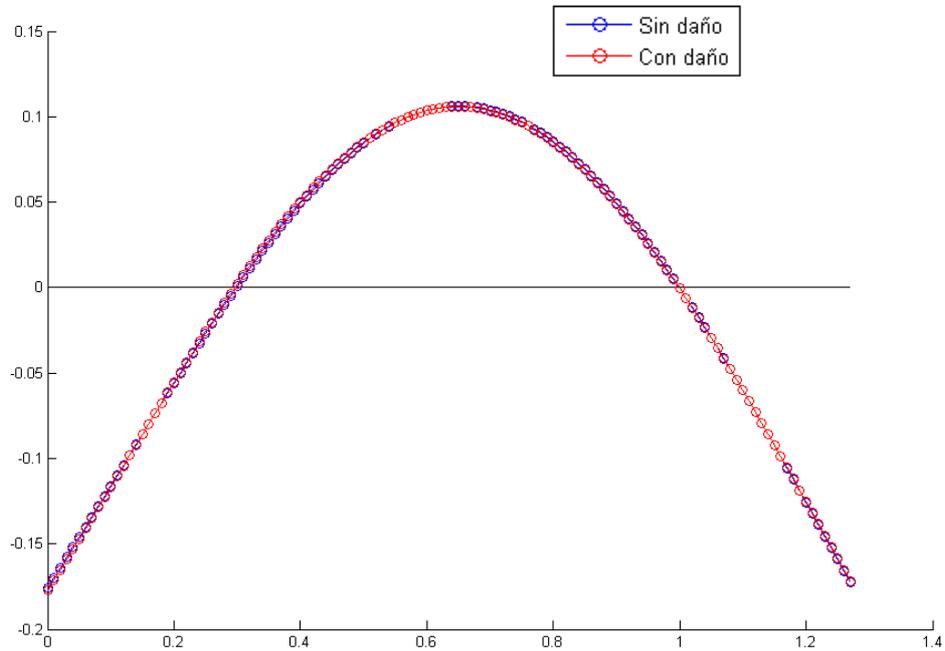


Figura 205. Primer modo de vibración. Modelo numérico suavizado. Daño 0.25L leve

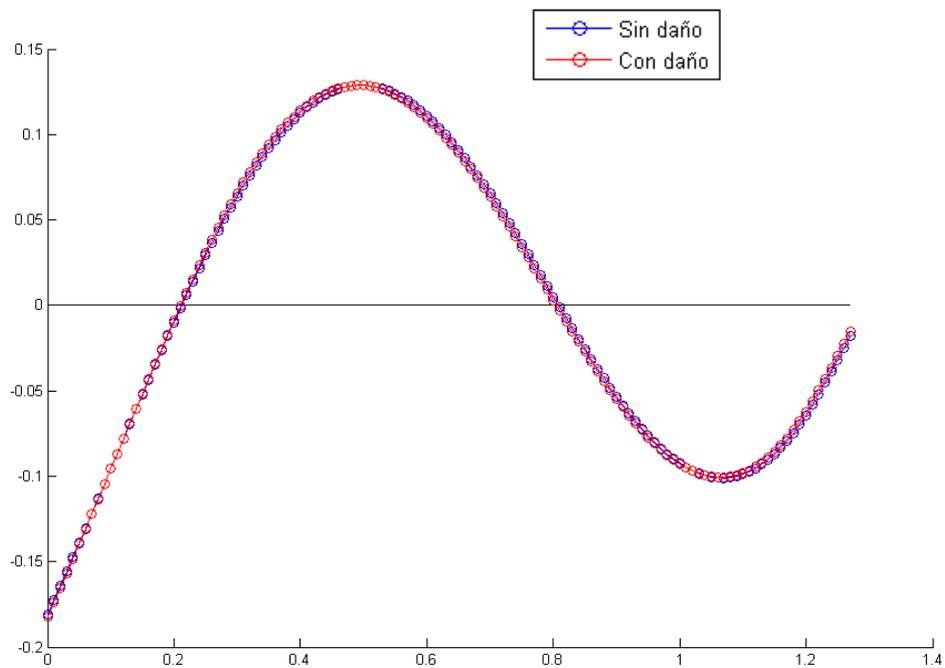


Figura 206. Segundo modo de vibración. Modelo numérico suavizado. Daño 0.25L leve

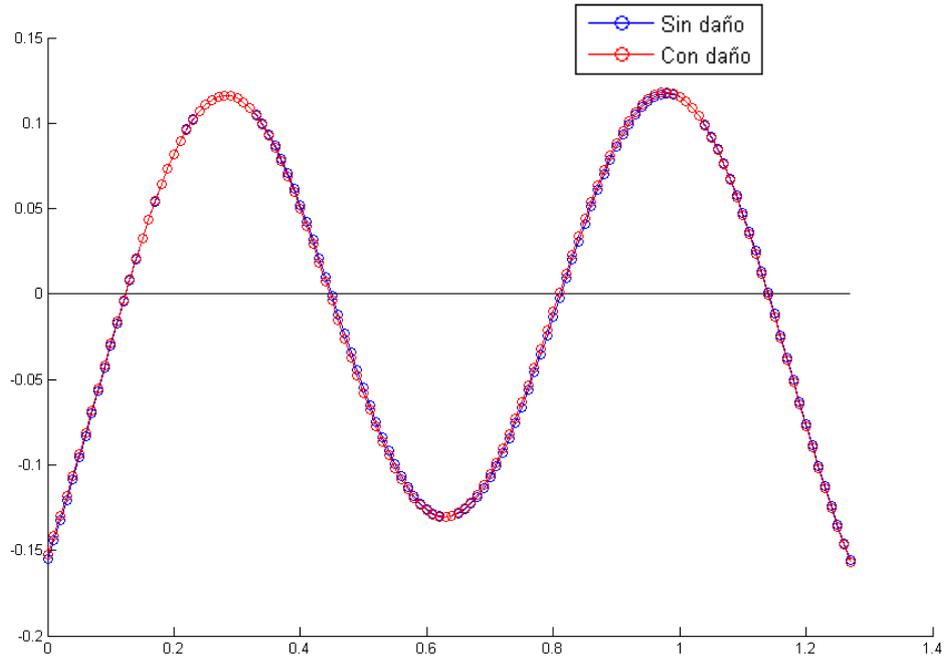


Figura 207. Tercer modo de vibración. Modelo numérico suavizado. Daño 0.25L leve

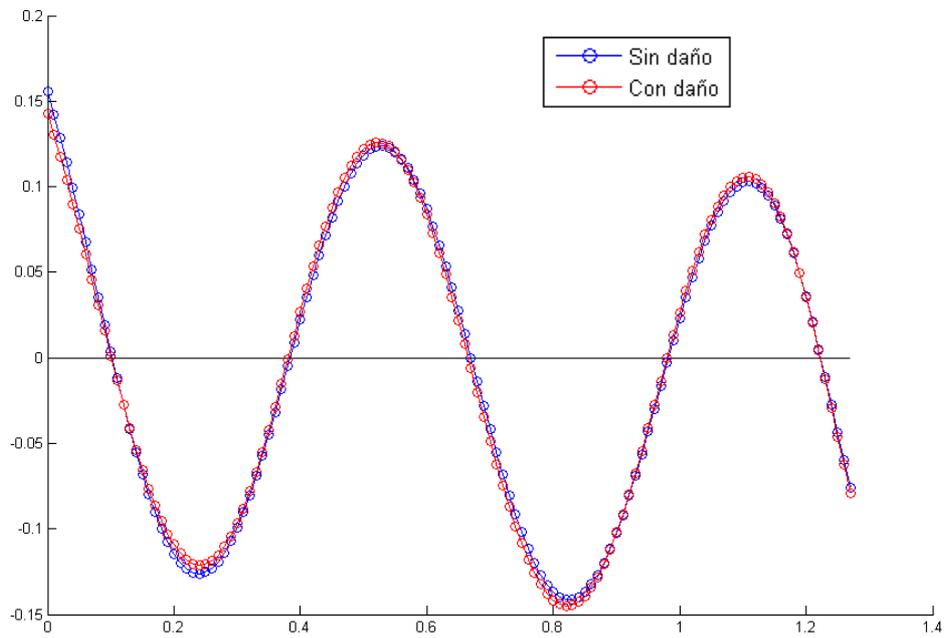


Figura 208. Cuarto modo de vibración. Modelo numérico suavizado. Daño 0.25L leve

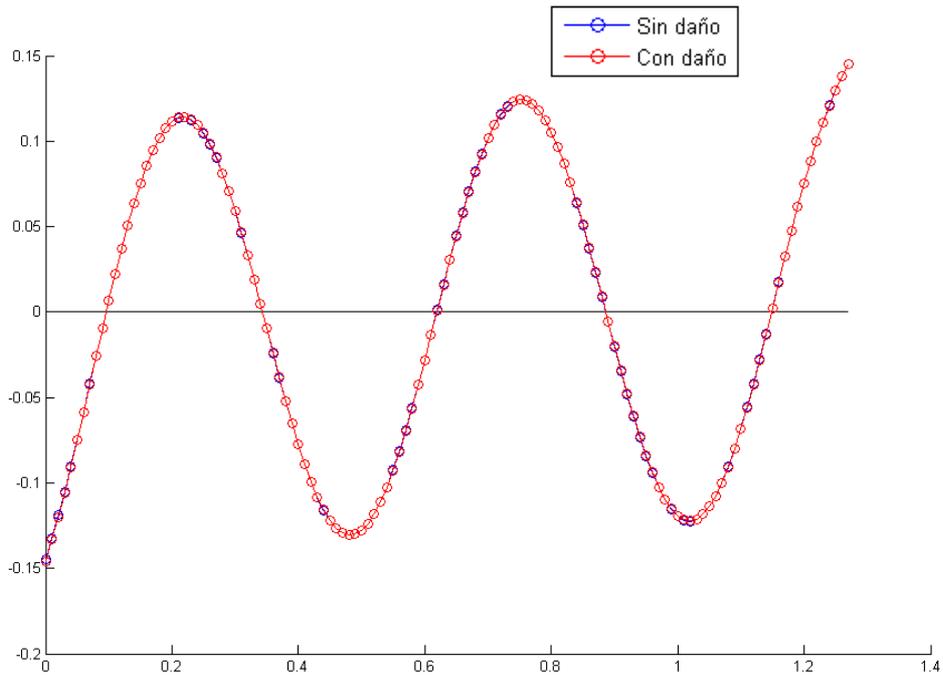


Figura 209. Quinto modo de vibración. Modelo numérico suavizado. Daño 0.25L leve

De nuevo, para una severidad leve, este método no nos ofrece información acerca del daño.

Variación de la matriz de flexibilidad y rigidez

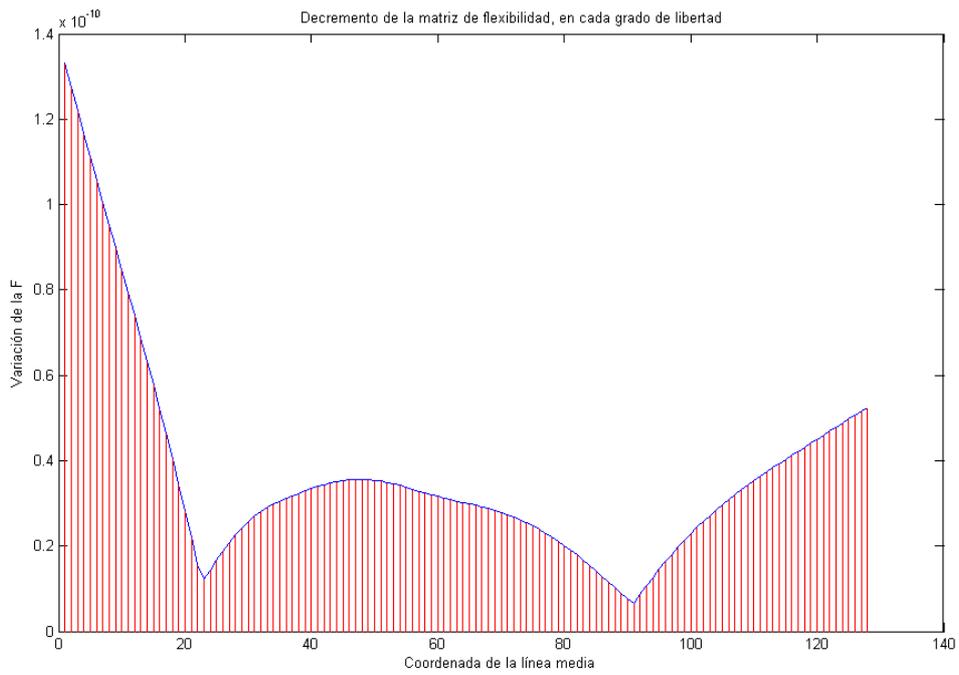


Figura 210. Variación de la matriz de flexibilidad. Modelo numérico suavizado. Daño 0.25L leve

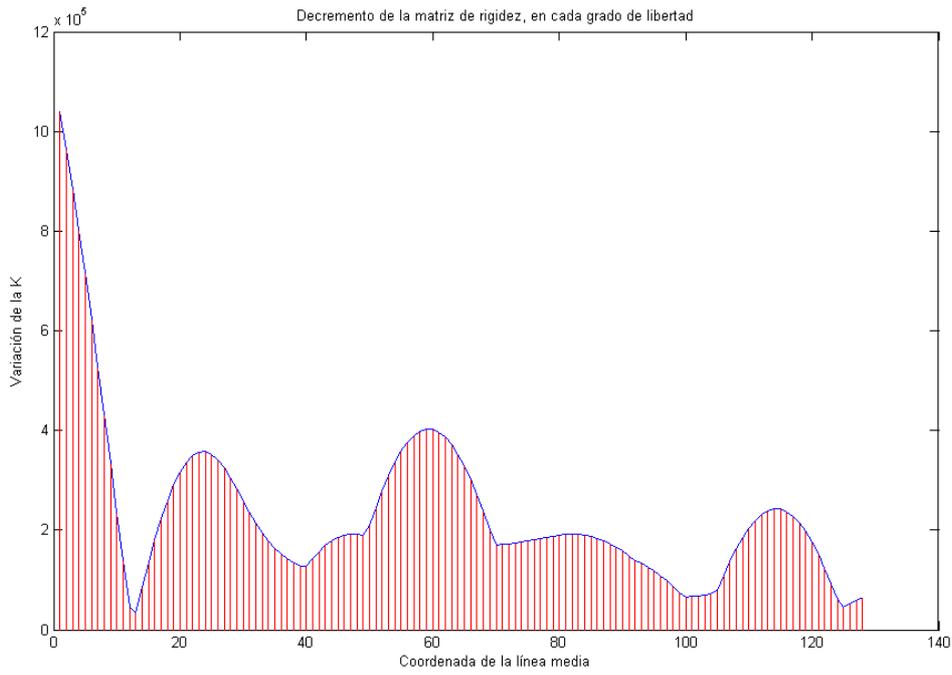


Figura 211. Variación de la matriz de rigidez. Modelo numérico suavizado. Daño 0.25L leve

Para esta severidad no se encuentra claramente el fallo con estos métodos.

### Método de Stubbs

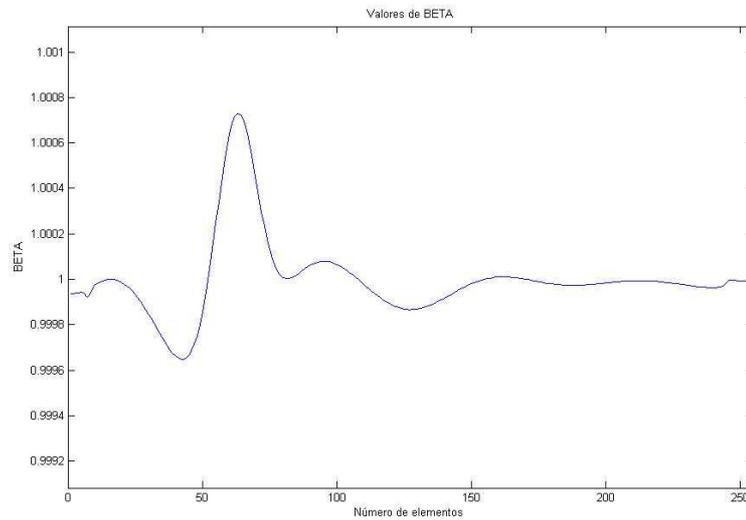


Figura 212. Parámetro  $\beta_p$ . Modelo numérico suavizado. Daño 0.25L leve

El método nos sitúa el fallo a 31.63 cm.

## Cambio en la curvatura de los modos

Nº de modo de vibración	Variación de curvatura	Posición (cm)
1	0.18	31.38
2	0.27	31.38
3	0.52	31.38
4	1.56	31.38
5	0.11	21.42

Tabla 34. Variación de la curvatura. Modelo numérico suavizado. Daño 0.25L leve

Para los cuatro primeros modos, los resultados son buenos.

## MAC

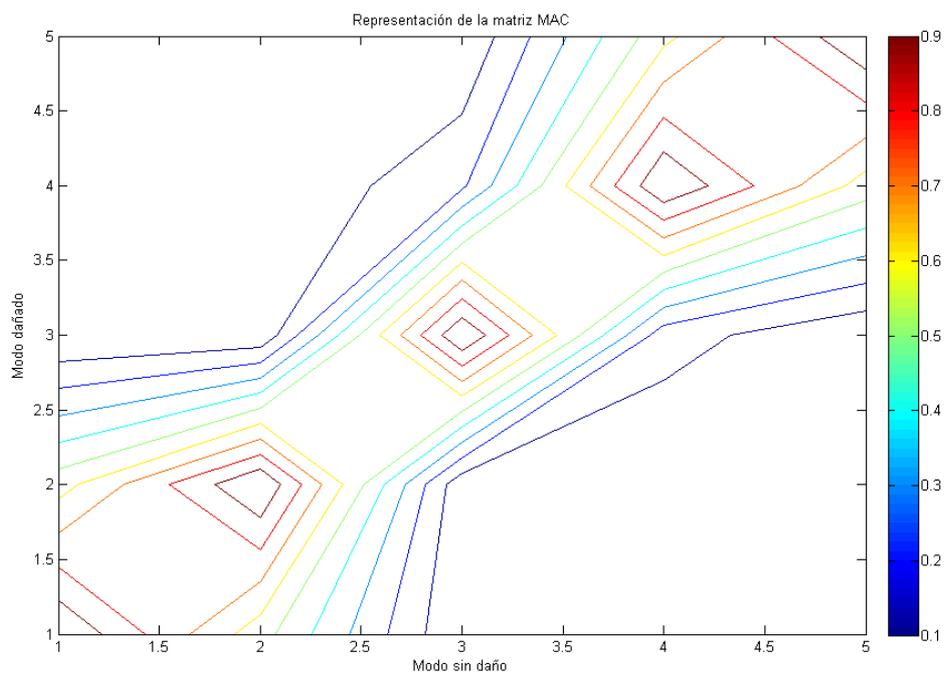


Figura 213. Representación del MAC. Modelo numérico suavizado. Daño 0.25L leve

### 4.1.7.2.3. Daño borde

#### Variación de frecuencias naturales

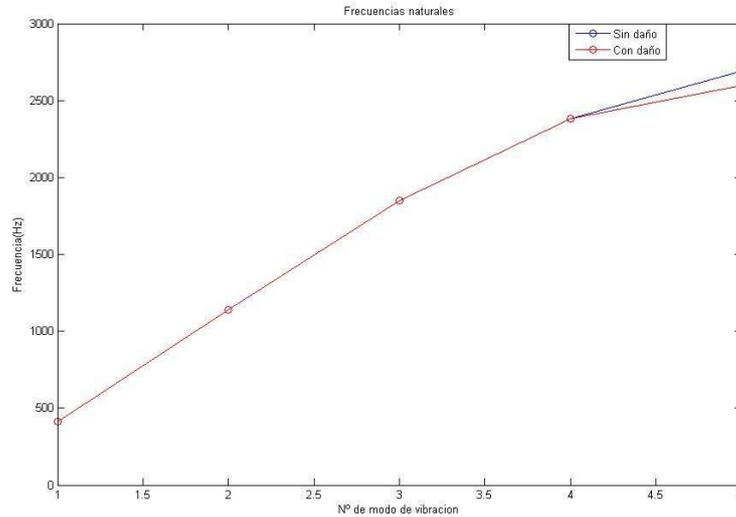


Figura 214. Variación de las frecuencias naturales. Modelo numérico suavizado. Daño borde

La variación de la quinta frecuencia natural nos informa de la existencia del daño.

#### Variación de modos de vibración

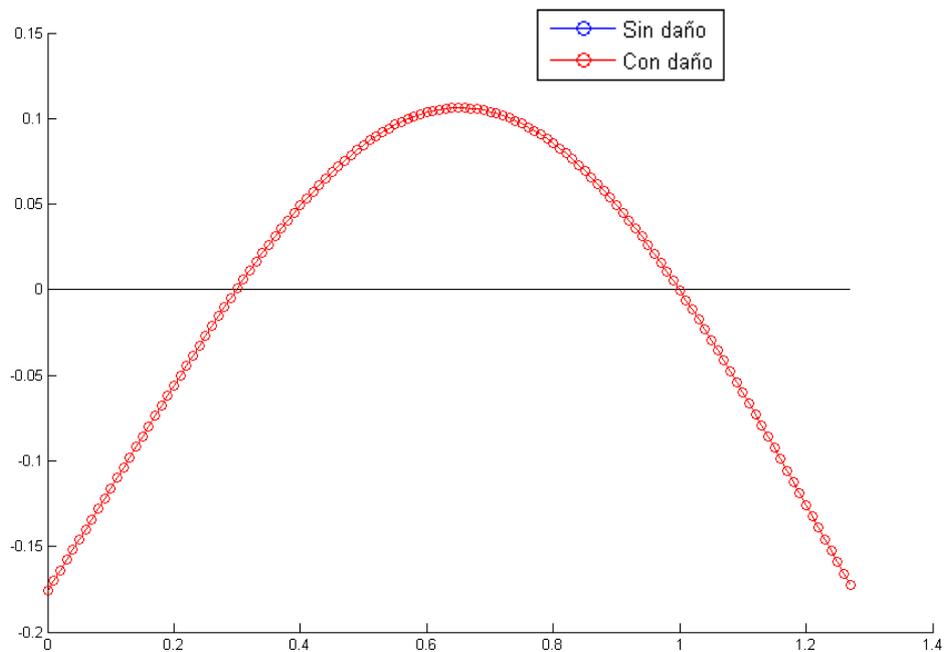


Figura 215. Primer modo de vibración numérico. Modelo numérico suavizado. Daño borde

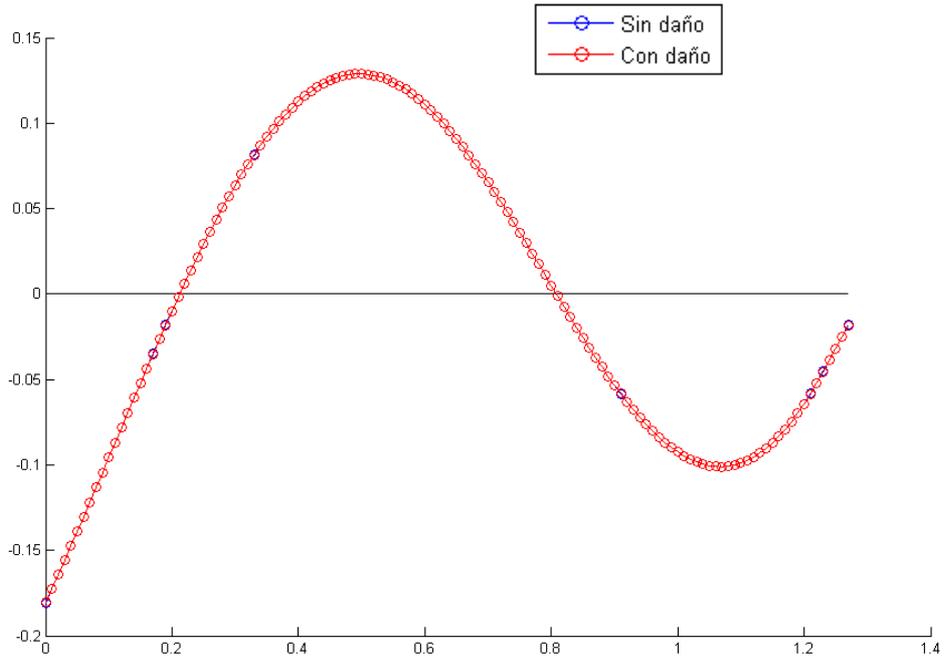


Figura 216. Segundo modo de vibración. Modelo numérico suavizado. Daño borde

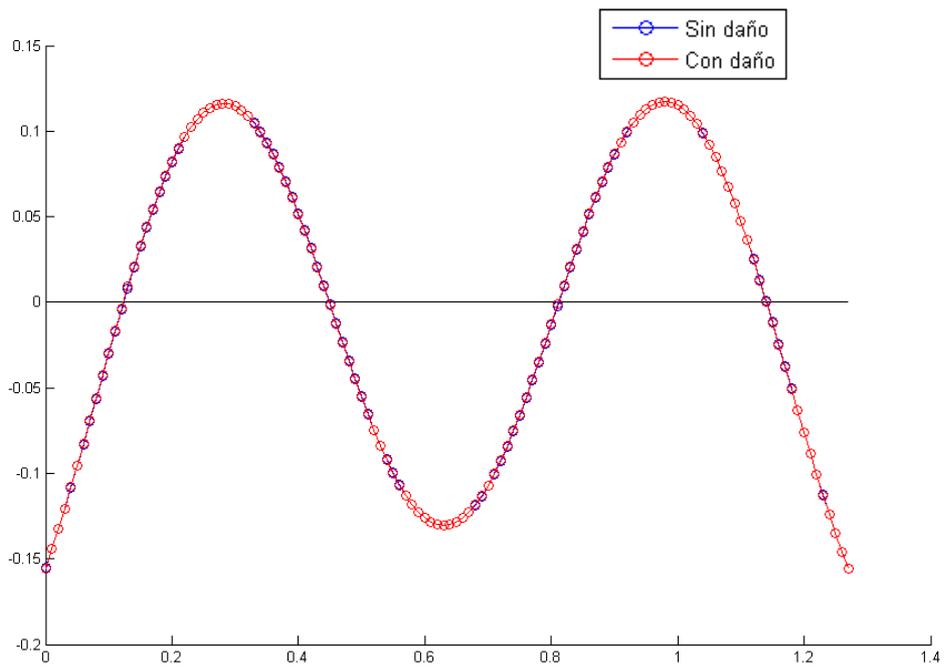


Figura 217. Tercer modo de vibración. Modelo numérico suavizado. Daño borde

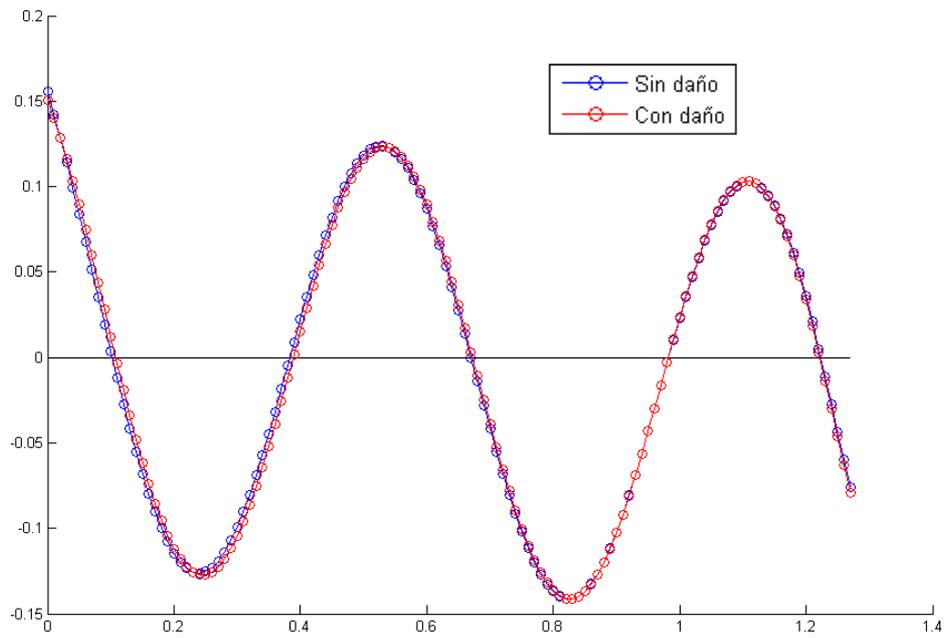


Figura 218. Cuarto modo de vibración. Modelo numérico suavizado. Daño borde

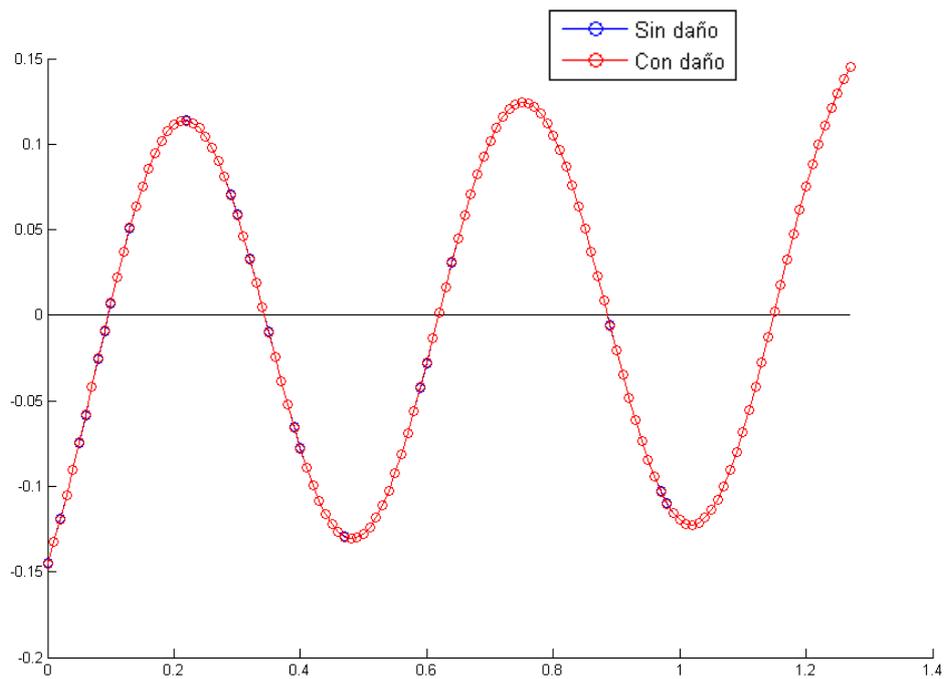


Figura 219. Quinto modo de vibración. Modelo numérico suavizado. Daño borde

No se aprecia cambios en los modos, así que es imposible sacar conclusiones con este método.

## Variación de la matriz de flexibilidad y rigidez

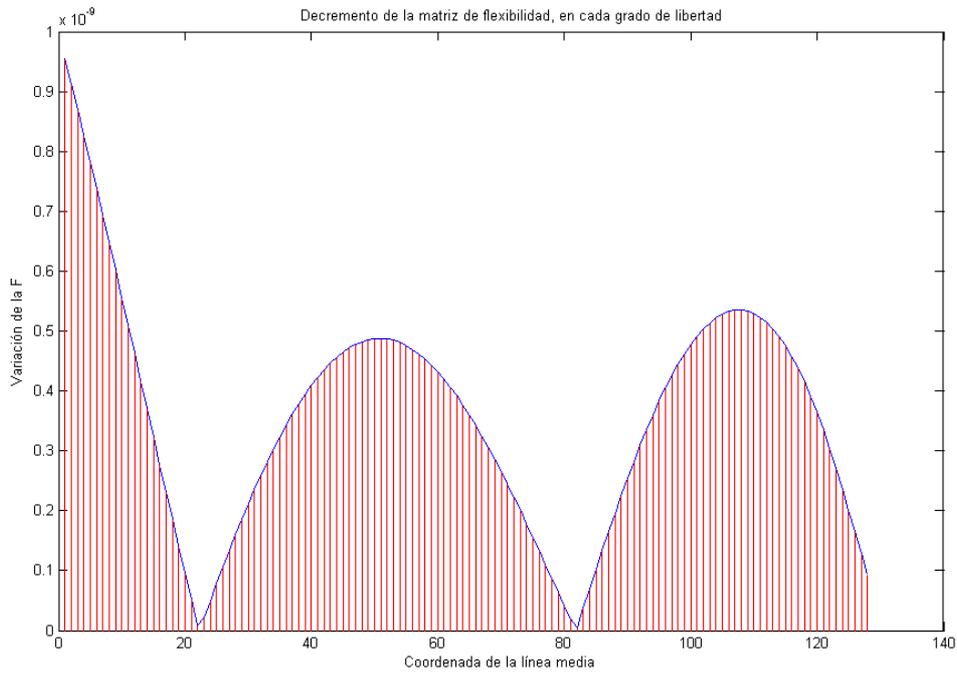


Figura 220. Variación de la matriz de flexibilidad. Modelo numérico suavizado. Daño borde

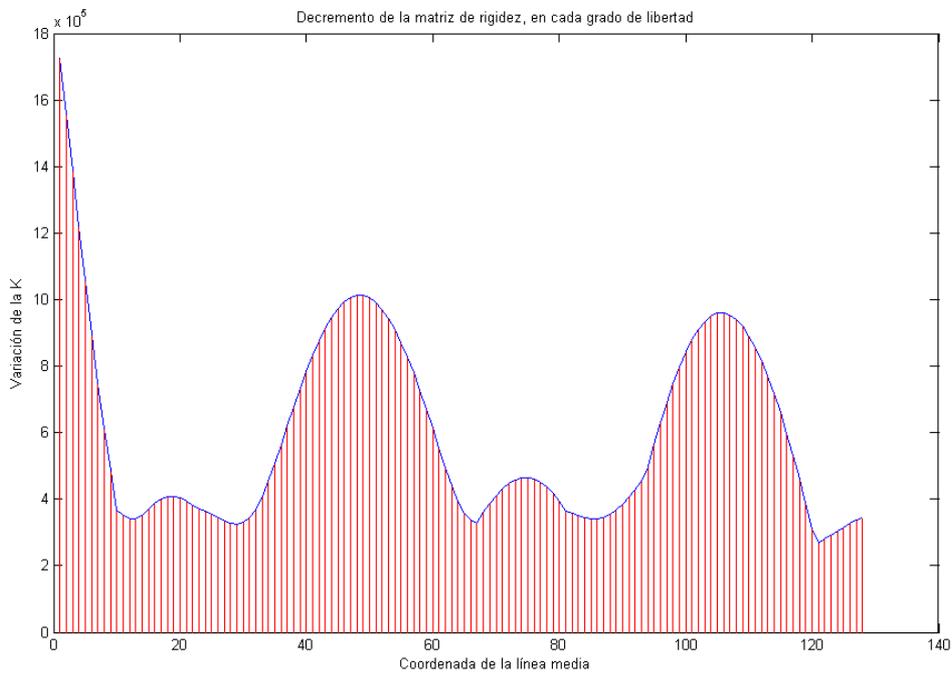


Figura 221. Variación de la matriz de rigidez. Modelo numérico suavizado. Daño borde

La forma que presenta la variación de la matriz de flexibilidad nos indica el daño en el borde. No sucede así con la matriz de rigidez, la cual no tiene fiabilidad observando los resultados previos.

## Método de Stubbs

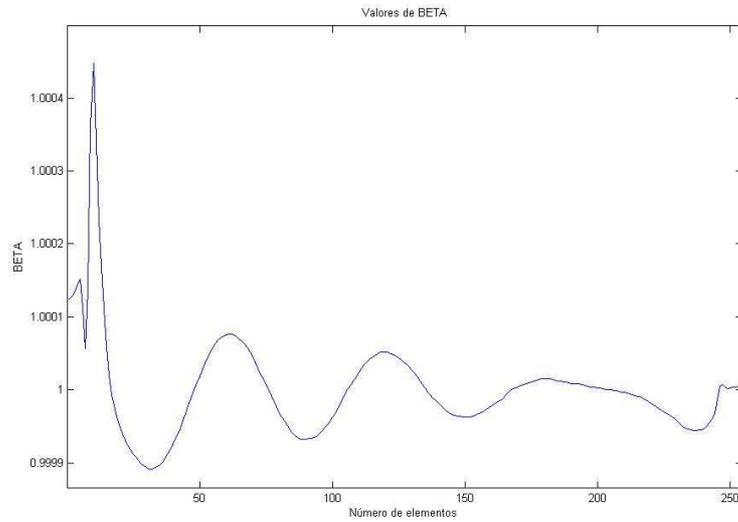


Figura 222. Parámetro  $\beta_p$ . Modelo numérico suavizado. Daño borde

Nos localiza el fallo en la coordenada 5.23 cm, es decir, próxima al borde.

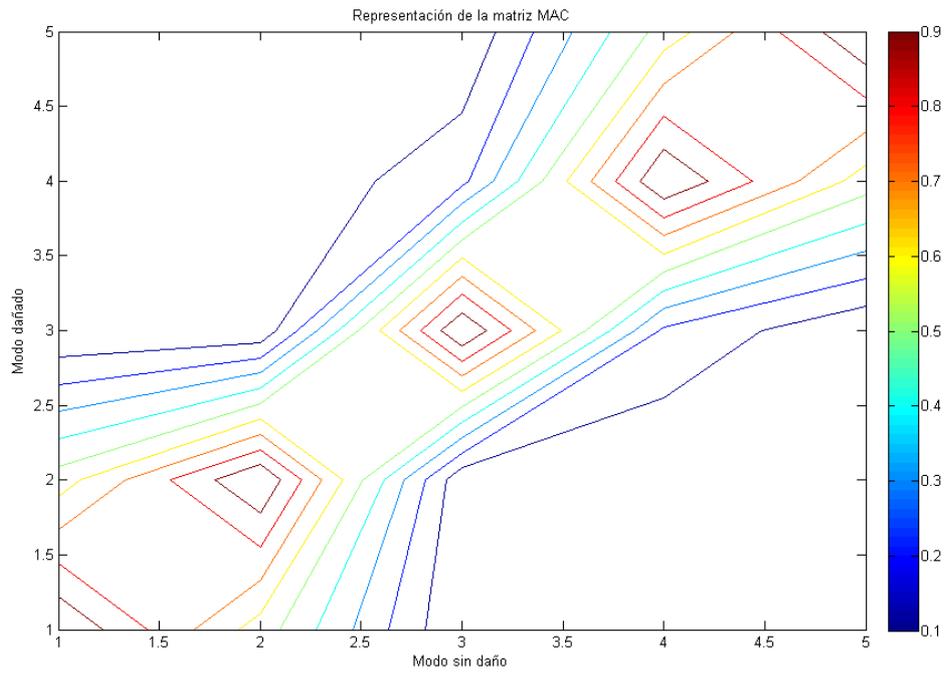
## Cambio en la curvatura de los modos

Nº de modo de vibración	Variación de curvatura	Posición (cm)
1	0.001	83.17
2	0.10	4.48
3	0.22	7.97
4	6.28	4.48
5	0.24	6.97

Tabla 35. Variación de la curvatura. Modelo numérico suavizado. Daño borde

Excepto para el primer modo, los demás rondan el borde, donde se encuentra la grieta.

## MAC



*Figura 223. Representación del MAC. Modelo numérico suavizado. Daño borde*

El método nos dice que existen variaciones entre las dos vigas, intacta y dañada, por lo que nos informa de este daño,

#### 4.1.8. Conclusiones

A continuación, se muestran unas tablas a modo de resumen de todos los resultados obtenidos en todos los análisis presentes en el apartado.

RESULTADOS SOBRE MODOS EXPERIMENTALES							
Método de detección y/o localización de daño	DAÑO 0.50 L			DAÑO 0.25 L			DAÑO BORDE
	LEVE	MEDIO	MÁXIMO	LEVE	MEDIO	MÁXIMO	MÁXIMO
Variación de frecuencias naturales	X	✓	✓	X	✓	✓	✓
Variación de modos de vibración	✓	✓	✓	X	✓	✓	X
Variación de la matriz de flexibilidad	X	✓	✓	X	✓	✓	X
Variación de la matriz de rigidez	X	X	X	X	X	X	X
Método de Stubbs	✓	X	✓	X	X	X	X
Cambio en la curvatura de los modos	✓	X	✓	X	X	X	✓
MAC	X	X	X	X	X	✓	✓

Tabla 36. Resultados modelo experimental

Podemos sacar las siguientes conclusiones:

- Mientras más severo sea el daño mejor se va a identificar el fallo según la variación de las frecuencias y los modos a los que están asociadas.
- Para la configuración de daño 0.25L leve, ningún método es capaz de detecta el daño.
- El método de las diferencias de las matrices de flexibilidad nos ofrece buenos resultados para fallos lejos del borde. Sin embargo, la variación en la matriz de rigidez no nos aporta ninguna solución lógica, por lo que se desecha este método para este estudio.
- El método Stubbs falla en todo los casos excepto para el daño en 0.5L en las severidades máximas y leves. Son resultados muy insuficientes.
- El análisis según el cambio de curvaturas no ofrece buenos resultados en general.
- La aplicación del MAC sólo nos es útil para el daño en el borde y un daño máximo en la configuración de 0.25L.

RESULTADOS SOBRE MODOS EXPERIMENTALES DESPUÉS DEL SUAVIZADO							
Método de detección y/o localización de daño	DAÑO 0.50 L			DAÑO 0.25 L			DAÑO BORDE
	LEVE	MEDIO	MÁXIMO	LEVE	MEDIO	MÁXIMO	MÁXIMO
Variación de frecuencias naturales	X	✓	✓	X	✓	✓	✓
Variación de modos de vibración	✓	✓	✓	X	✓	✓	X
Variación de la matriz de flexibilidad	X	✓	✓	X	✓	✓	X
Variación de la matriz de rigidez	X	X	X	X	X	X	X
Método de Stubbs	X	✓	✓	X	✓	✓	✓
Cambio en la curvatura de los modos	X	✓	✓	X	✓	✓	X
MAC	X	X	X	X	X	✓	✓

Tabla 37. Resultados modelo experimental después del suavizado

Se llega a las siguientes conclusiones:

- Observamos, que gracias al previo suavizado de los modos de vibración, el método Stubbs da muy buenos resultados. Solo para las severidades leves el método falla, por lo que la aplicación de este método solo es útil para daños de una intensidad elevada.

- El criterio tomado para la aceptación, o no, en el método de cambio en la curvatura de los modos, se basa en que si para 2 o más modos de vibración se ha localizado la grieta con gran aproximación, el método funciona satisfactoriamente. Así, se puede comprobar a la vista de los resultados, que para los casos de severidad leve y daño en el borde, el método no cumple dicho criterio.

De esta forma, se necesita un daño medio o mayor y lejano a bordes, para que dicho método funcione.

MODELO NUMÉRICO							
Método de detección y/o localización de daño	DAÑO 0.50 L			DAÑO 0.25 L			DAÑO BORDE
	LEVE	MEDIO	SEVERO	LEVE	MEDIO	SEVERO	
Variación de frecuencias naturales	X	✓	✓	X	✓	✓	✓
Variación de modos de vibración	X	✓	✓	X	✓	✓	X
Variación de la matriz de flexibilidad	✓	✓	✓	X	✓	✓	✓
Variación de la matriz de rigidez	X	X	X	X	X	X	X
Método de Stubbs	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Cambio en la curvatura de los modos	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
MAC	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Tabla 38. Resultados modelo numérico

De la tabla de resultados podemos decir que:

- Para una severidad leve, las frecuencias naturales de la viga dañada varía muy levemente, por lo que no es posible asegurar si existe daño. Lo mismo ocurre para la variación de los modos de vibración para esta severidad.

- En la configuración de daño en el borde, los modos de vibración dañados tampoco presentan grandes variaciones frente a los intactos.
- Los demás métodos analizados, exceptuando el referido a la matriz de rigidez, obtienen resultados muy satisfactorios.

Los resultados obtenidos por el modelo numérico son muy similares a los experimentales, así que los ensayos que se han realizado se han hecho de una manera correcta.

La gran diferencia entre ambos es el parámetro MAC, el cual resulta insuficiente para el modelo experimental.

Resulta obligatorio, a la vista de los resultados, tener que realizar un previo suavizado a los modos de vibración experimentales de forma que, aquellos métodos que se basan en analizar la curvatura de éstos (Stubbs y el método de la variación de la curvatura de los modos de vibración), funcionen correctamente.

## **4.2 Método híbrido basado en transformada Wavelet**

Los resultados que obtenemos mediante la transformada Wavelet corresponden a una serie de gráficas obtenidas a partir de una programación en MATLAB del método descrito en los fundamentos teóricos.

El programa, utiliza como datos de entrada los modos de vibración y las frecuencias naturales de la estructura dañada y de referencia. Permite, una vez introducidos los datos, realizar una reducción muestral de los modos y una interpolación posterior por spline de éstos o, por el contrario, un suavizado como el que se realizó en DIBEMA. Posteriormente se aplica una extensión antisimétrica a los modos para evitar efectos de bordes.

Una vez adaptados los datos según los pasos previos, el programa aplica la transformada Wavelet.

Uno de los parámetros interesante a analizar es la reducción muestral, es decir, el número de muestras con el que vamos a trabajar si no interesa trabajar con todos. Así, se detallará un breve análisis sobre este parámetro y a continuación se expondrán los resultados aplicados a las vigas IPE100 experimentales y a los modelos numéricos.

### **4.2.1. Variación del número de muestras**

Un número excesivo de muestras puede resultar inútil, puesto que puede conseguirse la misma información con menor número de puntos y así reducir tiempo computacional. Sin embargo, como es obvio, un escaso número de muestras elimina demasiada información que necesitamos para averiguar la localización de cualquier daño.

Representamos los resultados de las configuraciones de daño en 0.5L y 0.25L para las severidades máximas y medias del modelo experimental, variando el número de muestras y estudiaremos las soluciones obtenidas.

- Daño 0.5L

### Severidad máxima

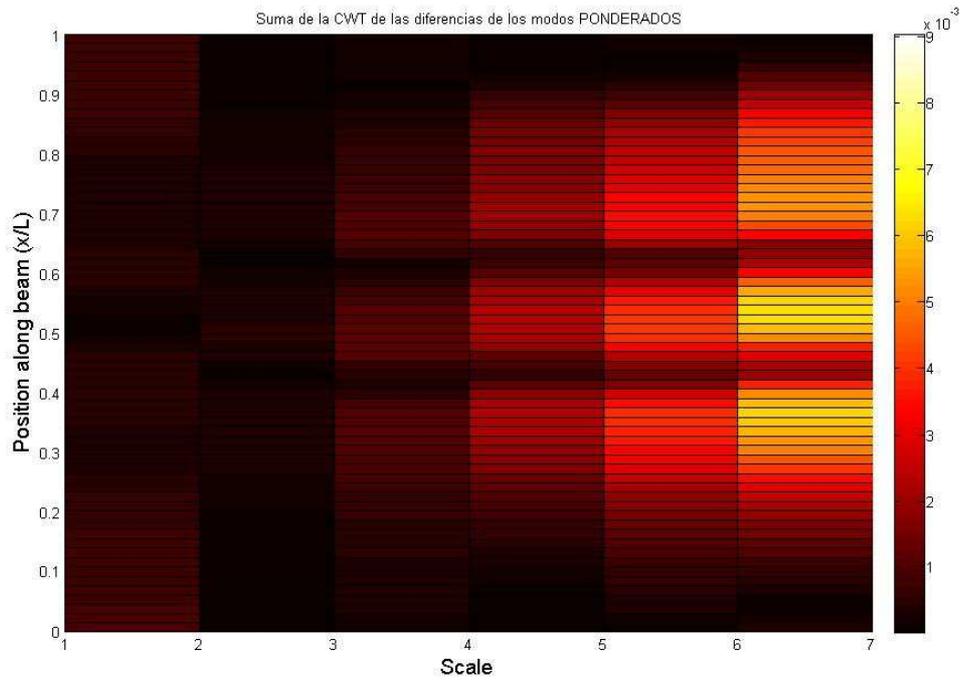


Figura 224. Tamaño en la reducción=12. Daño 0.5L máx.

Podemos observar que no es posible localizar el fallo con precisión al existir diversas zonas candidatas a albergar éste.

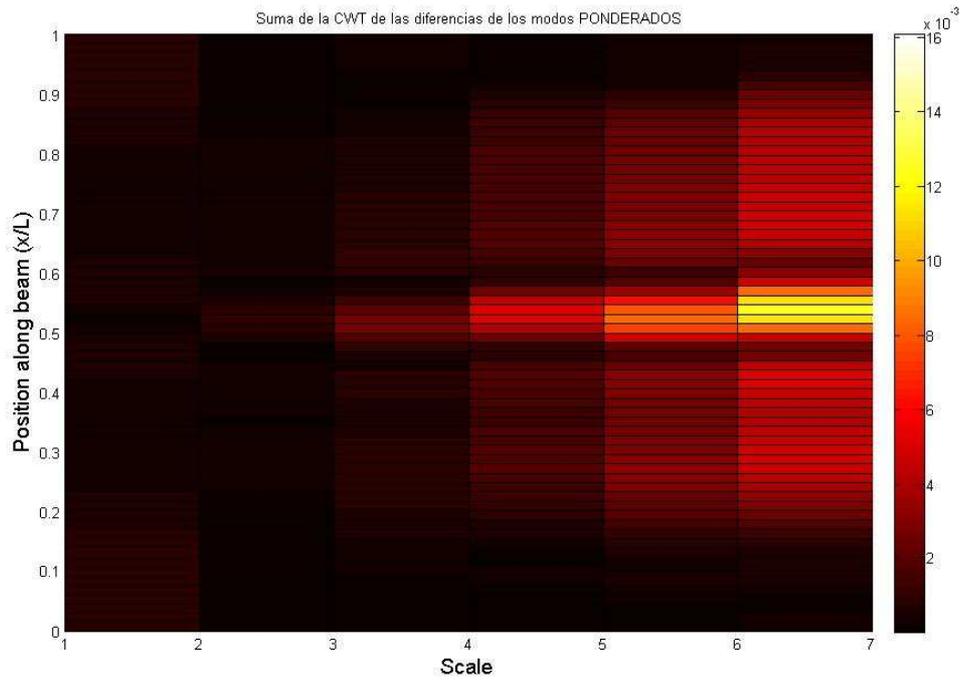


Figura 225. Tamaño en la reducción=13. Daño 0.5L máx.

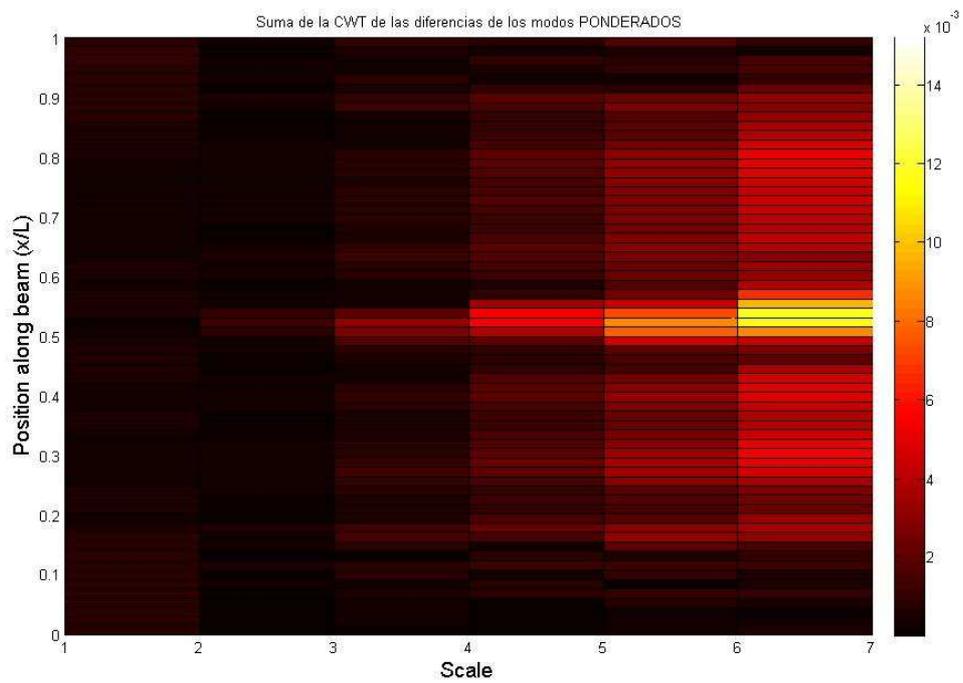
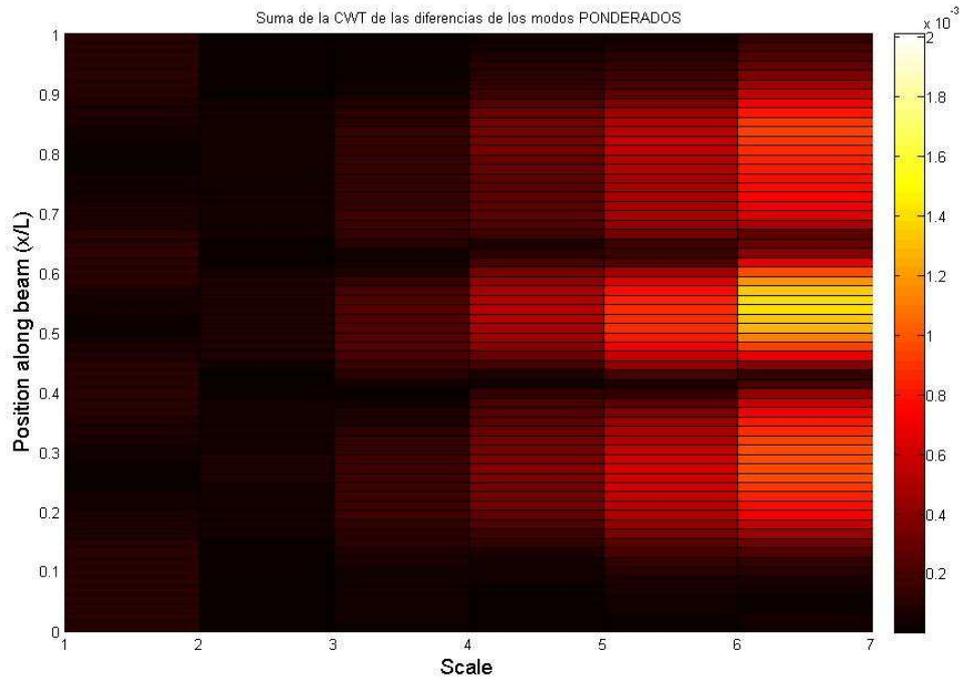


Figura 226. Tamaño en la reducción=32. Daño 0.5L máx.

Podemos observar como a partir de muestras de tamaño 13, el daño es fácilmente identificable.

### Severidad media



*Figura 227. Tamaño en la reducción=12. Daño 0.5L medio*

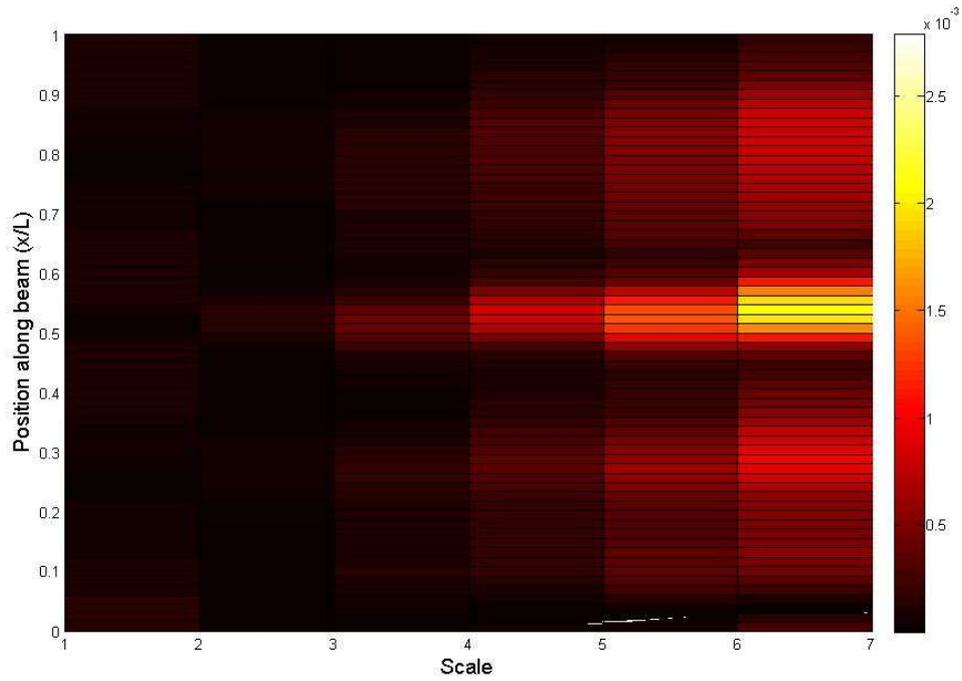


Figura 228. Tamaño en la reducción=13. Daño 0.5L medio

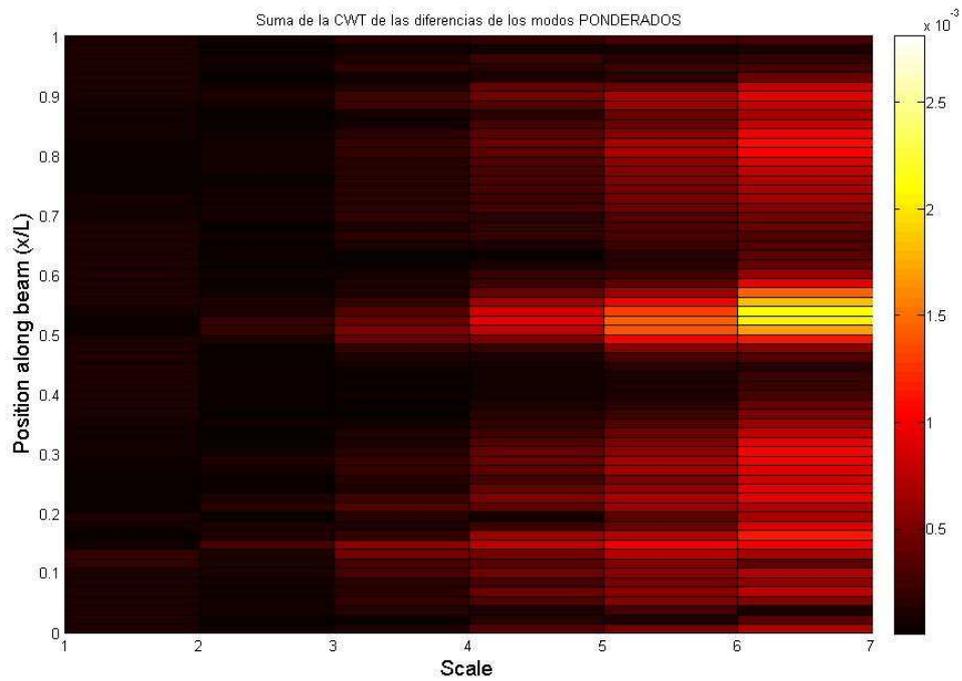


Figura 229. Tamaño en la reducción=32. Daño 0.5L medio

Al igual que con severidad máxima, el daño se identifica fácilmente a partir de un tamaño reducción de 13 puntos

- Daño 0.25L

### Severidad máxima

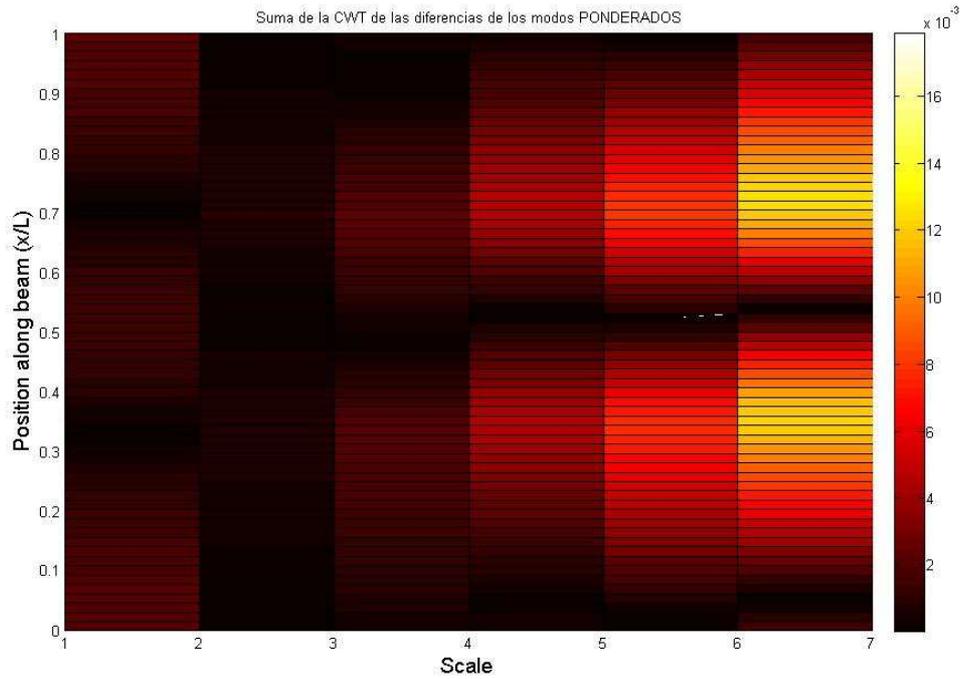


Figura 230. Tamaño en la reducción=4. Daño 0.25L máx.

Con cuatro puntos no se localiza el fallo.

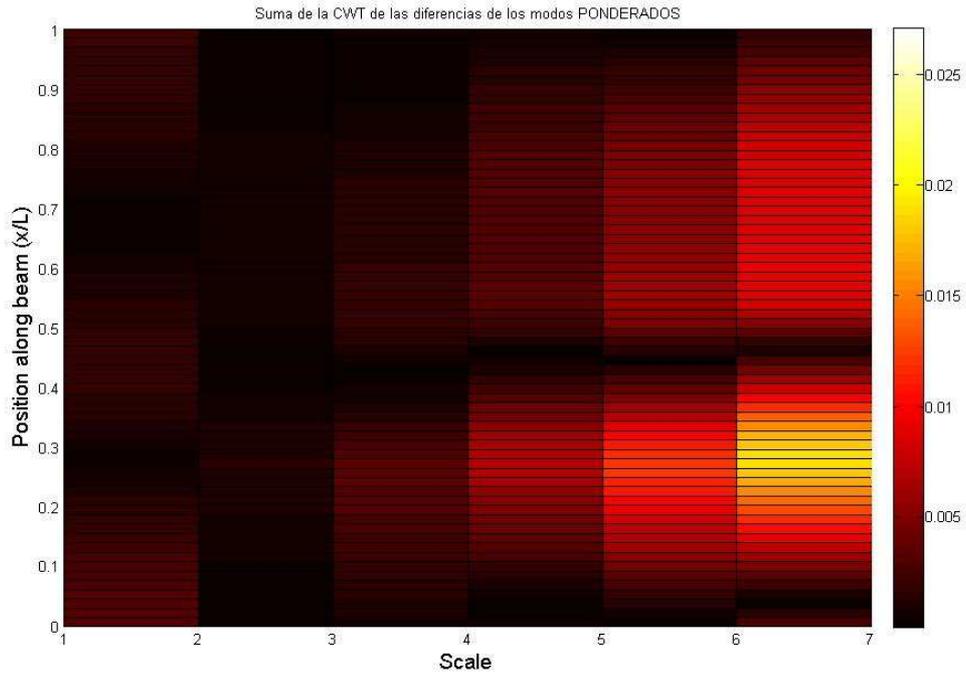


Figura 231. Tamaño en la reducción=5. Daño 0.25L máx.

Con 5 puntos, sin embargo, existe una zona alrededor de la sección 0.25L que es candidata a presentar un daño. Pero al ser la región tan amplia, no es posible localizar con exactitud la grieta.

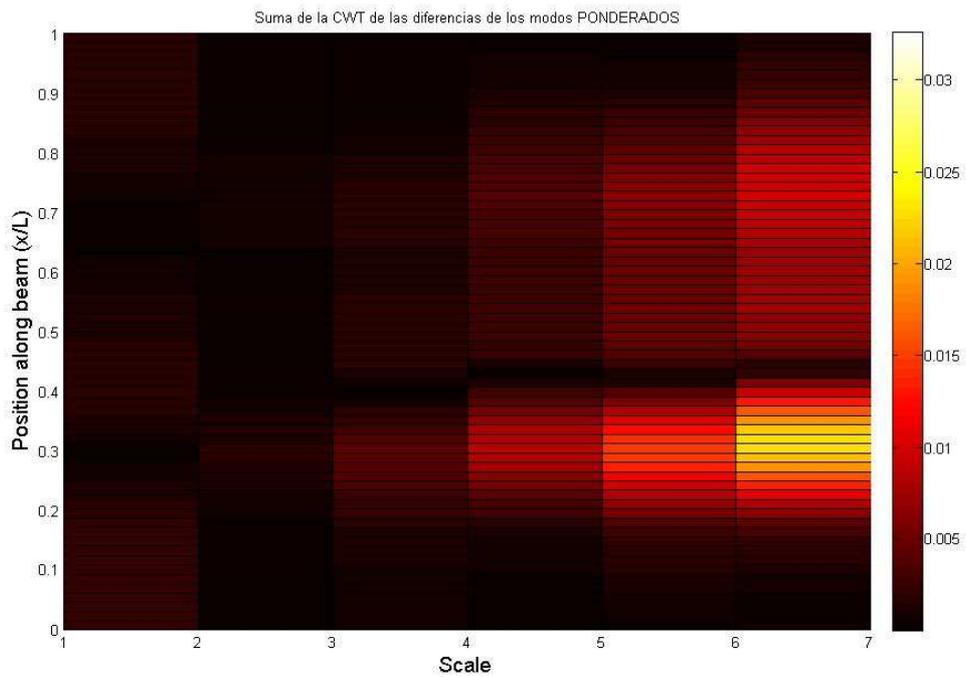


Figura 232. Tamaño en la reducción=8. Daño 0.25L máx.

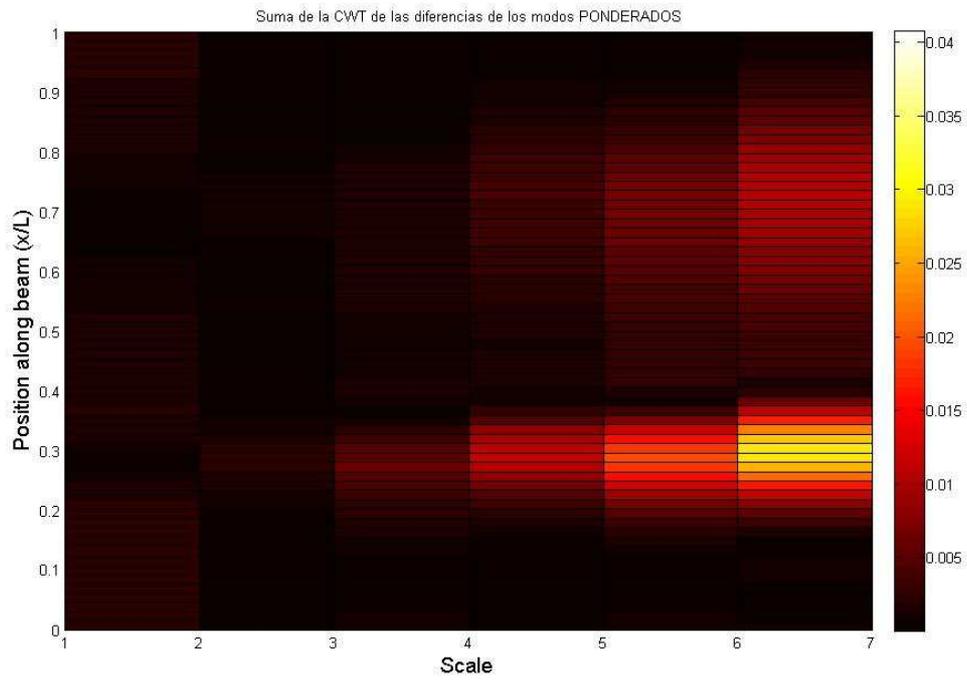


Figura 233. Tamaño en la reducción=12. Daño 0.25L máx.

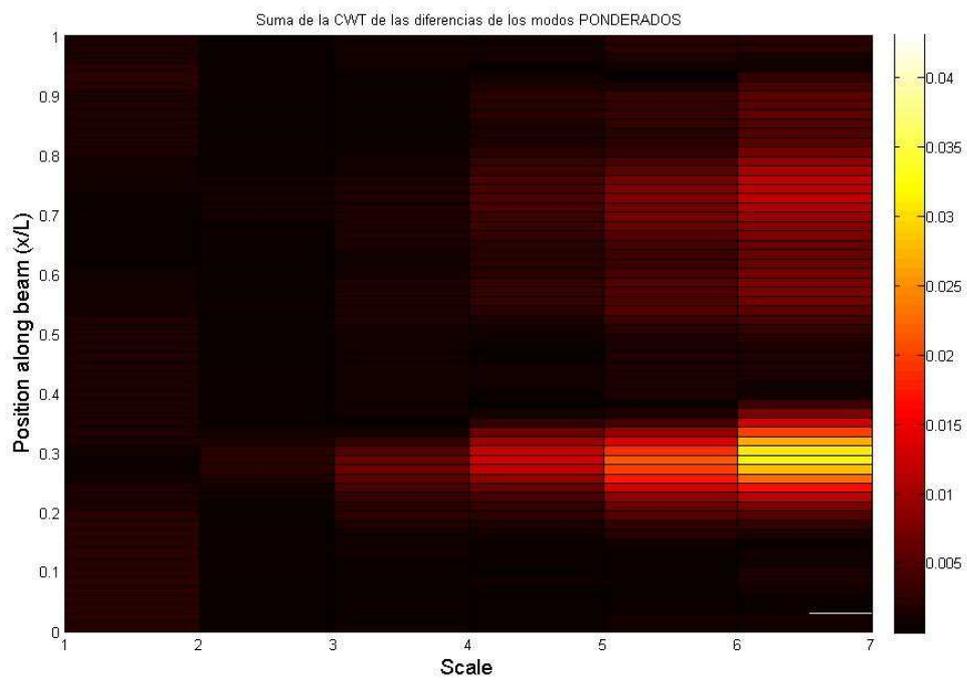


Figura 234. Tamaño en la reducción=16. Daño 0.25L máx.

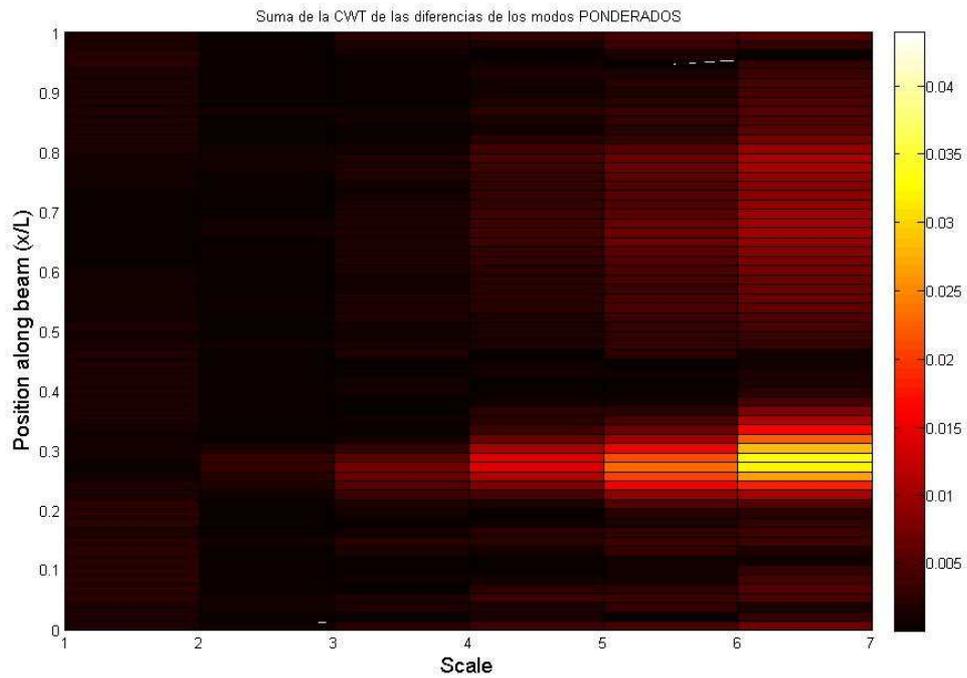


Figura 235. Tamaño en la reducción=32. Daño 0.25L máx.

Observamos como a medida que aumentamos el número de puntos, mejor localizado que el daño. A partir de 12 muestras, queda bien acotado éste.

## Severidad media

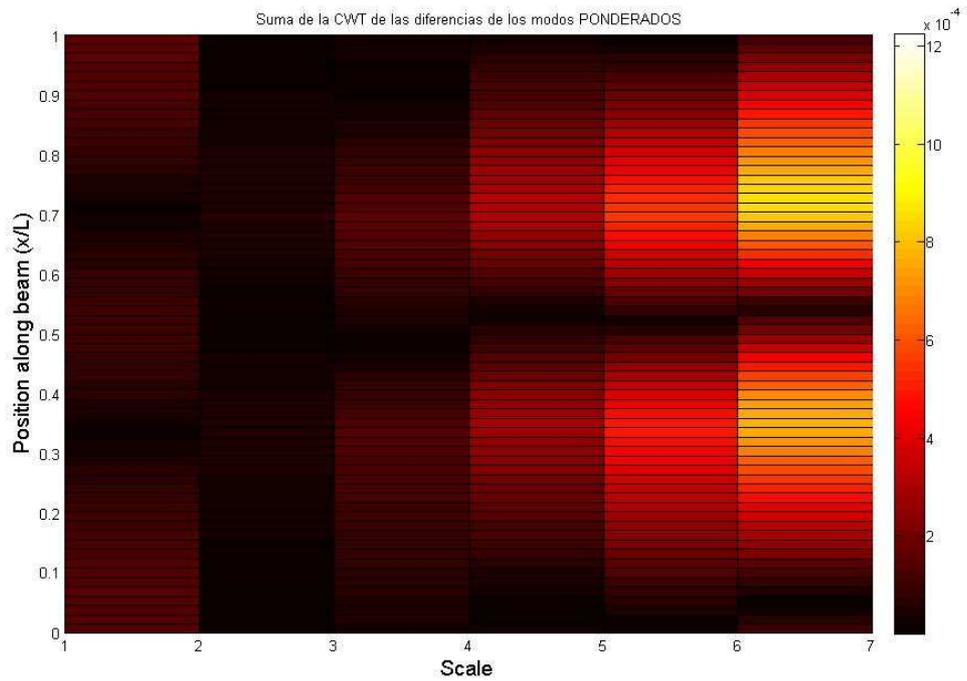


Figura 236. Tamaño en la reducción=4. Daño 0.25L medio

Con este tamaño no es posible encontrar la grieta.

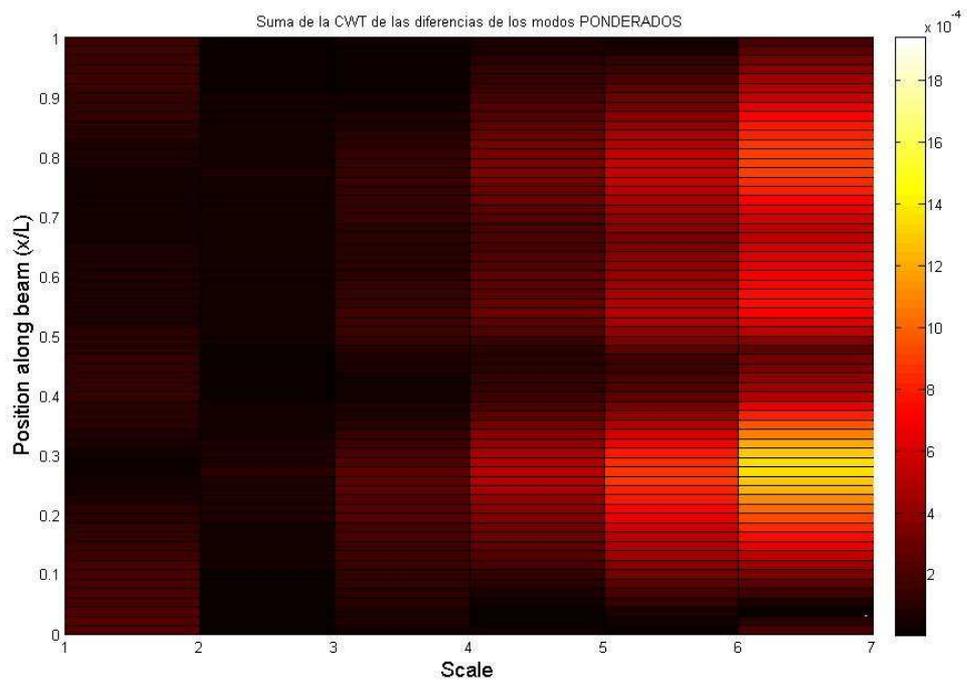


Figura 237. Tamaño en la reducción=5. Daño 0.25L medio

Con un tamaño de 5 puntos puede localizarse la zona del daño pero con escasa precisión

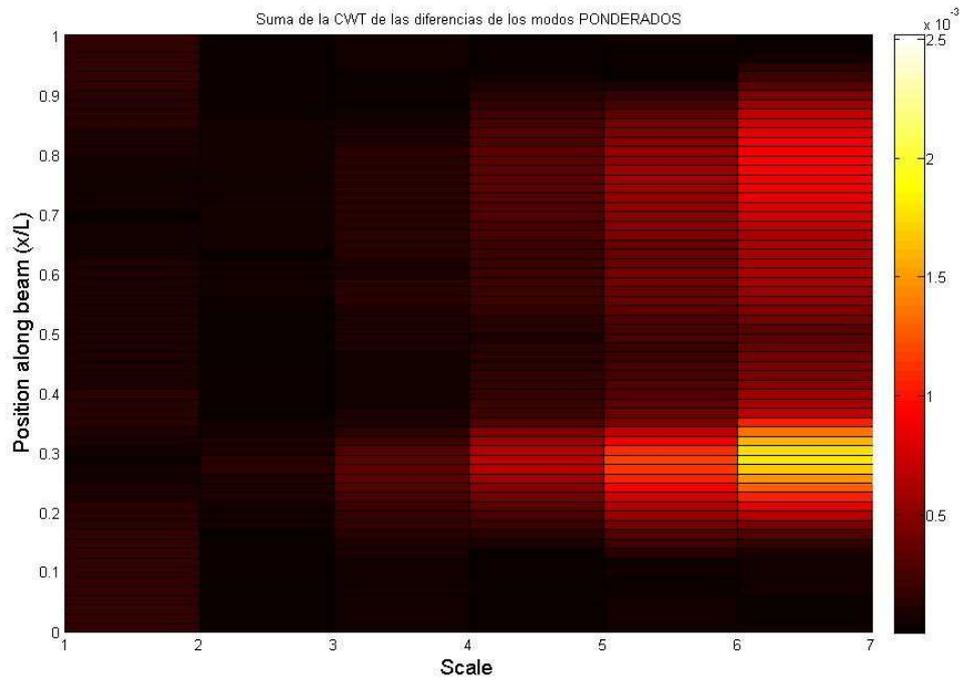


Figura 238. Tamaño en la reducción=12. Daño 0.25L medio

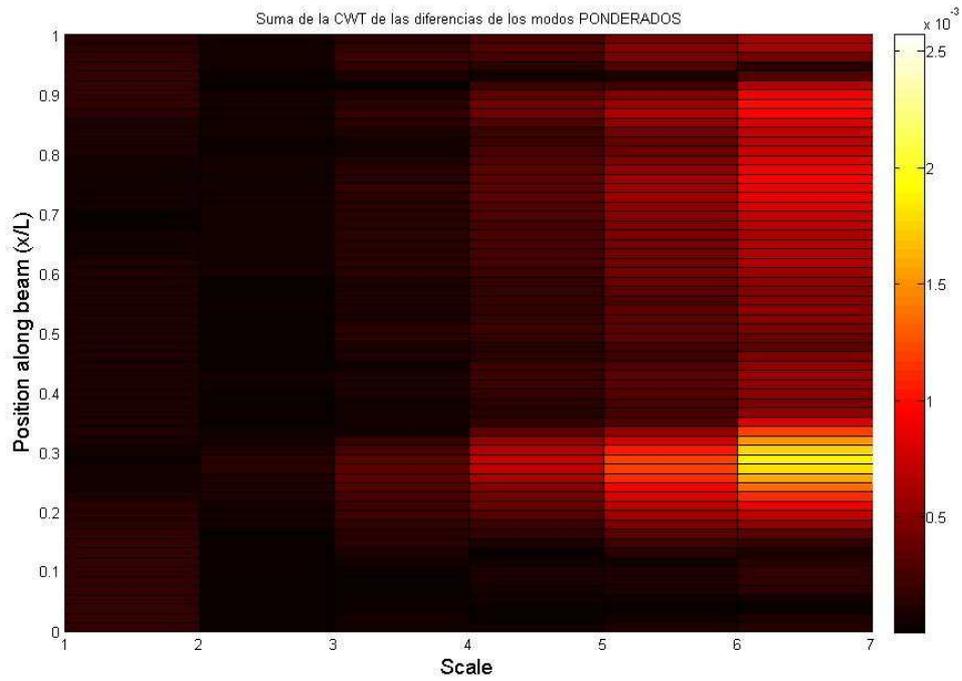


Figura 239. Tamaño en la reducción=16. Daño 0.25L medio

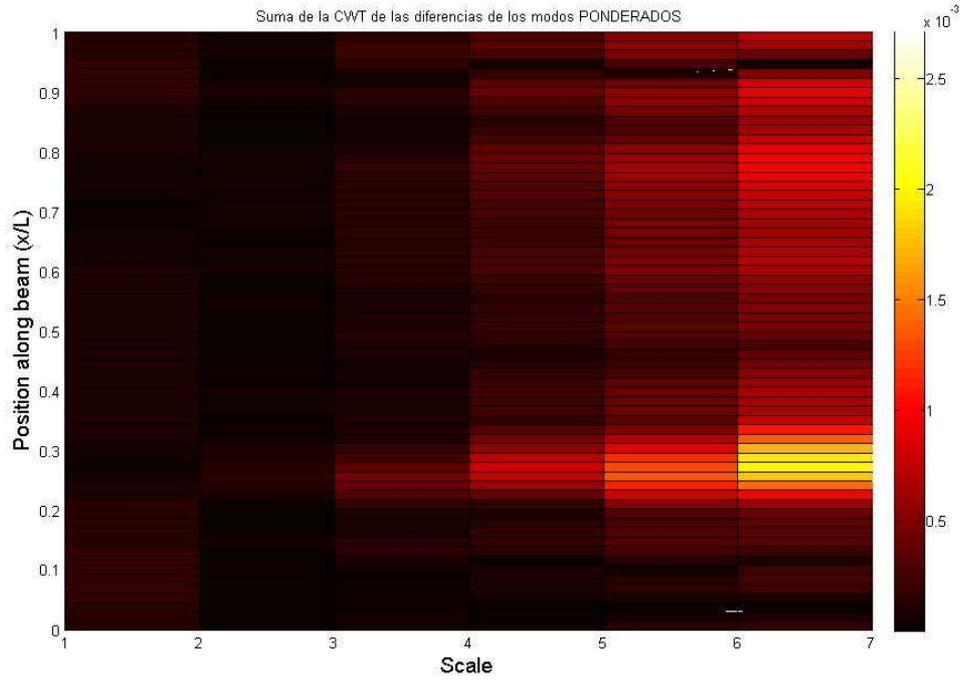


Figura 240. Tamaño en la reducción=18. Daño 0.25L medio

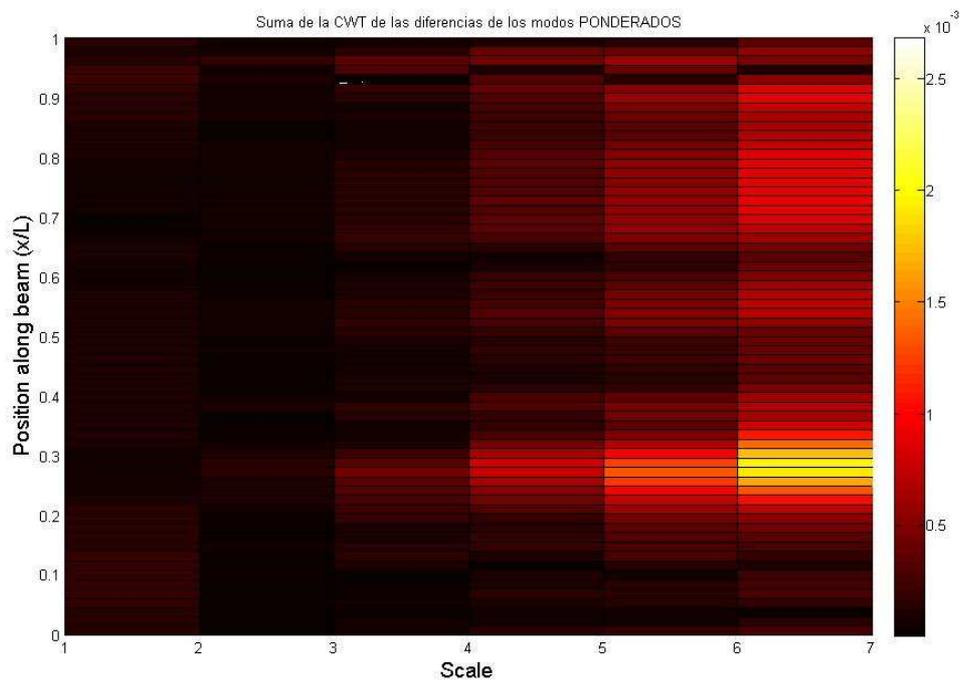


Figura 241. Tamaño en la reducción=32. Daño 0.25L medio

A partir de 12 muestras se puede localizar el daño con buena precisión. A partir de 18, la precisión es máxima y no se puede mejorar por mucho que se aumente el número de puntos.

## 4.2.2. Resultados sobre modos experimentales

Se exponen a continuación los resultados al aplicar el método a todas las configuraciones de daño vistas. No se ha aplicado ninguna reducción muestral sobre estos resultados y, en todos los casos, se ha realizado un suavizado de los modos en lugar de interpolar.

Para severidades máximas y medias los resultados deben de ser buenos para entender como satisfactorio el método. Para el caso de severidad leve y daño en borde existen ciertas limitaciones como ya ocurriera con DIBEMA.

### 4.2.2.1. Daño 0.5L

- Severidad máxima

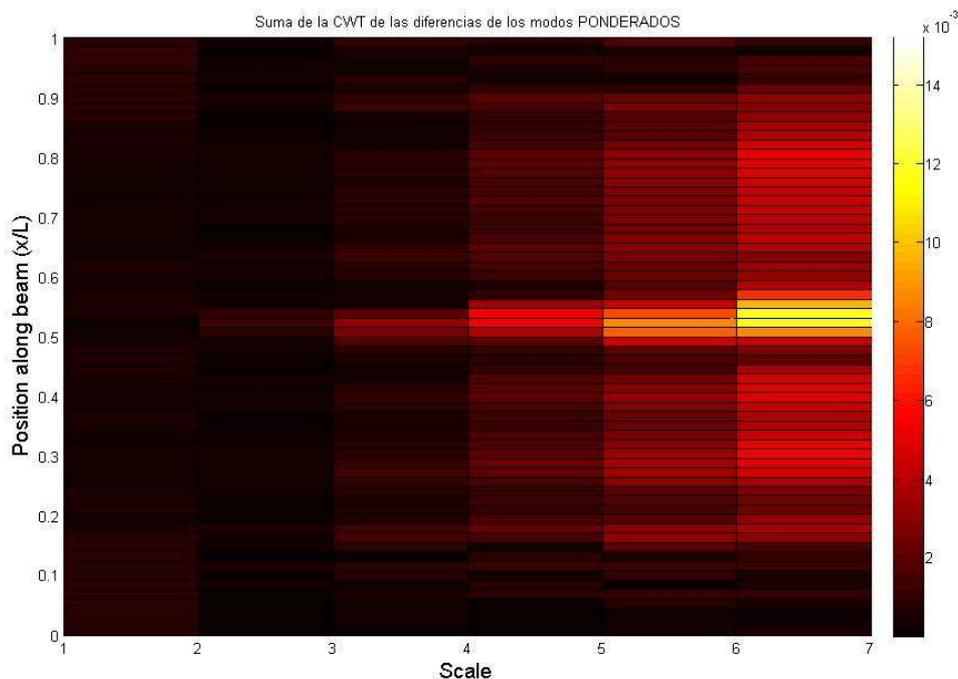


Figura 242. Resultado del método Wavelet. Daño 0.5L máx.

- Severidad media

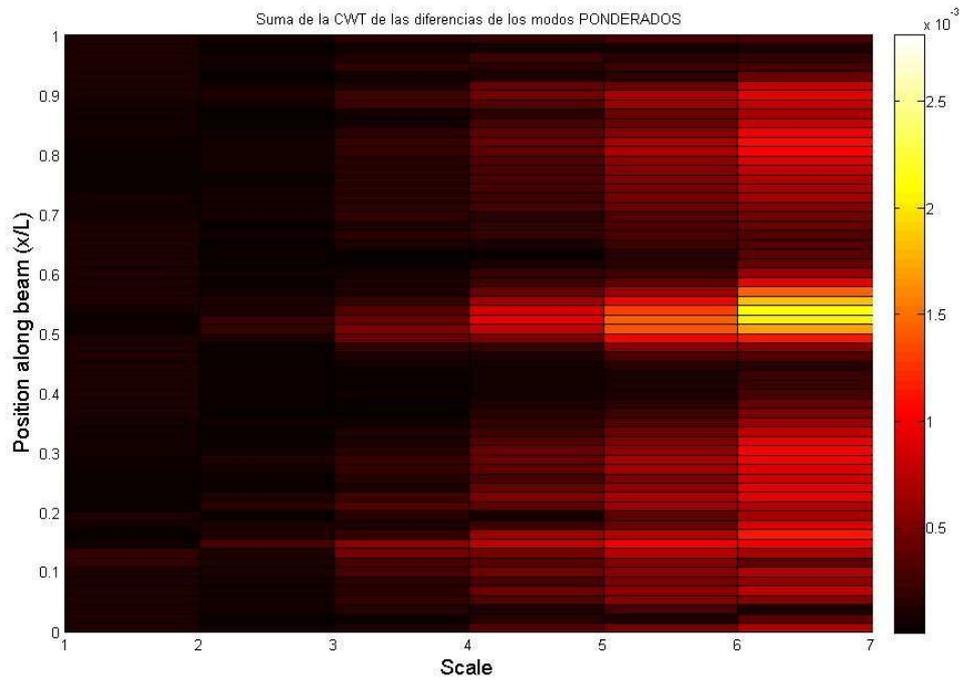


Figura 243. Resultado del método Wavelet. Daño 0.5L medio

- Severidad leve

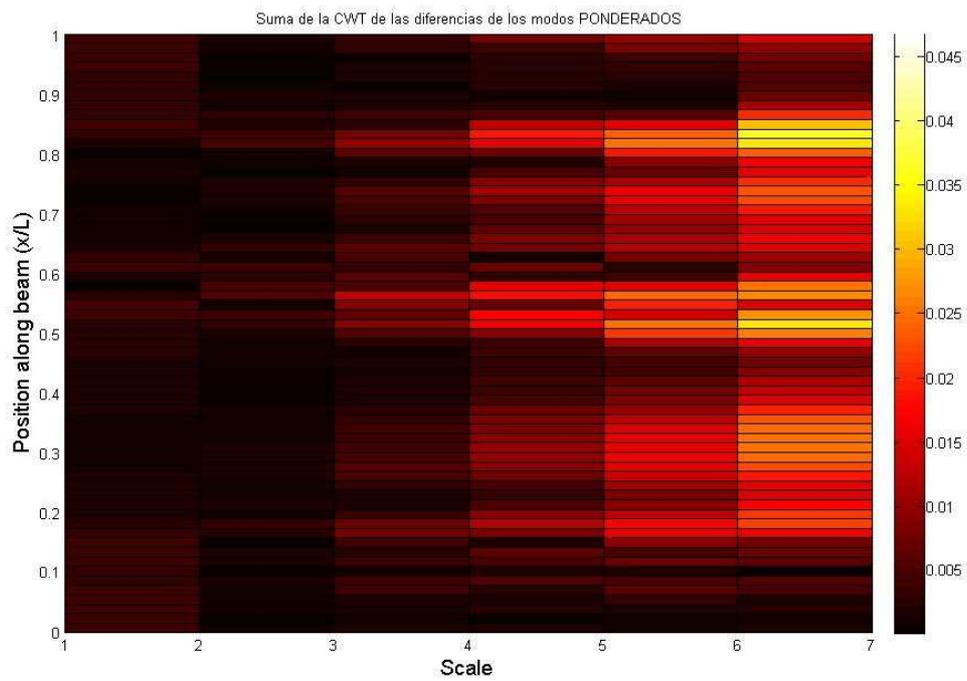


Figura 244. Resultado del método Wavelet. Daño 0.5L leve

Se observa que excepto para a severidad leve, el método localiza e fallo en la sección intermedia de a viga. Para esta última, aparecen otros defectos que confunden en la posición real de fallo.

#### 4.2.2.2. Daño 0.25L

- Severidad máxima

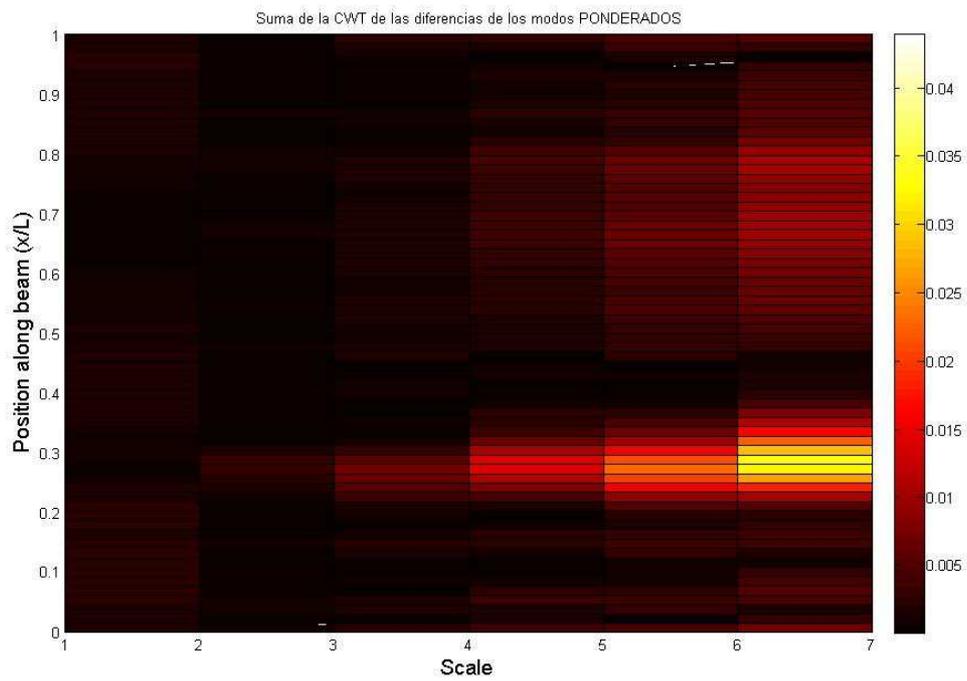


Figura 245. Resultado del método Wavelet. Daño 0.25L máx.

- .Severidad media

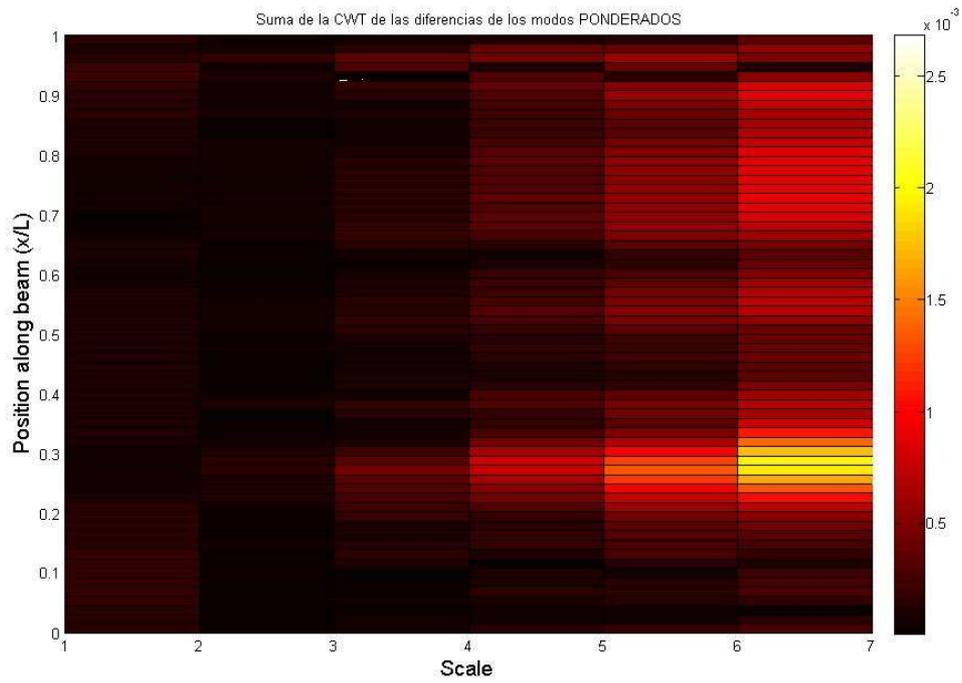


Figura 246. Resultado del método Wavelet. Daño 0.25L medio

- Severidad leve

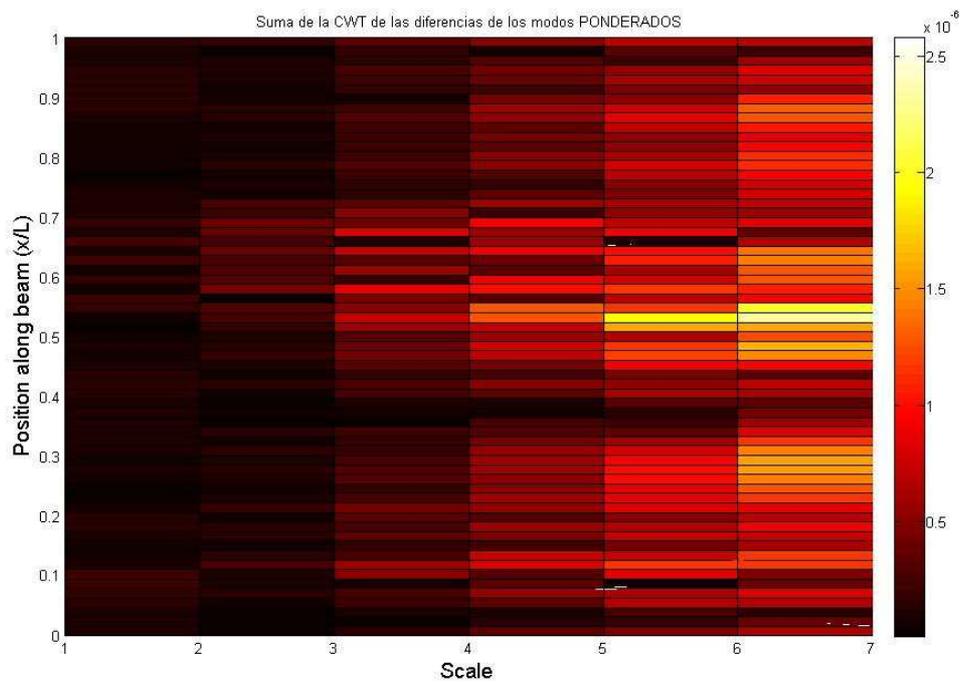


Figura 247. Resultado del método Wavelet. Daño 0.25L leve

De nuevo, para a severidad leve e fallo no es localizado en la posición correcta.

### 4.2.2.3. Daño borde

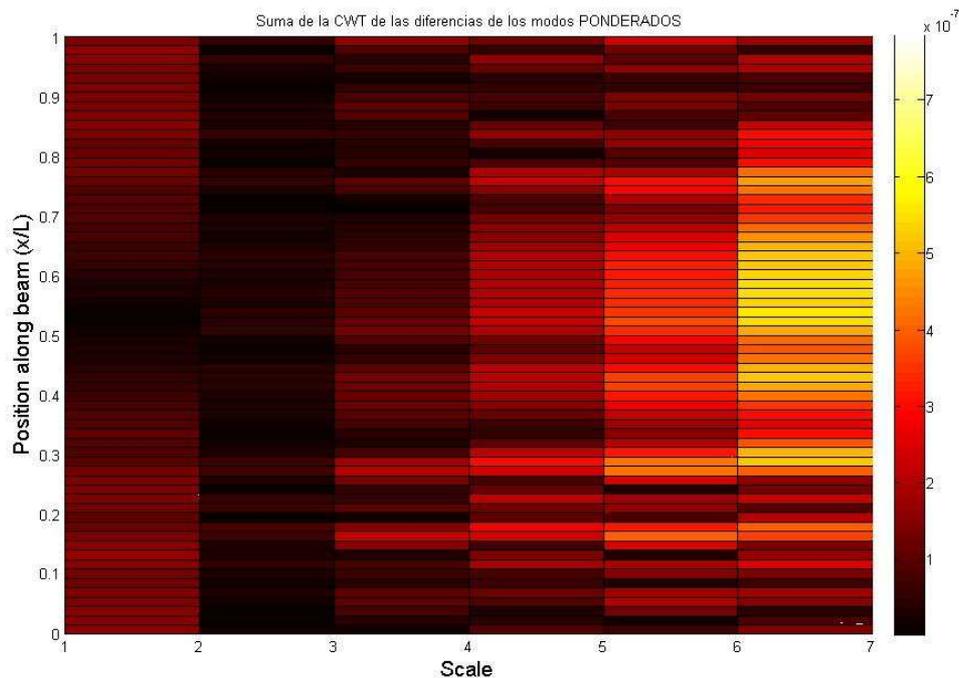


Figura 248. Resultado del método Wavelet. Daño borde

Para el daño en el borde es imposible predecir donde se encuentra el fallo mediante este método.

### 4.2.3. Resultados sobre modos numéricos

Aplicamos el método para los modos y frecuencias naturales provenientes del modelo numérico en el cual tenemos un total de 128 muestras. Al igual que en los modelos experimentales, no se ha realizado ninguna reducción muestral y los modos han sido suavizados.

### 4.2.3.1. Daño 0.5L

- Severidad máxima

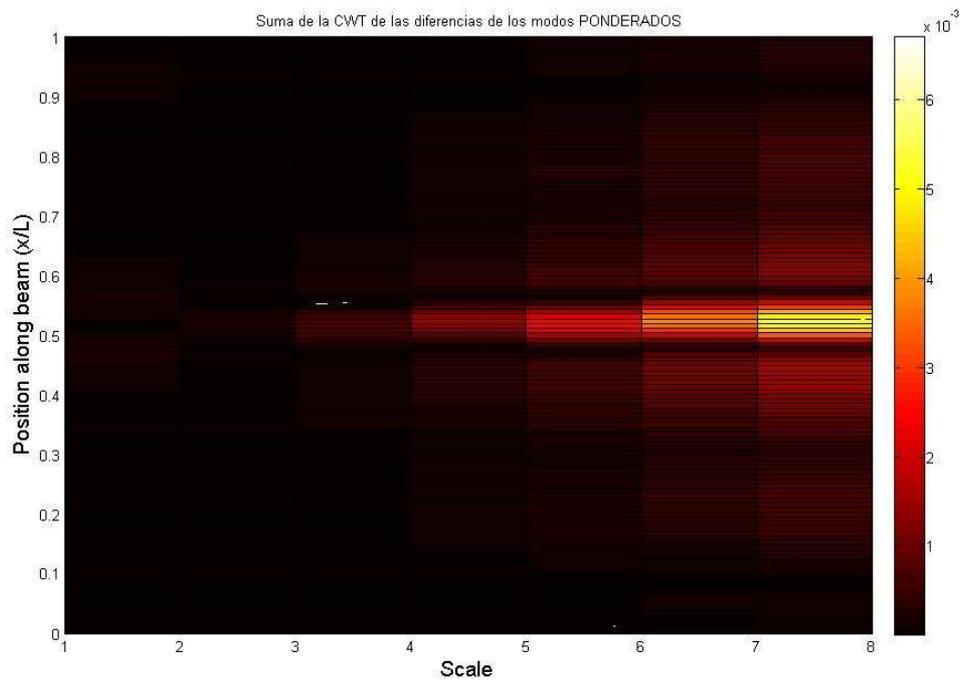


Figura 249. Resultado del método Wavelet. Modelo numérico. Daño 0.5L máx.

- Severidad media

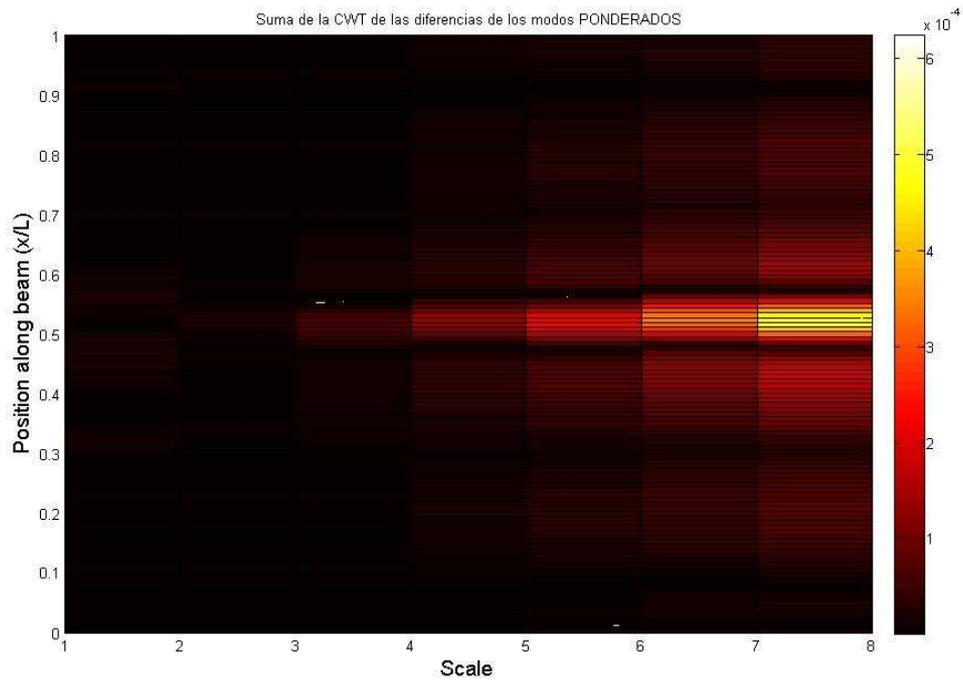


Figura 250. Resultado del método Wavelet. Modelo numérico. Daño 0.5L medio

- Severidad leve

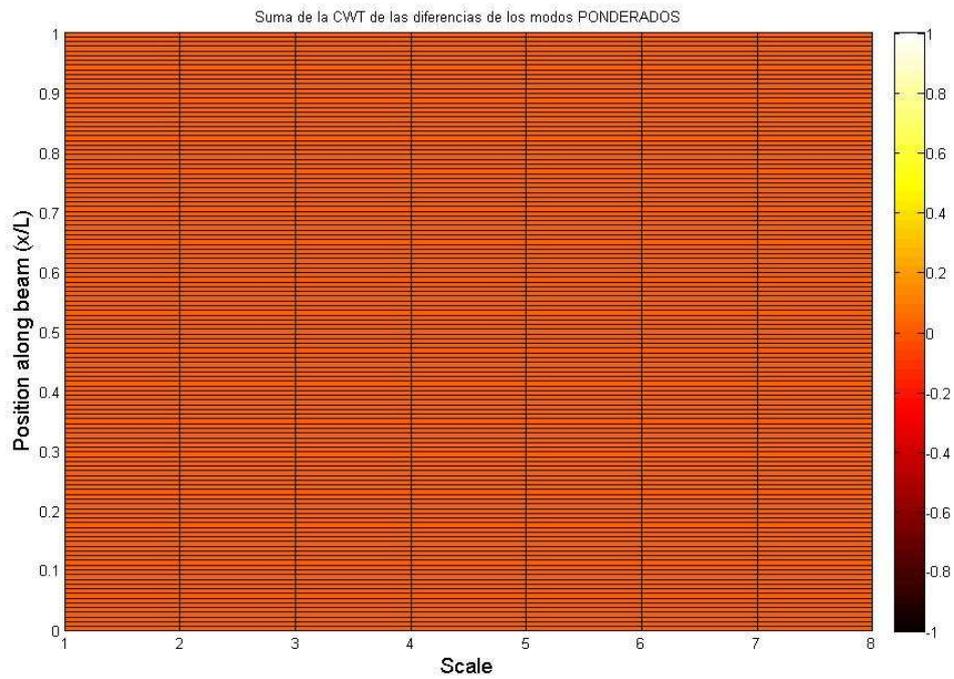


Figura 251. Resultado del método Wavelet. Modelo numérico. Daño 0.5L leve

Para las severidades máxima y media el método encuentra la grieta perfectamente localizada en la sección intermedia.

Para la severidad leve, sin embargo, no se encuentra el fallo. Esto es debido a que los modos de vibración dañados e intactos son muy parecidos y el método es incapaz de encontrar las irregularidades que la grieta introduce en la viga.

#### 4.2.3.2. Daño 0.25L

- Severidad máxima

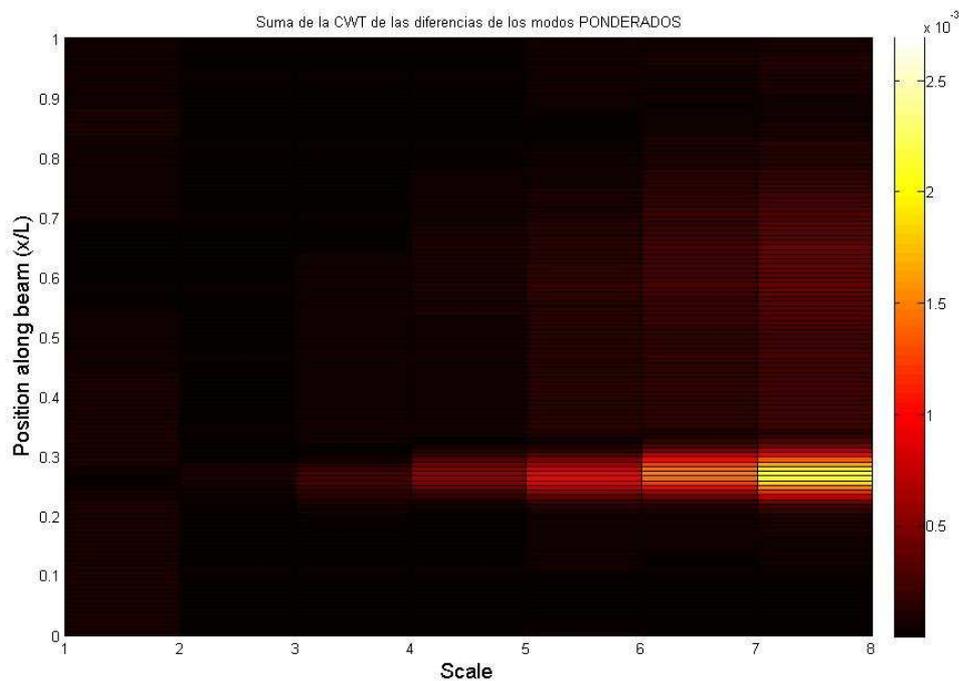


Figura 252. Resultado del método Wavelet. Modelo numérico. Daño 0.25L máx.

- Severidad media

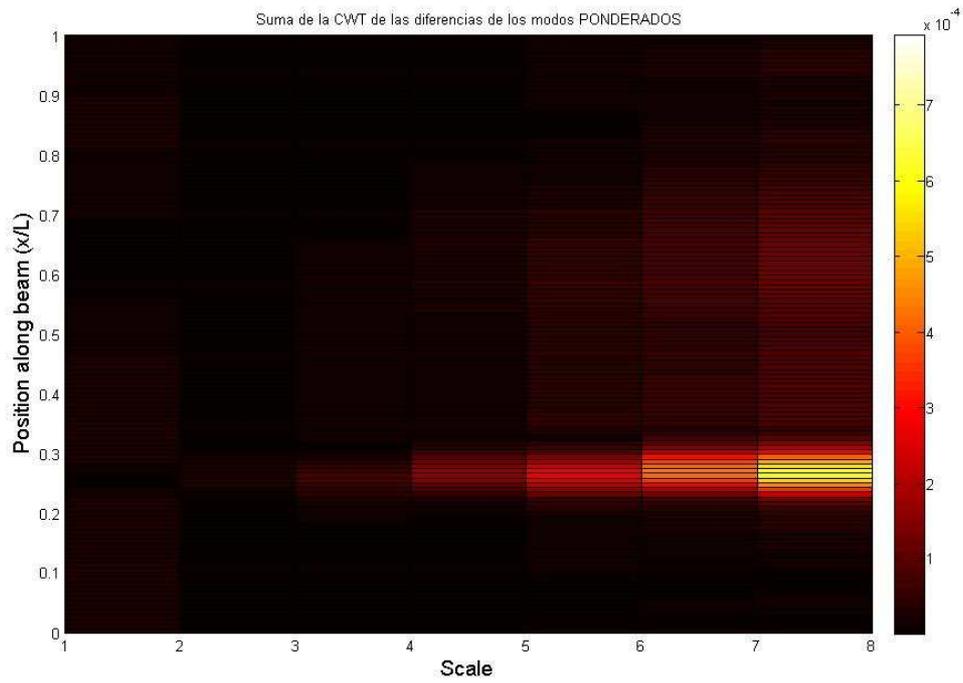


Figura 253. Resultado del método Wavelet. Modelo numérico. Daño 0.25L medio

- Severidad leve

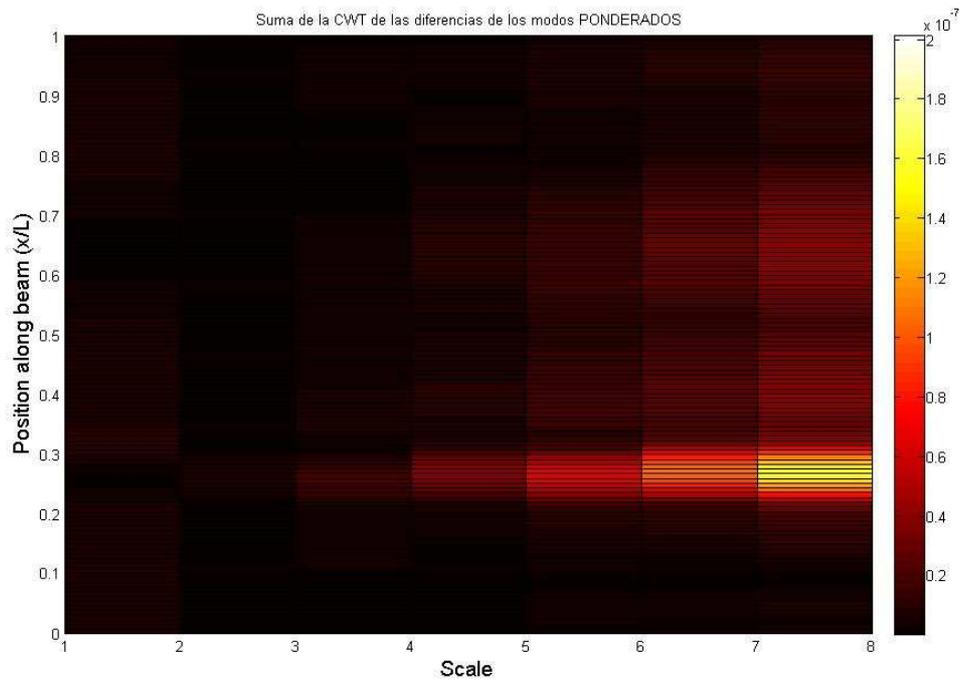


Figura 254. Resultado del método Wavelet. Modelo numérico. Daño 0.25L leve

Se localiza el fallo para todas las severidades a  $0.25L$ .

### 4.2.3.3. Daño borde

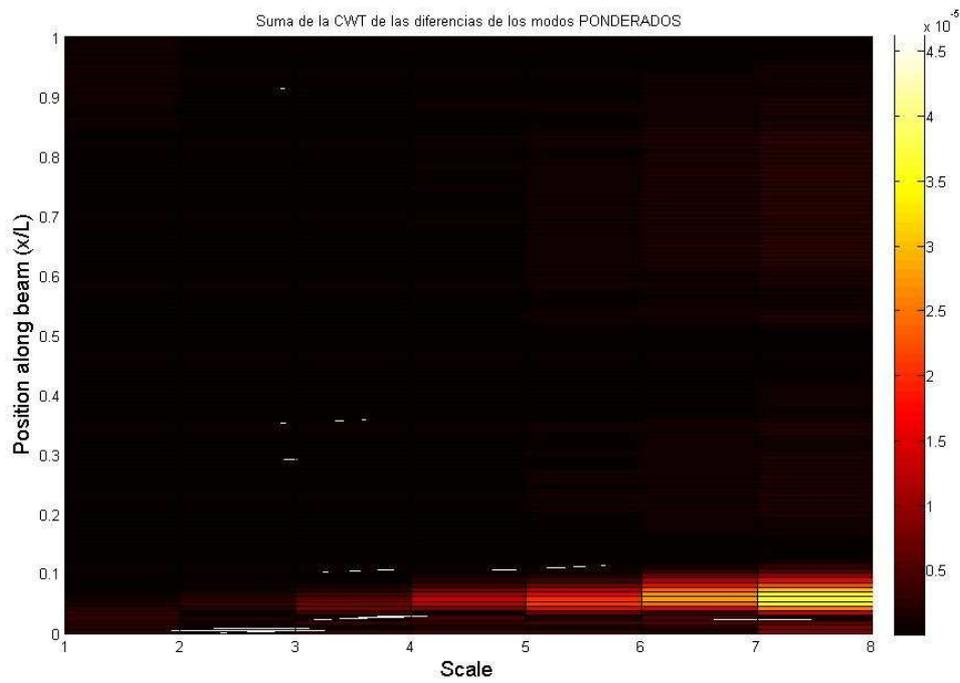


Figura 255. Resultado del método Wavelet. Modelo numérico. Daño borde

El método funciona para este daño en el extremo de la barra.

#### 4.2.4. Conclusiones

Vemos los resultados obtenidos por el análisis de la variación del número de muestras:

Modelo experimental	DAÑO 0.50 L			DAÑO 0.25 L			DAÑO BORDE
	LEVE	MEDIO	MÁXIMO	LEVE	MEDIO	MÁXIMO	
Cota inferior	-	12	12	-	5	5	-
Cota superior	-	13	13	-	12	12	-

*Tabla 39. Análisis de la variación del número de muestras*

Se denota, para cada severidad, el mínimo de muestras necesarias para identificar adecuadamente el daño en la estructura (cota inferior) y el número de muestras para el cual, una cifra mayor, no implica una gran mejora en los resultados (cota superior).

Se puede concluir que a mayor número, más preciso será la identificación del daño. Sin embargo, existe una cifra límite para el cual un aumento de puntos no mejora en exceso el método. Además, a más puntos, mayor será el costo experimental.

Por todo esto, las cifras del número de muestras indicadas en la tabla son las idóneas para este análisis por llegar a una situación de compromiso entre calidad y tiempo necesitado.

Los resultados obtenidos por la transformada Wavelet en los modelos experimentales y numéricos son satisfactorios o no según la siguiente tabla.

Modelo	DAÑO 0.50 L			DAÑO 0.25 L			DAÑO BORDE
	LEVE	MEDIO	SEVERO	LEVE	MEDIO	SEVERO	
Experimental	×	✓	✓	×	✓	✓	×
Numérico	×	✓	✓	✓	✓	✓	✓

*Tabla 40. Resultados del método del método híbrido basado en transformada Wavelet*

Para el caso experimental, cuando la severidad es leve, el método es insuficiente y no encuentra el fallo en la estructura. Lo mismo ocurre para el caso en que la grieta se encuentra en el borde.

Para el modelo numérico, sin embargo, sí encuentra el fallo en casi todas las severidades. Esto es debido a que este modelo es más perfecto y resulta más sencillo encontrar el fallo puesto que la única irregularidad que presenta la estructura es la grieta que buscamos.

## 5. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos avalan la eficacia de los métodos de detección de daños analizados en la presente memoria. Sin embargo, se debe de tener en cuenta algunos aspectos comentados que se describen a continuación:

- Durante el ensayo para la recogida de datos es necesario realizar excitaciones lo más limpias posibles. Si se produce rebotes durante el golpeo, se recomienda eliminar el experimento y comenzar de nuevo.
- Para la extracción de los parámetros modales mediante SPICE, el orden escogido de los polos para frecuencia natural va a influir significativamente en la calidad de los resultados. En una primera estimación, a mayor número de orden, mayor probabilidad de que los polos sean estables. Aun así, se recomienda realizar una breve visualización en el diagrama de estabilización que nos ofrece SPICE con el fin de no errar en la elección.
- El tamaño de la ventana temporal no influye significativamente, a menos que trabajemos con ventanas excesivamente pequeñas.
- Para los métodos de detección de daño que trabaje con las curvaturas de los modos de vibración (Stubbs y método de la variación de las curvaturas de los modos de vibración), es requisito imprescindible realizar previamente un suavizado a los modos para evitar irregularidades ajenas al daño.
- Los métodos clásicos de detección de daño (DIBEMA) se encuentran limitados para un daño leve en la estructura. En particular, para la localización del daño en 0.25L con esta severidad, DIBEMA no detecta el daño con ninguno de sus métodos en el modelo experimental antes y después del suavizado. Para el modelo numérico se detecta gracias a los métodos Stubbs, variación de las curvaturas de los modos y MAC.
- La metodología Wavelet no es eficaz para encontrar daños leves en el modelo experimental. Esto es debido a que se ve de igual manera afectada por otras irregulares que presenta la viga y originan perturbaciones que hacen imposible la localización del fallo por este método.
- Para el daño en el borde en el modelo experimental previamente suavizado, DIBEMA detecta y localiza el daño gracias a la variación de las frecuencias naturales, el parámetro MAC y al método Stubbs, siendo los demás métodos inútiles para esta configuración. A su vez, para el mismo daño en el modelo numérico, DIBEMA localiza la fisura mediante los mismos métodos anteriores y

mediante la variación de la matriz de flexibilidad y curvatura de los modos de vibración.

- El método híbrido es incapaz de detectar el daño en el borde para el modelo experimental.
- La variación de la matriz de rigidez no aporta información alguna sobre la existencia de daño en todos los casos.
- Los resultados obtenidos mediante los modelos experimentales y numéricos concuerdan y reafirman en la funcionalidad de los métodos estudiados.

## 6. DESARROLLOS FUTUROS

A continuación se exponen varios puntos que podrían ayudar a desarrollar los análisis descritos hasta ahora:

- Obtener los parámetros modales con otros sistemas de identificación distintos a “Combined Subspace Identification Method” mediante SPICE y compararlos con los obtenidos por éste.
- Realizar el ensayo con otras condiciones de contorno y analizar los métodos de detección de daños con los parámetros modales obtenidos.
- Ampliar el campo de aplicación de estos métodos a otros materiales distintos al acero.
- Aplicar los métodos a estructuras con múltiples daños y distintas severidades. Con un daño bien localizado los métodos funcionan si la severidad no es leve, sería interesante conocer los resultados para estructuras con más de un daño.

## 7. REFERENCIAS

- [1] FARRAR ET AL., 1996. Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: A literature review. Los Alamos National Laboratory. New Mexico, USA.
- [2] RYTTER, A., 1993. Vibration based inspection of civil engineering structures, ph. d. dissertation, department of building technology and structural engineering. Aalborg University, Denmark,
- [3] ROJAS DÍAZ, R., 2006. Detección de fallos en estructuras mediante la medida de la variación de sus propiedades dinámicas. Proyecto Fin de Carrera. Escuela Superior de Ingenieros. Universidad de Sevilla.
- [4] PANDEY ET AL., 1991. Damage detection in structures using changes in flexibility. *Journal of Sound and Vibration*.
- [5] PANDEY ET AL., 1991. Damage detection from changes in curvature mode shapes. *Journal of Sound and Vibration*.
- [6] GRUPO DE ESTRUCTURAS. Wavelet based mode shape analysis for damage detection. Escuela Superior de Ingenieros. Universidad de Sevilla.
- [7] PANDEY, A.K AND BISWAS, M.,1994. Damage detection in structures using changes in flexibility. *Journal of Sound and Vibration*.
- [8] ALGABA, M., 2011. Modelo numérico preliminar IPE100, Grupo de Estructuras ETSI (informe interno).