



Certificación ISO 9001:2008 ‡

Detección de daño en estructuras mediante análisis de propagación de ondas

Juan Antonio Quintana Rodríguez
James F. Doyle
Francisco Javier Carrión Viramontes
Andrés Hernández Guzmán
Saúl Enrique Crespo Sánchez
José Alfredo López López

**Publicación Técnica No. 358
Sanfandila, Qro, 2012**

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES
INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

**Detección de daño en estructuras mediante
análisis de propagación de onda**

Publicación Técnica No. 358
Sanfandila, Qro, 2012

Esta investigación fue realizada en la Coordinación de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural del Instituto Mexicano del Transporte, por el Dr. Juan Antonio Quintana Rodríguez, el Ph. D. James F. Doyle, el Dr. Francisco Carrión Viramontes, el Ing. Andrés Hernández Guzmán, el M. C. Saúl Enrique Crespo Sánchez y el Dr. José Alfredo López López.

Se agradece la colaboración del Dr. Miguel Martínez Madrid, Coordinador de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural del Instituto Mexicano del Transporte, por la revisión y las facilidades para la realización del presente trabajo.

Índice

Resumen		v
Abstract		vii
Resumen ejecutivo		ix
Capítulo 1	Introducción	1
Capítulo 2	Modelación estructural con elemento finito	3
2.1	Modelos experimentales	3
2.2	Modelos de simulación	4
2.3	Experimentación dinámica	5
2.3.1	Sistema de adquisición de datos	6
2.4	Construcción de los modelos de EF	9
2.4.1	Tipo de elementos	9
2.4.2	Estudio de convergencia	11
2.4.3	Parámetro de efecto de la rigidez	14
2.4.4	Identificación de parámetros	16
2.5	Desarrollo del modelo H	17
2.6	StriDent: Programa para la identificación de parámetros estructurales	21
2.6.1	Identificación de parámetros	21
2.6.2	Modelado de las uniones	22
2.6.3	Verificación de los modelos de EF	25
2.6.4	Modelo de EF, H y viga calibrados	30
Capítulo 3	Método de búsqueda global	35
3.1	Identificación de cambios en los parámetros	36
3.1.1	Detección del cambio de parámetros	36
3.1.2	Cuantificación del cambio en los parámetros	38
3.2	Metodología para la búsqueda del cambio en parámetros	39
3.2.1	Método de Búsqueda Global	39
3.2.2	Patrones en los gráficos de errores	42

3.2.3	Secciones y evaluación por promedios	46
3.2.4	Tipos de pruebas	53
3.2.5	Análisis de los tipos de datos	60
3.3	Aplicación de la metodología	61
3.3.1	Aplicación bidimensional	61
3.3.2	Análisis de la sección con daño	74
Capítulo 4	Estudios experimentales	83
4.1	Estudios experimentales en la viga	83
4.1.1	Arreglo experimental	83
4.1.2	Parámetros de búsqueda en el MBG	85
4.1.3	Determinación de la zona con daño	87
4.1.4	Evaluación de la sección con daño	91
4.1.5	Discusión de resultados	95
4.2	Estudios experimentales en la estructura H	96
4.2.1	Arreglo experimental	96
4.2.2	Parámetros de búsqueda en el MBG	98
4.2.3	Delimitación de la zona con daño	100
4.2.4	Evaluación de la sección con daño	104
4.2.5	Resultados finales	106
Capítulo 5	Conclusiones	107
Bibliografía		109

Resumen

Todas las estructuras en operación están expuestas a daño por deterioro de los materiales ocasionados por acciones físicas, químicas o mecánicas. La manifestación del daño se ve reflejada por cambios en la rigidez y/o masa en las estructuras. Existen técnicas de evaluación global no destructiva, como la de propagación de ondas, que detecta este tipo de cambios y, por tanto, lleva información respecto a la presencia de daño. La existencia de daño puede inferirse por la comparación entre las respuestas dinámicas de la estructura con daño y sin daño.

Esta publicación desarrolla un método original y novedoso de búsqueda global que utiliza la versatilidad de la modelación por elemento finito y una técnica experimental para determinar de manera única el daño asociado con cambios en los parámetros estructurales del sistema. Usando un modelo de elemento finito finamente calibrado, así como los datos de la respuesta dinámica adquirida, la metodología determinará la localización de daño como principal objetivo, adicionalmente se determinarán los cambios estructurales que resulten por el daño.

Esta metodología tiene la ventaja de poder adaptarse a cualquier tipo de modelo estructural, esto implica que la metodología pueda ser usada en una gran variedad de estructuras, porque la metodología aplicada es independiente del modelo.

Abstract

All operating structures are exposed to different type of operational damage. The manifestation of this damage in a structure is reflected by changes in stiffness and/or mass of the structure itself. To asses these damages, there are global evaluation techniques such as wave propagation that will detect the consequential changes and therefore carry information about the magnitude and presence of damage. The existence of damage can be inferred by comparing the dynamic responses of the damaged and undamaged systems.

This publication develops a global search method that utilizes the versatility of Finite Element modeling and an experimental technique to uniquely determine the associated damage and parameter change characteristics. Using a finely calibrated FE model along with acquired response data of a structure, the presented methodology will primarily determine the damage location. Additionally, the associated parameter changes that result from the damage can also be determined.

The presented methodology has the advantage of being able to take full advantage of any given model. This implies that the methodology can be used across a large variety of structures since the methodology itself is independent of the model.

Resumen ejecutivo

En la actualidad el desarrollo y la aplicación de técnicas de inspección no destructiva en puentes ha tenido un gran auge, esto se debe principalmente a que es necesario garantizar la integridad y funcionalidad de las estructuras sin alterar sus propiedades físicas y mecánicas en el proceso de la evaluación estructural.

Los sistemas modernos de administración de puentes y, en general, para los de diseño y operación de sistemas mecánicos complejos, buscan novedosas técnicas de inspección no destructiva que se adapten y sean factibles de aplicar para la valoración de las estructuras. Una técnica potencial que se puede adaptar eficientemente es la aplicación de la metodología de búsqueda global de daño, la cual se basa en una combinación de un modelo de elemento finito de la estructura en estudio y una prueba dinámica experimental para la adquisición de la respuesta dinámica del sistema.

Las ventajas que esta metodología ofrece son categóricas; pues puede emplearse en cualquier tipo de estructura, es decir, no importa las características estructurales de diseño o si el sistema es lineal o no lineal, acepta una amplia gama de procedimientos experimentales para recabar los datos de las respuestas dinámicas del sistema, la evaluación se puede realizar a toda la estructura o a elementos estructurales particulares, una vez almacenados los datos asociados a los parámetros estructurales, la evaluación de la estructura es rápida y se puede realizar de manera remota.

La presente metodología será aplicada en dos sistemas para probar su eficiencia en la detección de daño; se contempla que en el futuro pueda ser integrada como parte fundamental de un sistema de administración de puentes carreteros.

1 Introducción

Independientemente de su naturaleza, cualquier estructura, ya sea un puente, edificio, aeronave o vehículo, están expuestas a sufrir algún tipo de daño que ponga en riesgo su integridad y operación. En estos casos, diferentes tipos de daño se pueden presentar, como por ejemplo; erosión, corrosión, fatiga, agrietamiento o deformación. El daño, como su nombre lo indica, puede tener efectos perjudiciales en el comportamiento operativo de una estructura y, por tanto, es conveniente que sea detectado (Aktan and Grimmelsman, 1999; Doyle, 1997) antes de que sus efectos lleguen a ser catastróficos o irreversibles.

Inspeccionar una estructura para localizar y evaluar daño no es una tarea fácil. Existen muchos métodos que se han desarrollado para “ver” el daño en estructuras; sin embargo, la complejidad de las mismas dificulta las tareas de inspección y no siempre es posible descubrir el daño, especialmente cuando éste es interno.

Como consecuencia de lo anterior, en los últimos 15 años se han desarrollado metodologías indirectas de evaluación de daño, a partir de la medición de vibraciones o del análisis modal. En estos casos, la idea básica es que, desde el punto de vista matemático, el daño se manifiesta como un cambio en los parámetros estructurales, tales como la rigidez y/o la masa (Doyle, 1997). Dentro de las técnicas que evalúan las vibraciones, el análisis de la propagación de ondas en la estructura, es un método que permite conocer el daño a partir de los cambios en la propagación de las ondas flexionantes (Doyle, 1997). En este caso, el reto principal radica en desarrollar el método de análisis para extraer de la medición experimental, toda la información relativa al daño.

En este caso, de manera muy simple, cuando hay daño, existe un cambio entre las respuestas dinámicas de la estructura, respecto a la condición sin daño. Como metodología de detección, este enfoque tiene una limitante y es el hecho de que se requiere una referencia de la condición original sin daño. Una alternativa para dar mayor flexibilidad a estos métodos es reemplazar la información de la estructura original con un modelo de elemento finito refinadamente calibrado (Chandrupatla, 2000; Doyle, 1997).

En general, aplicando las vibraciones resulta relativamente sencillo identificar la existencia de daño; sin embargo, el aspecto más difícil es la localización del mismo y, más aún, cuantificar la magnitud de éste. En cuanto al problema de la localización del daño, se propone el uso de un esquema de búsqueda completa con el que se evalúan y comparan las respuestas dinámicas del modelo de elemento finito con las obtenidas experimentalmente. El primer objetivo del

método propuesto es el de determinar la localización del daño y no tanto su cuantificación, ya que conociendo su ubicación, es posible utilizar otras técnicas de inspección puntuales para determinar su magnitud o severidad.

Para probar y evaluar la efectividad del método propuesto, dos modelos de estructuras básicas son estudiados experimentalmente. El primero, es una viga larga que se utiliza para evaluar la sensibilidad de las ondas para transportar información. El segundo, es un marco en forma de H y que tiene la complicación estructural de las uniones. El capítulo 2 de este trabajo involucra la calibración de los modelos estructurales de EF de ambos sistemas. El capítulo 3 describe el método de búsqueda global, donde sólo se analizan datos generados por el paquete de elemento finito simulando ambas condiciones, sin daño y con daño, para una mejor evaluación de los algoritmos. El capítulo 4 describe la aplicación experimental de la metodología a situaciones reales de las dos estructuras ya mencionadas.

Como resultado general del trabajo, se encuentra que la metodología descrita tiene la ventaja de que se puede aplicar a cualquier tipo de estructura y es independiente del tipo de cambio, siempre y cuando éste tenga un efecto en el comportamiento de la propagación de ondas en la estructura. En particular, también se puede aplicar a sistemas no lineales, reconociendo que lo fundamental es contar con un modelo de simulación que pueda representar el comportamiento de la estructura en forma fiel y precisa.

2 Modelación estructural con elemento finito

El Método de Elemento Finito (MEF) es una herramienta muy poderosa que permite comprender y analizar el desempeño de una estructura, ya que abre numerosas posibilidades para evaluarla mediante la extracción de información del modelo, como por ejemplo: las respuestas dinámicas del sistema, la distribución de esfuerzos, el efecto de las cargas térmicas o dinámicas, entre otras. Para lograr lo anterior, la clave es tener un modelo de elemento finito (EF) calibrado de manera que represente el comportamiento de la estructura real al nivel de análisis requerido. Esto implica un conocimiento suficiente y exacto de todas las propiedades estructurales que intervienen del sistema (Bathe, 1995; Cook, 1989), lo cual no siempre es sencillo. Generalmente estas propiedades se conocen a través de métodos directos o métodos inversos, apoyados por técnicas experimentales, que permiten garantizar la similitud entre la el comportamiento de la estructura y de su modelo de EF (Doyle, 1997).

2.1 Modelos experimentales

Cualquier tipo de estructura puede ser representada por un modelo de EF; sin embargo, la dificultad fundamental radica en lograr un modelo que represente la naturaleza de la estructura real. Para poder satisfacer este requisito, es necesario ajustar los parámetros estructurales del modelo de EF, para que sus respuestas sean similares a las de la estructura real; a este proceso de ajuste se le llama calibración del modelo de EF.

La calibración de un modelo de EF es un proceso complejo, ya que los parámetros estructurales que se deben ajustar no siempre se conocen de forma directa, por lo que se infieren de pruebas experimentales. Así por ejemplo, se puede conocer el material con el cual está fabricada una estructura, sin embargo, el módulo de elasticidad sólo se puede estimar a partir de un rango de valores típicos y, si se requiere un valor más exacto, es necesario extraer probetas para hacer pruebas experimentales y determinar un valor más preciso. En contraparte a la determinación directa, otros parámetros como el coeficiente de amortiguamiento, sólo se puede obtener indirectamente del análisis modal de pruebas de vibración. Todo lo anterior, considerando que la calibración es más compleja a medida que se incrementa el número de parámetros que se deben ajustar,

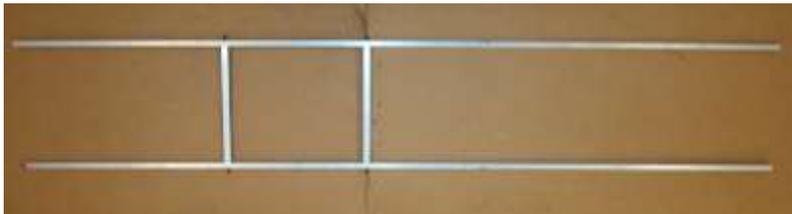
Este capítulo describe el procedimiento de calibración de dos modelos de EF de dos estructuras reales. La primera, es una estructura tipo viga sencilla y la segunda es una armadura de 4 vigas en forma de H. Ambas estructuras se pueden observar en la figura 2.1. Los modelos calibrados de EF, correspondientes

a estas dos estructuras, son utilizados para el análisis de detección de daño, lo cual se describe en el capítulo 3 de este trabajo.

La primer estructura objeto de este estudio es una viga simple de aluminio que tiene una longitud de 2,2606 m (89,0 in) y una sección transversal de $1,6129 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ ($0,25 \text{ in}^2$). La segunda estructura que se analiza es el denominado modelo H, que es una estructura de aluminio tipo armadura que mide 1,397 m (55,0 in) de longitud por 0,2667 m (10,5 in) de ancho; la sección transversal de las vigas de aluminio es igualmente $1,6129 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ ($0,25 \text{ in}^2$). En ambas estructuras el aluminio es el tipo TS-505. En el caso del modelo H, la principal complejidad en la estructura se debe a sus cuatro uniones que fueron montadas usando un tornillo según se observa en la figura 2.1c.



(a)



(b)



(c)

Figura 2.1 Estructuras físicas usadas en la investigación. (a) Modelo viga. (b) Modelo H (c) Acercamiento de una unión en el modelo H

2.2 Modelos de simulación

Un modelo de EF para un sistema lineal puede ser representado como:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{P\} \quad 2.1$$

Los valores de $[K]$, $[C]$ y $[M]$ son las matrices de rigidez, amortiguamiento y masa respectivamente. Estas matrices contienen la información de las propiedades estructurales del material. El vector $\{u\}$ es el vector de desplazamiento y $\{P\}$ es el vector de carga.

Para realizar el análisis de elemento finito de esta investigación se utilizó el programa de uso general StaDyn, que permite múltiples análisis estructurales con

cargas estáticas, cargas dinámicas, análisis modal, análisis de valores característicos, entre otros. Durante la investigación, StaDyn fue utilizado principalmente en la generación de las respuestas dinámicas de las estructuras, tanto para la calibración del modelo, como para la evaluación de daño en las estructuras.

Al igual que cualquier programa de simulación por elemento finito, para un análisis usando StaDyn, inicialmente se genera un archivo que contenga las características y propiedades del sistema. Este archivo incluye información acerca de las posiciones de los nodos, el tipo de elementos, propiedades del material, las condiciones de frontera, entre otras. Comúnmente este archivo de datos se genera usando otro programa llamado GenMesh (Doyle, 1993, 64-69; Doyle, 1997), el cual permite generar y modificar los datos estructurales en forma dinámica con el programa StaDyn.

2.3 Experimentación dinámica

Existe una gran diversidad de técnicas experimentales para calibrar modelos estructurales (Doyle, 404-408, 1997; Doyle, 1997). Algunas de ellas involucran sensores o aparatos electrónicos de medición que proporcionan información local; algunas otras son del tipo global, es decir, proporcionan información de la estructura completa o una región completa de ésta. Para este estudio en particular, la información experimental proviene de acelerómetros y transductores de fuerza; los acelerómetros utilizados son del tipo piezoeléctrico de baja masa para altas frecuencias, debido a que el interés principal es medir las respuestas en los primeros instantes de tiempo después de excitada la estructura.

Generalmente, para una prueba experimental, se aplica una carga o fuerza externa sobre la estructura para producir una respuesta dinámica que resulta de la propagación, dispersión y reflexión de ondas flexionantes sobre toda ella. Las respuestas dinámicas a esta excitación se registran a través de sensores de movimiento colocados en lugares específicos. El registro y almacenamiento de la señal de respuesta depende del análisis que se realizará posteriormente; puede ser un lapso demasiado corto a una velocidad alta de muestreo, para un análisis de propagación de ondas o un intervalo de tiempo muy largo con baja velocidad de muestreo para un análisis modal. La precisión en el registro del comportamiento dinámico en un punto específico de la estructura, depende de la frecuencia de muestreo y la sensibilidad de la instrumentación utilizada.

Normalmente los transductores convierten señales de aceleración, velocidad o desplazamiento, en señales de voltaje; estos voltajes se ajustan de acuerdo con la sensibilidad de la instrumentación para relacionarlos con los valores medidos de aceleración, velocidad o desplazamiento. En algunos casos, los registros medidos se utilizan directamente en el análisis; sin embargo, en otros casos, es necesario procesar electrónicamente la señal para integrarla o diferenciarla para obtener los valores correspondientes de velocidad, aceleración o desplazamiento, según del tipo de sensor utilizado.

Los transductores de fuerza son instrumentos que se colocan en el dispositivo que impacta y excita la estructura para registrar la fuerza del impacto producido.

2.3.1 Sistema de Adquisición de datos

Para efectuar las pruebas dinámicas experimentales, es necesario un sistema de adquisición de datos para almacenar la información de cada uno de los sensores y el transductor de fuerza. Un sistema de adquisición de datos consta de sensores, pre-amplificadores, suministros de energía y un sistema electrónico que convierte las señales analógicas en señales digitales, siendo estos últimos los que se almacenan y procesan posteriormente. Los sensores, por lo general van conectados a un suministrador de energía y a un pre-amplificador. Mientras que las tarjetas de conversión de datos van insertadas en computadoras personales o portátiles que cuentan con un software que controla la velocidad de muestreo, el número de canales, tiempo de muestreo etc., de acuerdo con las necesidades del usuario; aunque también hay equipos de aplicación específica que suplen a las computadoras personales.

Dispositivo para la adquisición de datos

Para todos los experimentos descritos en esta investigación, el sistema de adquisición de datos usados fue un equipo Dash-18 fabricado por Astro-Med Inc (figura 2.2). Este sistema de adquisición de datos es capaz de almacenar hasta 18 canales simultáneamente, con una frecuencia máxima de muestreo de hasta 100 mil muestras por segundo para canal. La pantalla del equipo puede usarse con un lápiz óptico y permite un ambiente interactivo de fácil manejo para el usuario.



Figura 2.2 Dispositivo de adquisición de datos Astro Med. Inc. Dash-18

El amplificador es un dispositivo electrónico que se utiliza para aumentar la señal registrada por un sensor, a niveles que permitan su manejo y análisis. En algunos

equipos, es posible utilizar dispositivos de filtraje para eliminar el ruido o porciones de la señal no deseadas. El amplificador utilizado fue un Tektronix TM505, que tiene un intervalo de filtrado para frecuencias entre 0,1 Hz y 1,0 MHz y la ganancia máxima es de 100 000 (figura 2.3).



Figura 2.3 Amplificador Tektronix TM505

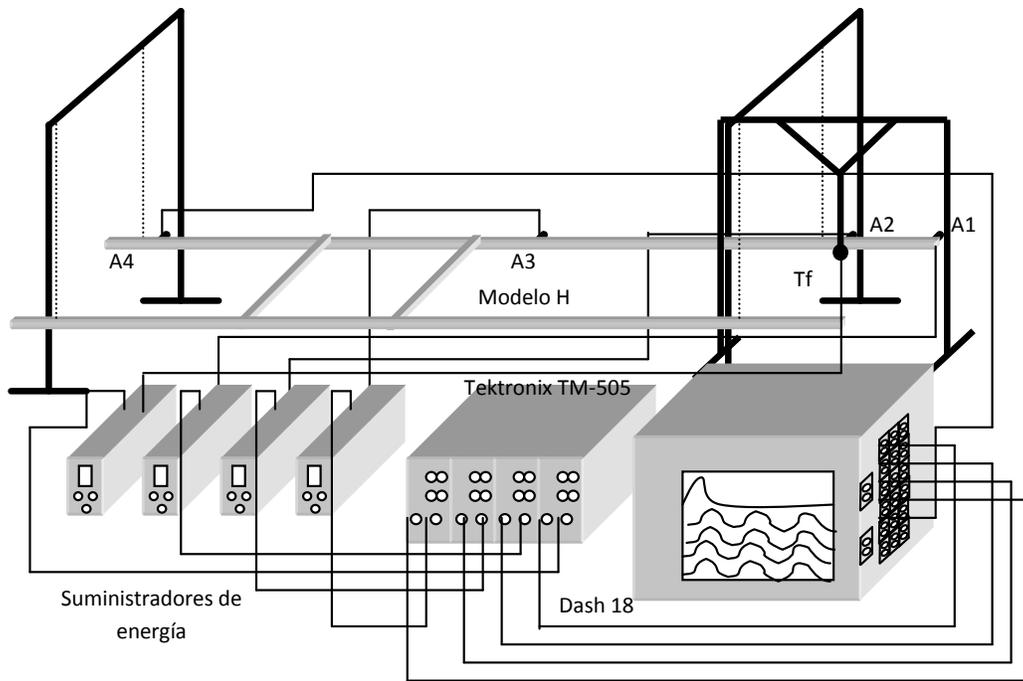
La función de un suministrador de energía, como su nombre lo indica, es suministrar la energía necesaria a los sensores. La figura 2.4 muestra la fotografía de uno de los suministradores de energía utilizados.



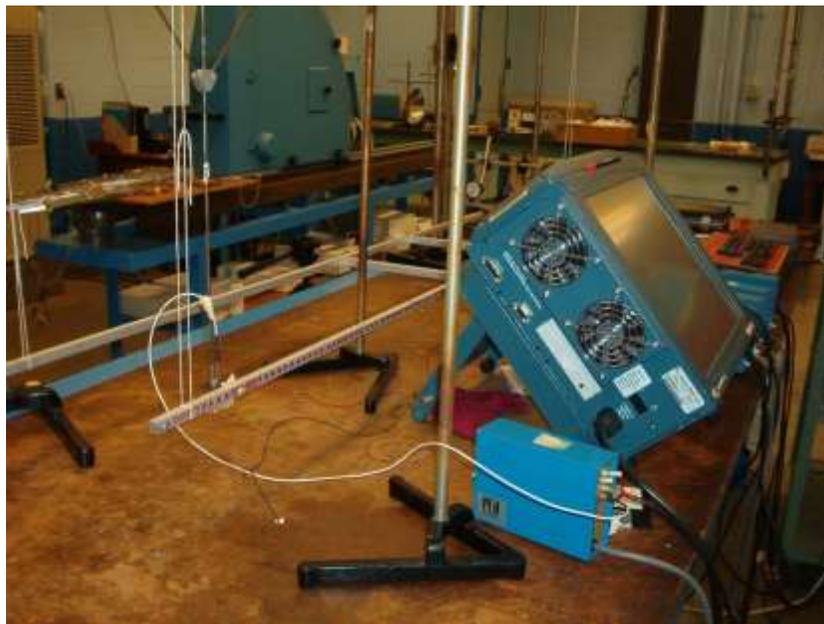
Figura 2.4 Suministrador de energía PCB

Arreglo experimental básico

Todos los dispositivos y sensores, en esencia, tienen un arreglo experimental como el que se muestra en la figura 2.5. El proceso experimental comienza con la ubicación de los sensores y el transductor de fuerza en la estructura. Una vez ubicados, es necesario ajustar los parámetros en el sistema de adquisición de datos, tales como el número de canales utilizados, la frecuencia de muestreo, y el tiempo de adquisición de datos. Así también, es necesario ajustar los parámetros en el amplificador tales como la ganancia y el filtrado de las señales de cada canal.



(a)



(b)

Figura 2.5 Arreglo experimental básico usando acelerómetros y transductor de fuerza (a) Diagrama esquemático del arreglo (b) Fotografía del arreglo

Para seleccionar la frecuencia de muestreo y conocer el contenido de frecuencias de la respuesta dinámica es necesario calcular la transformada de Fourier de la señal registrada por el transductor de fuerza. Una vez conocido el contenido de

frecuencias de las señales, la frecuencia de muestreo se selecciona de forma que sea al menos el doble de la frecuencia más alta registrada por el transductor de fuerza para evitar el fenómeno de “aliasing”. El aliasing es un fenómeno que ocurre cuando se muestrea a una frecuencia menor que el contenido máximo de frecuencia de la señal, de manera que las señales de alta frecuencia aparece como un “alias” de baja frecuencia que en realidad no les corresponde. En los experimentos realizados en este estudio, la frecuencia de muestreo empleada fue de 100 000 muestras por segundo para cada canal.

Antes de que pueda ser analizada una señal, es necesario aplicar un procesamiento posterior con el que se calibran y ajustan los valores de voltaje almacenados, con los correspondientes valores registrados por el sensor de desplazamiento, velocidad, aceleración o fuerza, y cuyo valor depende de la sensibilidad del instrumento y de los valores de amplificación utilizados.

2.4 Construcción de los modelos de EF

2.4.1 Tipo de elementos

StaNyn es un programa de elementos finitos de propósito general que cuenta con distintos tipos de elementos con los que se puede construir casi cualquier tipo de estructura. Para el caso específico de esta investigación, los tres tipos de elementos usados para ensamblar los modelos EF son tres: dos del tipo marco y uno tipo placa (Doyle, 64-69, 1997; Doyle, 1997). Los dos elementos tipo marco son elementos unidimensionales uno se utiliza para marcos elementales, mientras que el segundo es para marcos de vigas de sección profunda. La diferencia entre estos dos tipos de elementos está en que el segundo tiene una corrección para el efecto de la rigidez cuando se analizan las componentes de alta frecuencia de la respuesta dinámica. Esta modificación tiene mayor efecto sobre la velocidad de propagación de grupo de las ondas flexionantes. Para seleccionar el tipo de elementos más adecuado, se realizaron pruebas experimentales en la viga de aluminio y las respuestas dinámicas se analizaron y compararon con las generadas por el modelo de EF considerando los tres tipos de elementos.

En la figura 2.6 se muestra el arreglo experimental utilizado para el estudio de la viga. Para generar el modelo de EF de esta viga, inicialmente se consideraron elementos tipo marco y se seleccionó una distribución de 4 elementos por pulgada; posteriormente se generó un modelo con elementos tipo placa con una distribución de 4 elementos por pulgada en la dirección longitudinal y 8 en la del espesor. Para generar altas frecuencias en la respuesta dinámica, el impacto de excitación tuvo una duración de 100 μ s. Las figuras 2.7 y 2.8 muestran las respuestas dinámicas de los tres tipos de elementos para dos (sensores 1 y 3) de los 4 sensores utilizados según se muestra en la figura 2.6.

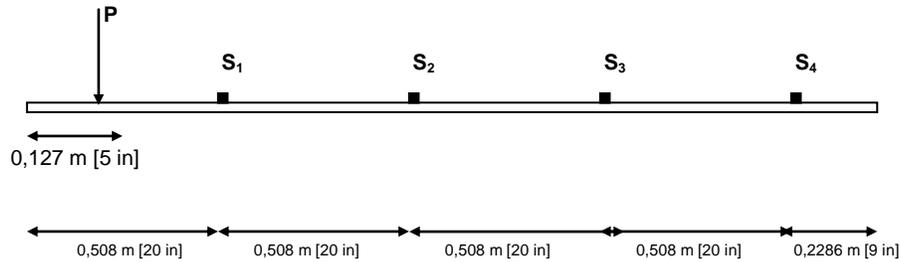


Figura 2.6 Arreglo de la viga usado en la selección del tipo de elementos

Como se puede ver en las figuras 2.7 y 2.8, las respuestas generadas por el modelo de EF utilizando elementos placa o los elementos de marco de sección profunda tienen casi la misma respuesta en tiempo, mientras que en los elementos de marco normales se observa un retraso y un cambio en la señal de respuesta conforme el tiempo incrementa. Por lo anterior, resulta más apropiado construir los modelos de EF con elementos tipo placa, elementos de marco modificados o una combinación de ambos. La selección del tipo de elementos dependerá de cual de los dos tipos seleccionados puede ser utilizado para construir el modelo de EF con la mínima cantidad de elementos. Lo anterior, depende primordialmente del estudio de convergencia y de la capacidad de los dos tipos de elementos para reconstruir la respuesta dinámica experimental de los modelos físicos.

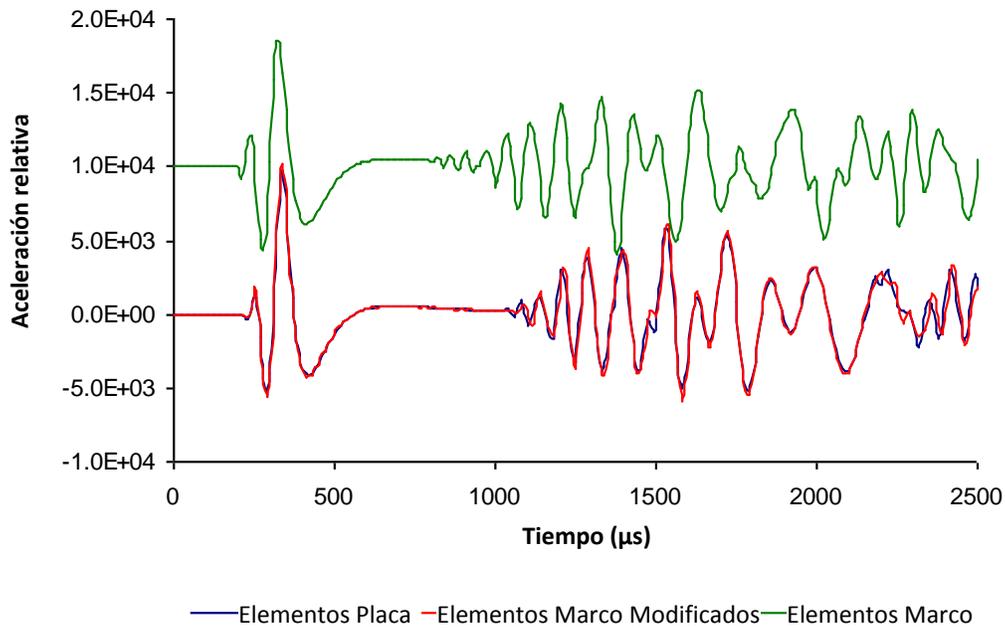


Figura 2.7 Respuesta sintética generada por los tres tipos de elementos en el sensor 1

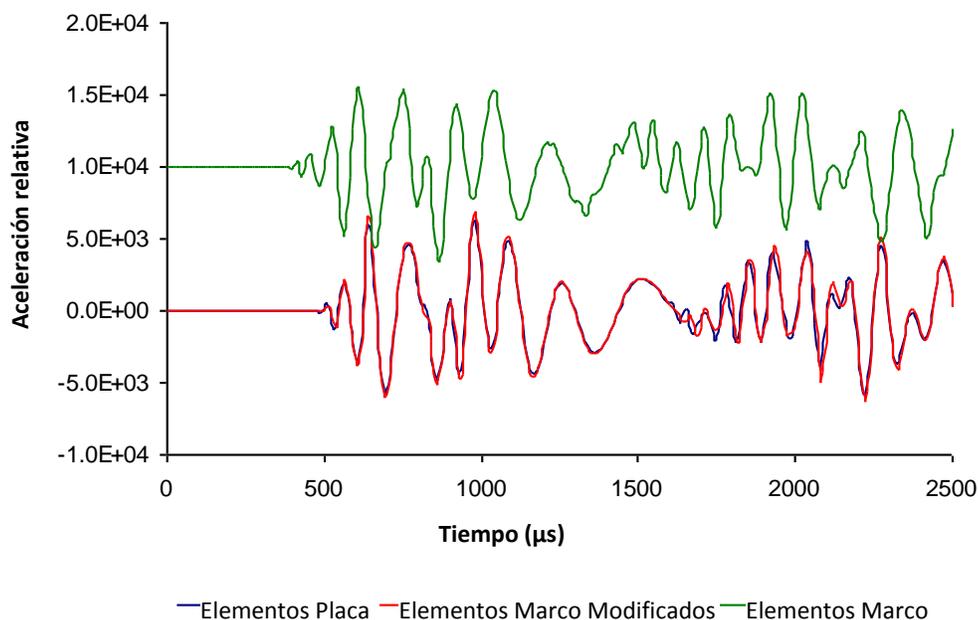


Figura 2.8 Respuesta sintética generada por los tres tipos de elementos en el sensor 3

2.4.2 Estudio de convergencia

La precisión de un modelo de elemento finito, para representar el comportamiento dinámico de una estructura, depende fuertemente del refinamiento del modelo; es decir, a más elementos, mayor precisión. Sin embargo, al utilizar un mayor número de elementos en un modelo, el tiempo de cómputo se incrementa en una proporción de n^3 . Para esto, se realiza un estudio de convergencia cuyo objetivo es determinar el número mínimo de elementos que se deben usar en un modelo, conservando una precisión aceptable.

Una prueba de convergencia consiste en generar, con el modelo de EF, una respuesta dinámica usando un determinado número de elementos por unidad de longitud; posteriormente, comparar los resultados con un segundo modelo con mayor refinamiento en el número de elementos por unidad de longitud. Si hay una diferencia entre las señales en el tiempo, un retraso, o un cambio en la magnitud, un nuevo modelo es generado con un mayor refinamiento y nuevamente se compara con el anterior siguiendo el criterio mencionado anteriormente. Este proceso se repite hasta que las dos últimas señales generadas no tengan diferencia significativa entre sí.

En el estudio que se presenta, el proceso de calibración se siguió refinando el modelo de dos en dos y en forma independiente para los dos tipos diferentes de elementos seleccionados previamente.

El estudio de convergencia se llevó a cabo para la viga mostrada en la figura 2.6 y los datos de simulación fueron generados con un modelo de EF de la viga cuyas

propiedades del material fueron valores nominales: módulo de elasticidad de 73,0 GPa ($10,6 \times 10^6$ psi), módulo de rigidez de 27,5 GPa ($4,0 \times 10^6$ psi) y densidad de $2800,0 \text{ kg/m}^3$ ($10,0 \text{ lb/in}^3$). Los datos se generaron con un periodo de $5 \mu\text{s}$ durante un lapso total de $2500 \mu\text{s}$.

Para reproducir las respuestas dinámicas se usaron 4 y 8 elementos por pulgada en los modelos de EF. Las figuras 2.9 y 2.10 muestran las respuestas generadas con elementos tipo marco mejorado para los sensores 1 y 4. En las figuras se puede observar que no existen diferencias significativas entre las señales, por lo cual se concluyó que cuatro elementos por pulgada son suficientes para construir un modelo de EF con la precisión deseada.

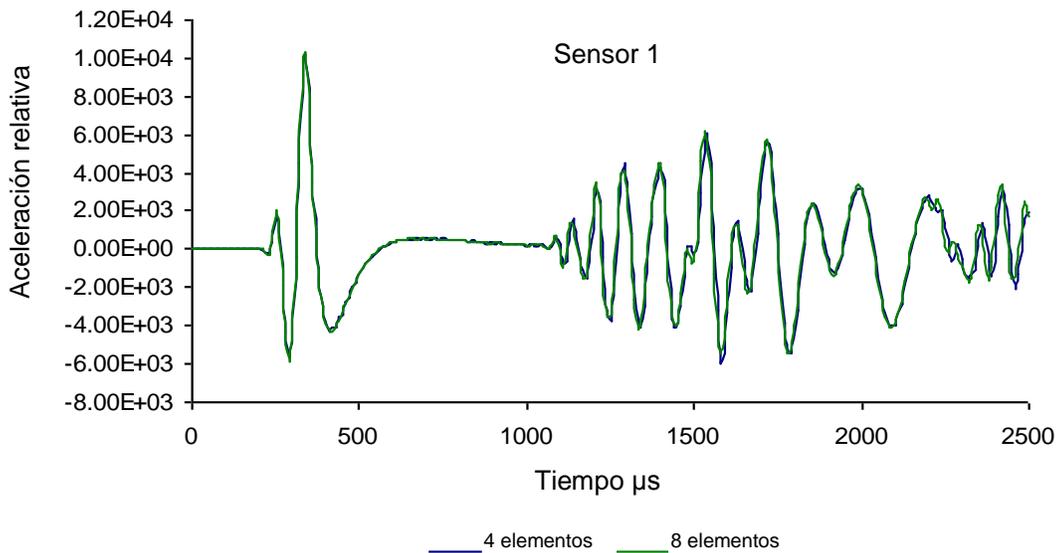


Figura 2.9 Respuesta sintética en el sensor 1 usando cuatro y ocho elementos por pulgada en el modelo de EF de la viga

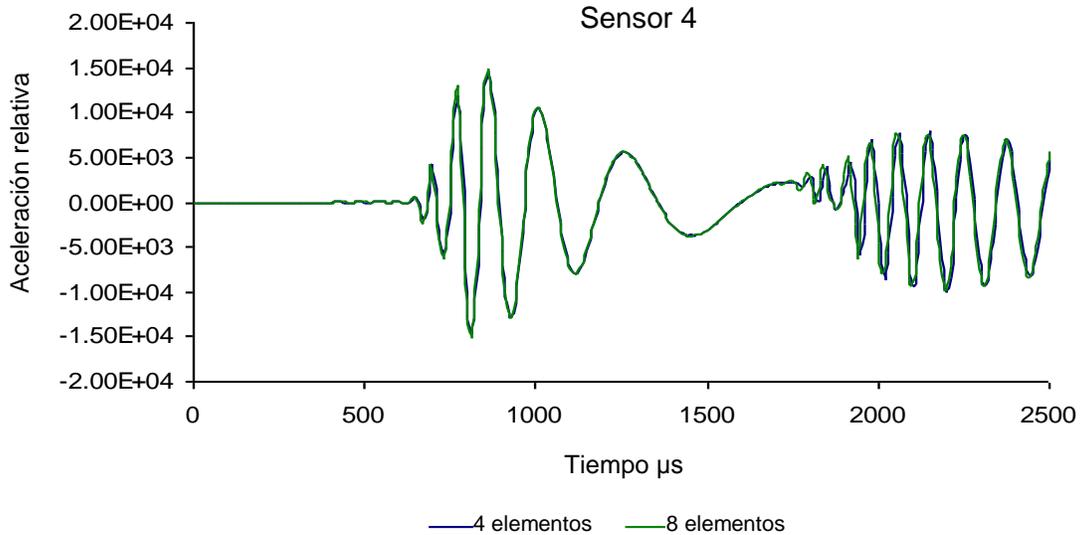


Figura 2.10 Respuesta sintética en el sensor 4 usando cuatro y ocho elementos por pulgada en el modelo de EF de la viga

Para los elementos tipo placa bidimensional, se usó la viga con las mismas propiedades empleadas anteriormente y para generar la malla se emplearon cuatro y ocho elementos por pulgada en la dirección longitudinal y ocho en la dirección transversal. Las respuestas generadas por ambos modelos son mostradas en las figuras 2.11 y 2.12 para los sensores 1 y 4 respectivamente. Como se puede observar, no existen diferencias significativas entre las señales, por lo que cuatro elementos por pulgada son adecuados para construir el modelo con este tipo de elementos.

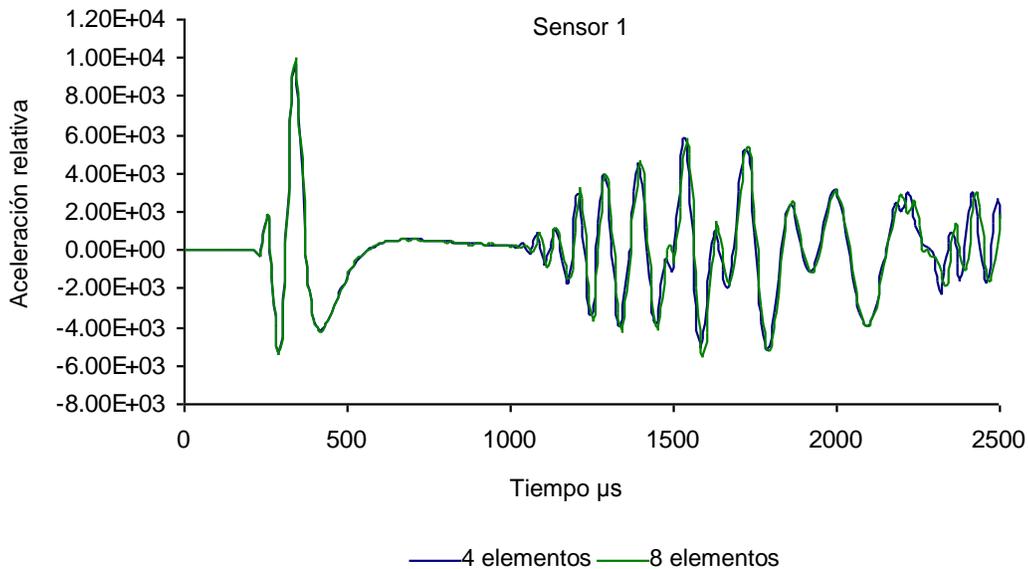


Figura 2.11 Respuesta sintética generada por el sensor 1, usando cuatro y ocho elementos por pulgada en la dirección longitudinal y ocho en la transversal

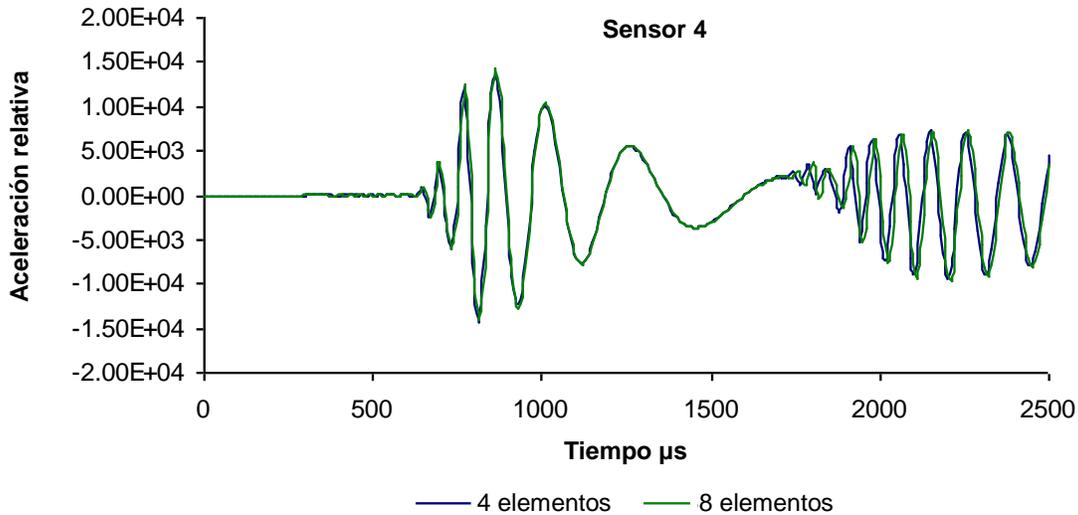


Figura 2.12 Respuesta sintética generada por el sensor 4, usando cuatro y ocho elementos por pulgada en la dirección longitudinal y ocho en la transversal

Como conclusión de las pruebas anteriores se puede establecer que los elementos tipo marco mejorados son suficientes para hacer un modelo de EF de la viga y, por lo tanto, para una gran parte del modelo H. Asimismo, los elementos tipo placa se pueden emplear para modelar las uniones del modelo H, que tienen un diseño más complejo.

2.4.3 Parámetro de efecto de la rigidez

El programa de elementos finitos *StaNyn*, cuenta con un modelo de viga basado en la teoría de Bernoulli-Euler para representar en forma adecuada el comportamiento dinámico de las vigas, fundamentalmente a bajas frecuencias. Cuando la frecuencia de excitación es mayor a 5000 Hz, surge una diferencia entre la velocidad de propagación de las ondas del modelo, respecto al modelo obtenido de la teoría de Timoshenko, que se considera una mejor aproximación. Para corregir este fenómeno sin cambiar el modelo de *StaNyn* y representar el mismo comportamiento dinámico de la teoría de Timoshenko, es necesario hacer un ajuste al valor original de la rigidez K_1 .

Para obtener el parámetro ajustado de K_1 , se diseñó y realizó una prueba experimental usando el arreglo mostrado en la figura 2.6, registrando la respuesta dinámica experimental y comparándola con la obtenida por el modelo de EF del sistema usando diferentes valores de K_1 . La excitación de la viga se hizo con un impacto de una duración de 350 μs , cuyo contenido de frecuencia es de aproximadamente 8000 Hz. En la prueba se utilizaron cuatro acelerómetros cuyas sensibilidades se muestran en el apéndice; los datos se adquirieron a una velocidad de muestreo de 100 mil muestras por segundo por un lapso de 2500 μs . Las respuestas dinámicas experimentales y del modelo, generadas con valores de

K_1 de 1.20, 1.35 y 1.50, se pueden ver en las figuras 2.13 y 2.14, para los sensores uno y cuatro respectivamente.

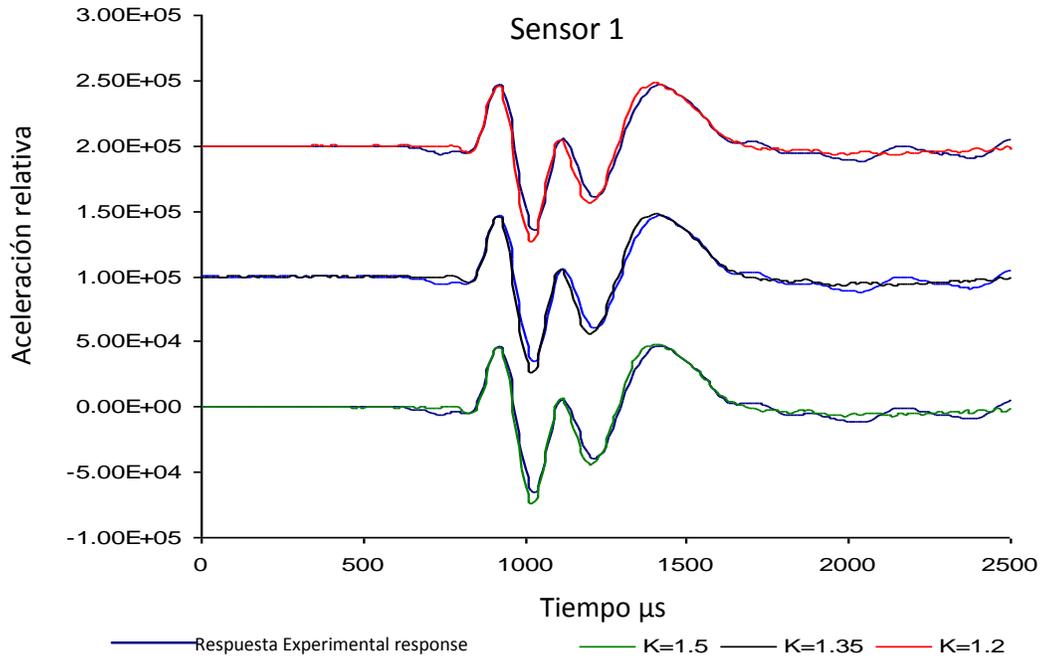


Figura 2.13 Respuesta dinámica experimental y del modelo de EF del sensor 1 con diferentes valores de K_1

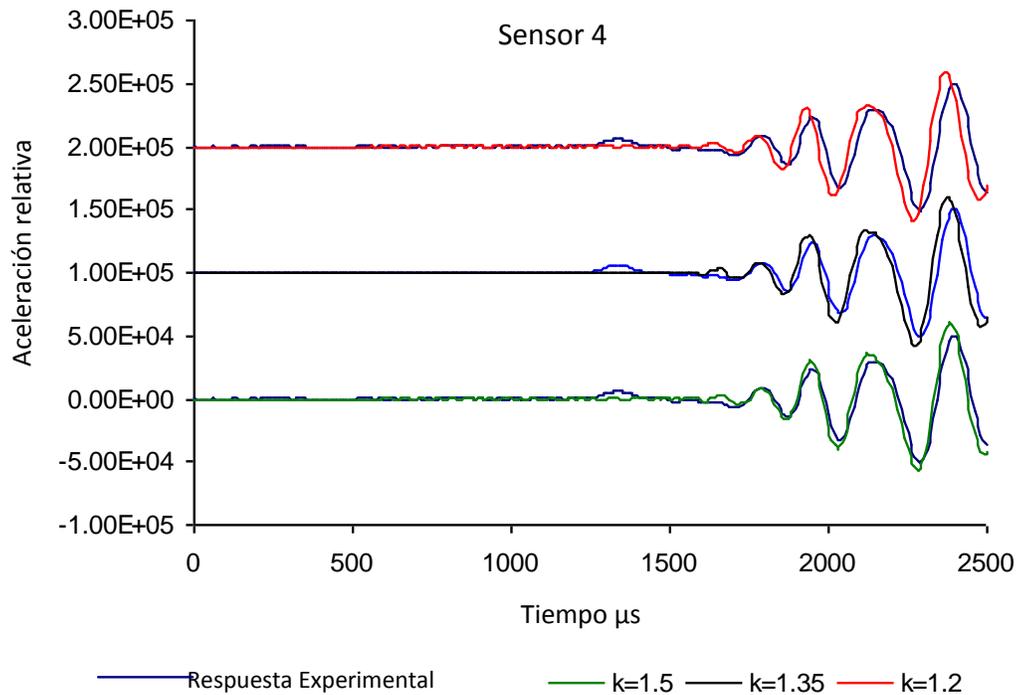


Figura 2.14. Respuesta dinámica experimental y del modelo de EF del sensor 1 con diferentes valores de K_1

De las figuras 2.13 y 2.14 se puede apreciar que el valor más apropiado para K_1 es 1,50. Con este valor se genera la mejor representación de las señales con respecto a las respuestas dinámicas experimentales en el intervalo de tiempo entre los 1500 y 2500 μ s. De las figuras, también, se puede observar que la amplitud de la respuesta del modelo no es totalmente fiel a la experimental; sin embargo, esto se debe a que aún no se habían calibrado el resto de los parámetros estructurales al momento de la comparación. Se debe recordar que los parámetros que se están utilizando son los valores nominales referenciados en la bibliografía y para calibrar el modelo de EF, es necesario conocer los valores reales del sistema.

2.4.4 Identificación de parámetros

En esta sección se describe cómo se identificaron los parámetros estructurales del modelo de EF de los dos sistemas estructurales estudiados (Doyle, 64-69, 1993; Doyle, 1997). El procedimiento para determinar los parámetros se diseñó para no alterar las propiedades químicas, físicas o mecánicas de los modelos físicos, por lo que fue necesario utilizar fundamentalmente pruebas no destructivas o pruebas indirectas. Entre los parámetros que se debieron determinar están: las dimensiones geométricas, las condiciones de frontera, la densidad, el módulo de elasticidad y el amortiguamiento.

Los primeros parámetros estructurales que se establecieron fueron los geométricos, ya que los dos sistemas tienen una geometría fácil de determinar a través de mediciones directas utilizando un micrómetro o cinta métrica. Para los dos modelos se fijaron las coordenadas de manera que la longitud correspondiera con el eje 'X' y el ancho con el eje 'Y'. Las dimensiones de la viga se muestran en la figura 2.6 y las correspondientes al modelo H y su configuración geométrica, se muestran en la figura 2.15. Entre las características especiales que se deben hacer notar del modelo H, están las cuatro uniones, cuya separación entre ellas es de 0,254 m (10,0 in).

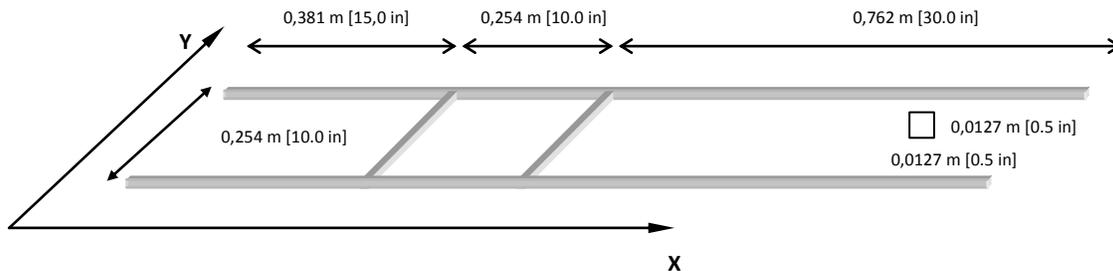


Figura 2.15 Geometría y dimensiones del modelo H

Las condiciones de frontera para el modelo H y la viga fueron sin restricciones, es decir, de condición libre, para evitar complejidades para la calibración de los modelos. Para modelar físicamente en el laboratorio la condición anterior, los

modelos se suspendieron por medio de hilos que sujetaban los extremos de los modelos físicos.

El siguiente parámetro a determinar fue la densidad, la cual fue medida utilizando la viga de aluminio y se utilizó para el modelo H ya que ambos modelos fueron fabricados del mismo material. Para calcular la densidad se obtuvo el peso y el volumen de la viga. Las dimensiones de la viga son 2,2606 m (89,0 in) de longitud y sección transversal de 0,0127 m por 0,0127 m (0,5 por 0,5 in), con las cuales se obtiene; $V = 0,0127 \times 0,0127 \times 2,2606 = 3,6461 \times 10^{-4} m^3$ ($V = 22,25 in^3$).

El peso de la viga se determinó con una balanza calibrada, la lectura fue tomada tres veces obteniendo un valor de 1,014 kg, (2,23 lb), lo que equivale a una densidad de $2781 kg/m^3$ ($0,100225 lb/in^3$).

Este valor de densidad fue utilizado en todos los subsecuentes modelos de EF que fueron generados. La obtención de este valor fue muy importante, ya que la densidad está relacionada con el módulo de elasticidad, por lo que la obtención de éste último se simplifica y se puede obtener mediante la solución de un problema inverso.

2.5 Desarrollo del modelo H

Para obtener un modelo de simulación que reflejara el comportamiento dinámico real del modelo H, se realizó un análisis con el modelo de elementos finitos para determinar el tamaño ideal de los elementos. Para esto, se realizaron varias pruebas en las que se simulaban diferentes segmentos de la estructura, desde uno hasta toda la estructura, incrementando los segmentos de uno en uno.

El primer modelo consistió en una barra recta de 1,397 m (55,0 in) de longitud y la posición de los acelerómetros y el transductor de fuerza para este modelo se puede ver en la figura 1.16. En estas pruebas, la respuesta dinámica experimental fue adquirida a una velocidad de muestreo de 100 mil muestras por segundo durante un lapso de 2500 μs . Por otra parte los datos de la simulación fueron generados cada 5 μs , pero grabados cada 10 μs durante el mismo periodo de tiempo.

El proceso de análisis se continuó de la misma forma hasta tener el arreglo experimental del primer modelo H que se muestra en la figura 2.17.

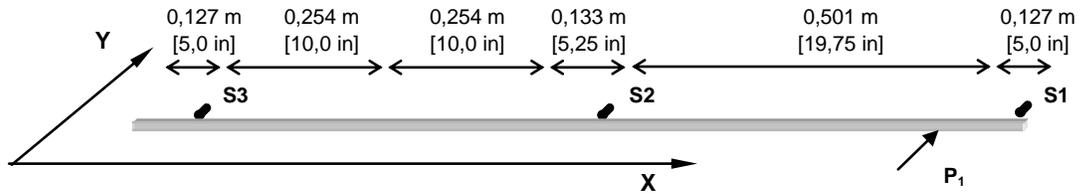


Figura 2.16 Primer modelo generado para comprender el comportamiento de las uniones

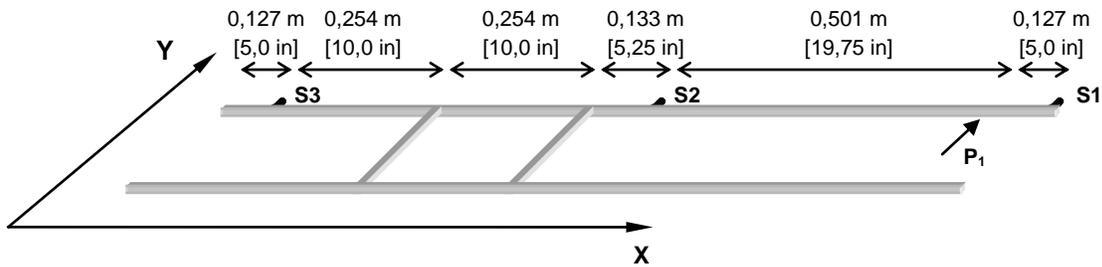


Figura 2.17 Arreglo experimental del Modelo H en el laboratorio

En general, el efecto de las uniones pudo ser identificado por la generación de reflexiones en la respuesta experimental, que no podrán ser generadas por los primeros modelos que no contienen dichas uniones. La figura 2.18 muestra las respuestas dinámicas simuladas y experimentales registradas por el sensor 2. En este gráfico se observó que la información es la misma para los primeros 1100 μ s; sin embargo, después de ese tiempo, el sensor 2 recibe información de las ondas reflejadas por las uniones, por lo que este modelo sólo es adecuado para los instantes iniciales de la prueba.

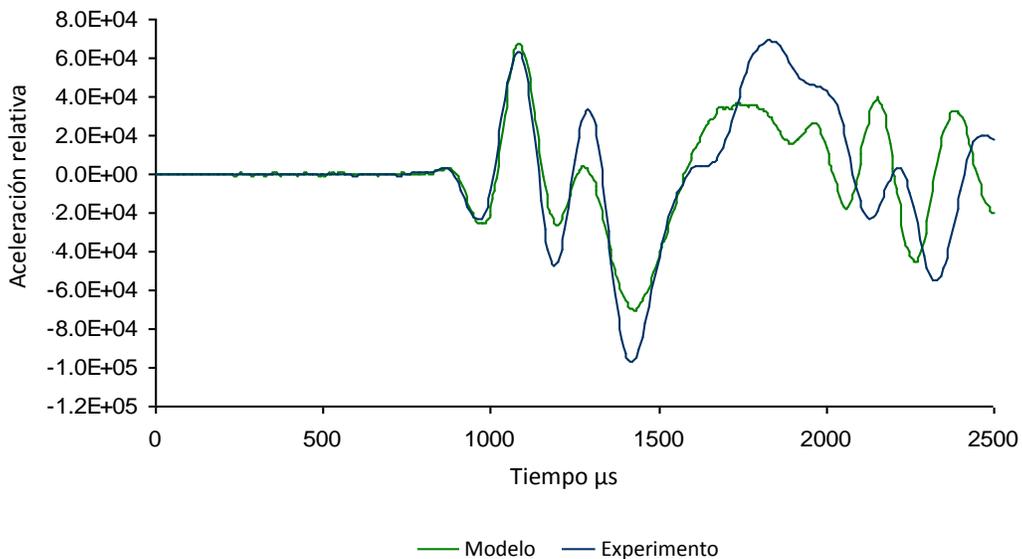


Figura 2.18 Respuesta dinámica sintética y experimental originada en el sensor 2

Para el segundo modelo generado, se agregó una unión y un miembro vertical, la nueva configuración se puede apreciar en la figura 2.19. La respuesta dinámica simulada y experimental se presenta en la figura 2.20. En estos resultados es evidente la presencia del efecto con el reflejo de la unión, que no se manifestaba en el modelo previo.

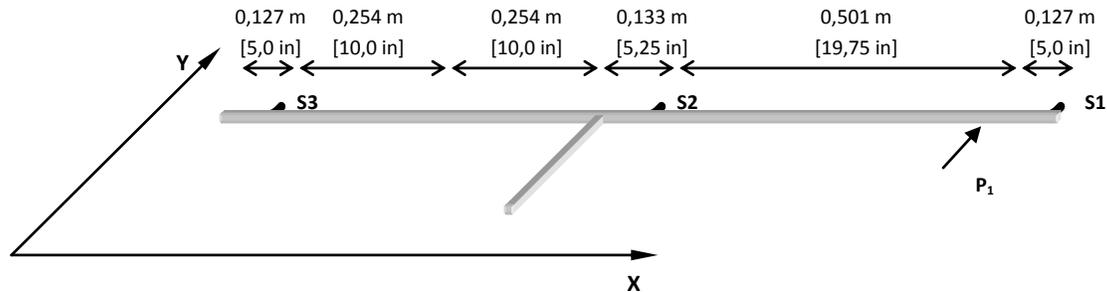


Figura 2.19 Segundo modelo con una unión y un miembro vertical adicional

Los datos mostrados en la figura 2.20, representan la respuesta del segundo modelo en el sensor 2. En este caso, los resultados numéricos semejan más los del modelo físico, pero aún es notoria la diferencia por la no existencia de las ondas reflejadas en las otras tres uniones del modelo físico. En este mismo caso, al analizar el registro del sensor 3, se observa una mayor discrepancia con respecto a la respuesta dinámica experimental, ya que está más alejado de la excitación y registra información de la segunda unión.

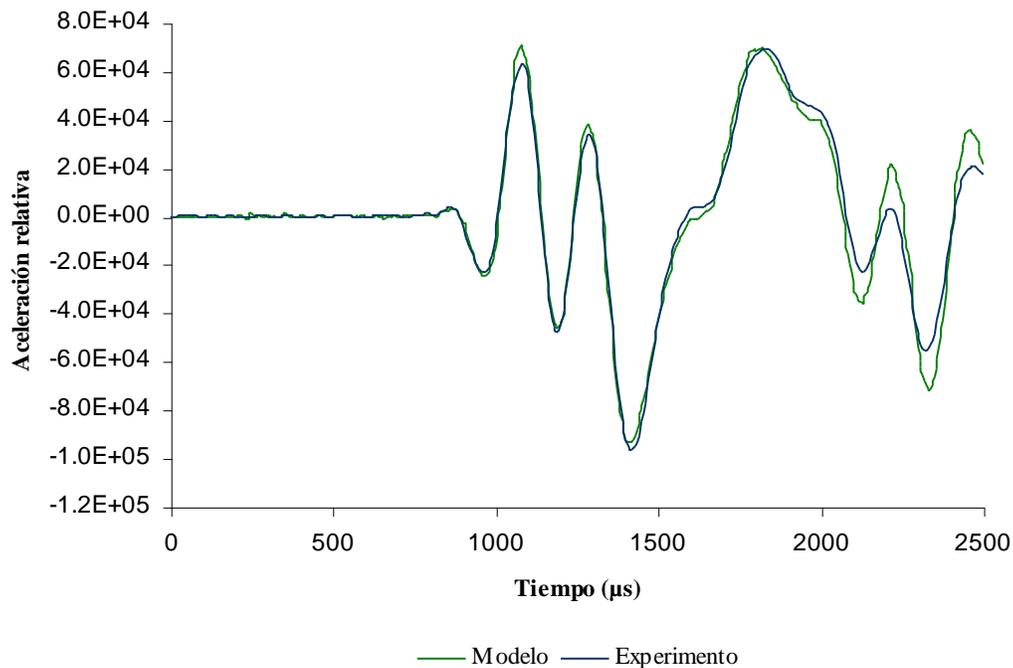


Figura 2.20 Respuesta dinámica sintética, del segundo modelo, y experimental coleccionada por el sensor 2

El tercer modelo que se generó, tiene como característica principal la incorporación de todas las uniones y los miembros verticales. La figura 2.21 muestra la respuesta dinámica sintética y experimental producida en el sensor 2 por este último modelo. Como era de esperar, la respuesta contiene la información de todas las uniones; es decir, aparecen las reflexiones producidas por cada una de las uniones del modelo. Aún en esta última comparación, se observan pequeñas diferencias en la magnitud de la respuesta dinámica debido a que no todos los parámetros han sido calibrados.

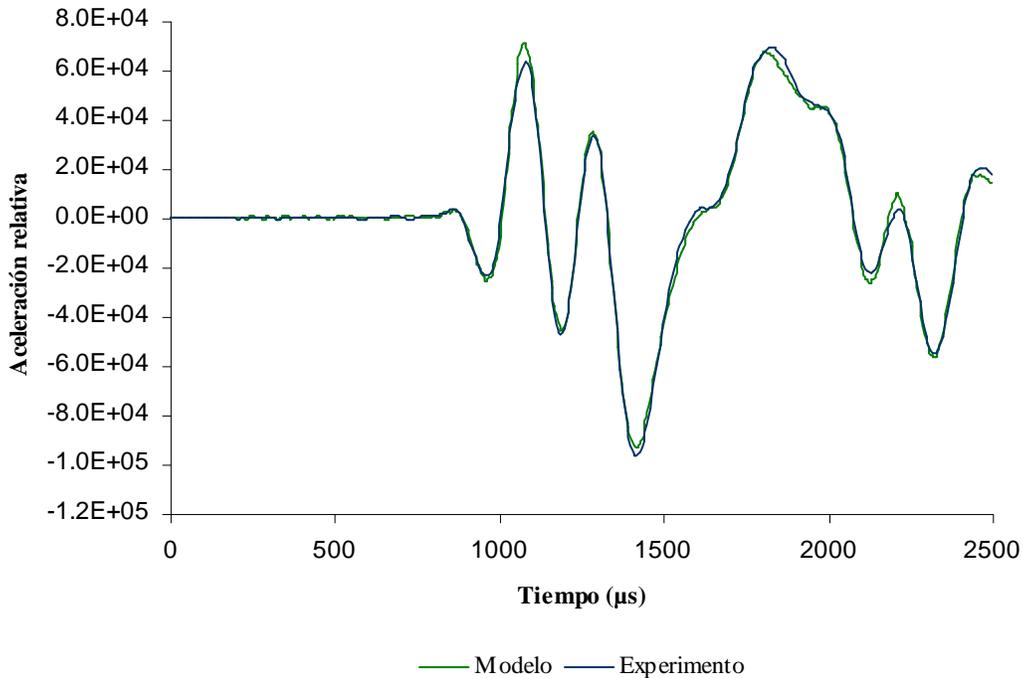


Figura 2.21 Respuesta dinámica sintética, del segundo modelo, y experimental coleccionada por el sensor 3

Aunque la figura 2.21 muestra una buena correlación entre el modelo físico y el modelo de elemento finito, todavía es necesario refinar la calibración del modelo H. Para esto, se realizó un nuevo experimento cuyo arreglo se muestra en la figura 2.22. Con la finalidad corregir las diferencias numéricas y experimentales, y tener una mejor calibración del modelo, se analizó la respuesta del sensor 2 que se ubicó alejado dos uniones del punto donde se excitó la estructura.

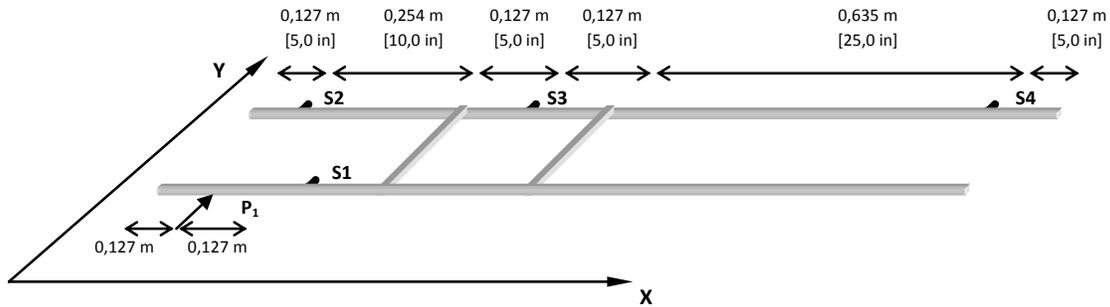


Figura 2.22 Segundo arreglo experimental del modelo H

Las respuestas numérica y experimental del comportamiento dinámico registrado por el sensor 2, se pueden apreciar en la figura 2.23. Al analizar la diferencia entre ambas señales en el intervalo de tiempo entre 1500 y 2250 μs , se concluye que la diferencia se debe principalmente al comportamiento de las uniones; por lo tanto, es fundamental un ajuste del modelo de elemento finito para tener una buena correlación entre ambas respuestas.

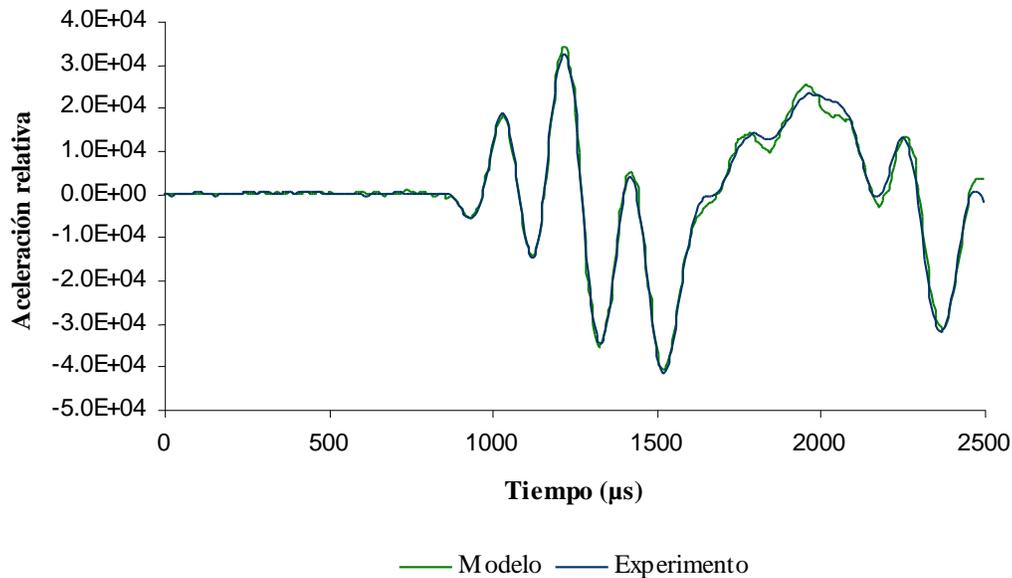


Figura 2.23 Respuesta dinámica en el sensor 2, segundo arreglo experimental

2.6 *StriDent*: Programa para la identificación de parámetros estructurales.

2.6.1 Identificación de parámetros

La identificación de parámetros estructurales es un ejemplo típico de un problema inverso parcialmente especificado, ya que algunos o la mayoría de los parámetros

estructurales son conocidos, pero otros (usualmente pocos) son desconocidos (Doyle, 64-69, 1993; Doyle, 1997). En el caso particular del modelo H, algunos de los parámetros fueron identificados de manera directa e inmediata (por ejemplo las dimensiones, densidad, momentos de inercia, áreas etc.); sin embargo, algunos otros parámetros (como el módulo de elasticidad y el amortiguamiento) tuvieron que ser determinados de manera indirecta a través de pruebas experimentales. En este segundo caso, también está considerada la modelación de las uniones.

Para la solución de un problema inverso es necesario realizar un experimento para medir algunas respuestas del sistema ante condiciones controladas; contar con un modelo de simulación de referencia (normalmente de elemento finito para estructuras) y tener un algoritmo inverso para identificar el valor de un parámetro deseado. En secciones anteriores ya se ha discutido sobre el modelo y el procedimiento experimental; en cuanto la solución del problema inverso, se utiliza un algoritmo de optimización basado en procesos de búsqueda y que se incorporó en un programa de computadora llamado *StriDent* (Doyle, 64-69, 1993; Doyle, 1997). La función de este programa es minimizar una función de error, definida entre las respuestas dinámicas experimental y de simulación, para optimizar el valor del parámetro desconocido.

2.6.2 Modelado de las uniones

En una sección previa se determinó la necesidad de refinar el modelo H de EF para mejorar y obtener una representación más adecuada de la respuesta dinámica con respecto a la del modelo físico y, en particular, se estableció la necesidad de refinar el modelado de las uniones. Así, en esta sección se describen los dos modelos que representan la unión y que fueron analizados para definir el mejor (figura 2.24). El primero de éstos, es un modelo que propone extender el área de las uniones en las direcciones vertical y horizontal, de manera que puedan simular el efecto de la propagación de las ondas a través de dicha unión. En este primer modelo, el objetivo es buscar una mejor representación para el paso de las vibraciones a través de la unión. El segundo modelo considera el uso de tres diferentes materiales en la unión: el acero para el tornillo que sujeta la unión, el aluminio y un tercer material que represente el comportamiento de la interfase entre el aluminio y el acero. Estas dos formas de representar las uniones se identifican como Unión-T y Unión-S, respectivamente.

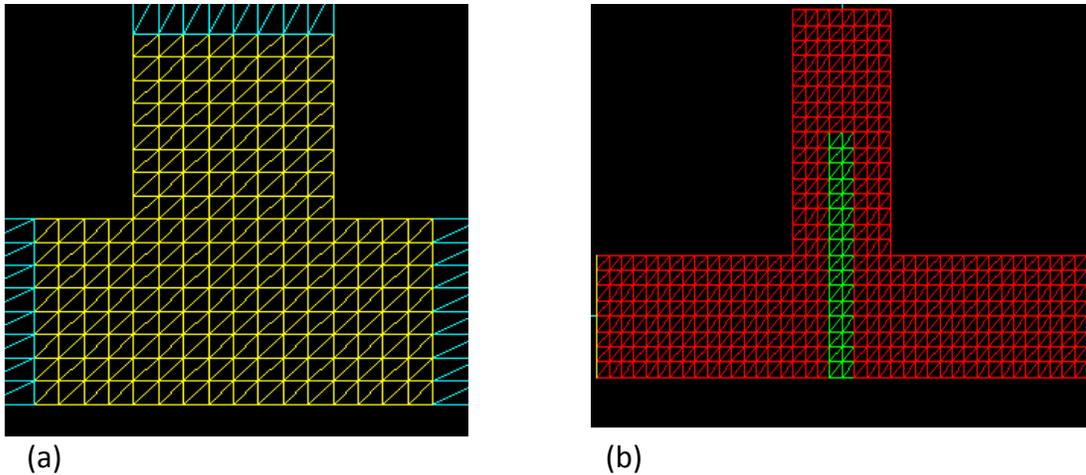


Figura 2.24 Modelos para representar el comportamiento de las uniones (a) utilizando dos materiales (b) utilizando tres materiales

Para evaluar el comportamiento de ambos tipos de unión, se efectuaron dos pruebas en el laboratorio cuyo arreglo experimental se muestra en la figura 2.25 y cuya única diferencia fue el punto de excitación sobre la estructura.

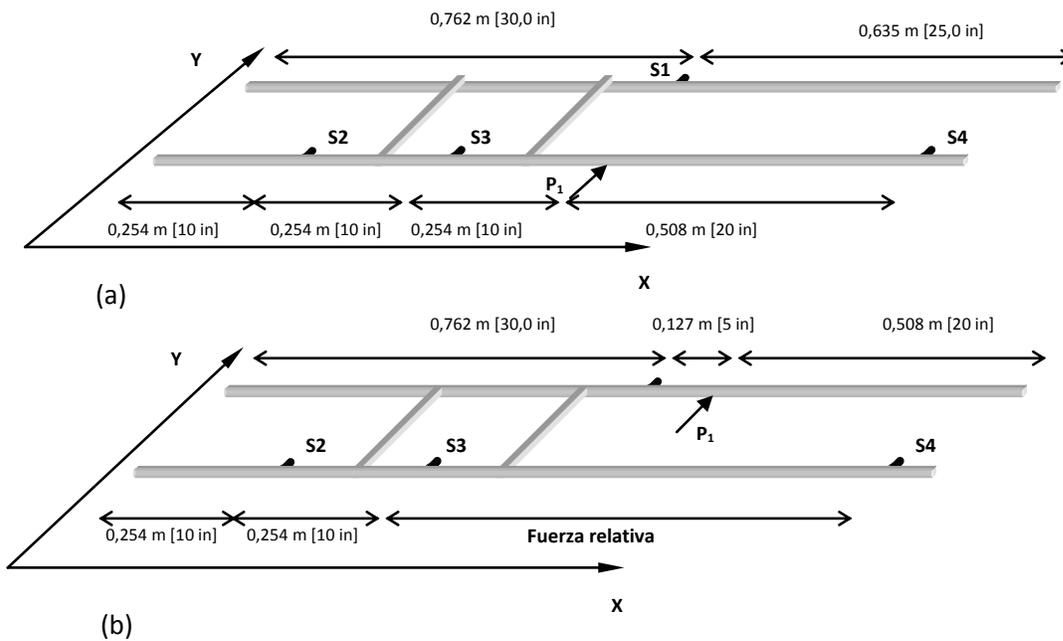


Figura 2.25 Arreglos experimentales utilizados para analizar los modelos propuestos para representar las uniones

Para determinar el valor óptimo del módulo de elasticidad de los materiales se utilizó el programa *StriDent*, teniendo como valor máximo esperado de 95,0 GPa (14×10^6 psi) y mínimo esperado de 69,0 GPa (10×10^6 psi); mientras que el valor óptimo esperado es el valor teórico del módulo de elasticidad del aluminio. En

ambos modelos, los parámetros identificados fueron el módulo de elasticidad del aluminio y el de la unión, ambos parámetros son calculados simultáneamente usando la respuesta dinámica experimental de los sensores 1, 2 y 3 como datos de entrada para el modelo de EF.

En la figura 2.26 se muestran los resultados que se obtuvieron con el programa *StriDent* para el módulo de elasticidad del aluminio, respecto a los dos tipos de uniones considerados. Para el modelo de la Unión-T, se puede ver que la variación es sólo de 73,692 GPa ($10,68 \times 10^6$ psi) a 73,83 GPa ($10,70 \times 10^6$ psi), que son valores cercanos al nominal; se destaca también que usando este tipo de modelo los valores convergen rápidamente después de la cuarta iteración. Para el modelo de la Unión-S, la variación es de 72,933 GPa ($10,57 \times 10^6$ psi) a 73,209 GPa ($10,61 \times 10^6$ psi), que también son apropiados para el aluminio; sin embargo, cuando se dan por entrada la respuesta dinámica del cuarto arreglo experimental, el programa converge hasta la iteración 16.

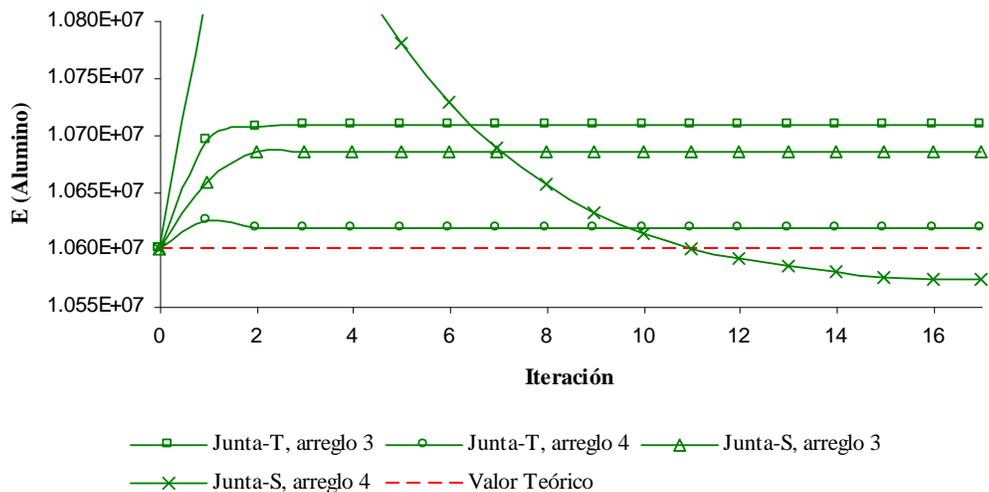


Figura 2.26 Valores obtenidos para el módulo de elasticidad del aluminio usando los dos tipo de uniones propuestas

Las figuras 2.27 y 2.28 muestran la respuesta dinámica y experimental de los sensores 1 y 2 para el arreglo experimental cuatro. Como se puede apreciar, la similitud entre ambas respuestas es adecuada, ambas señales se relacionan casi perfectas con excepción de la diferencia en magnitud originadas en el sensor 1, en los instantes de tiempo inicial. Es claro que ambas representaciones de las uniones son mucho más completas y se obtiene mayor información que las representaciones originales. De ambos gráficos se puede apreciar que hay una ligera mejor representación cuando se usa el modelo de la Junta-T.

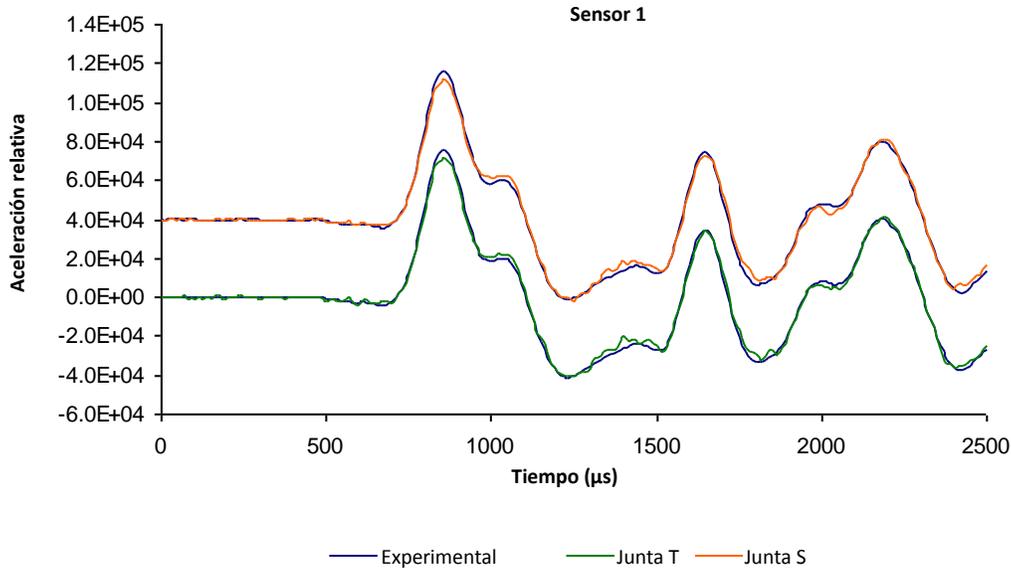


Figura 2.27 Comparación de la respuesta dinámica experimental y del modelo de EF para el arreglo 4, sensor 1

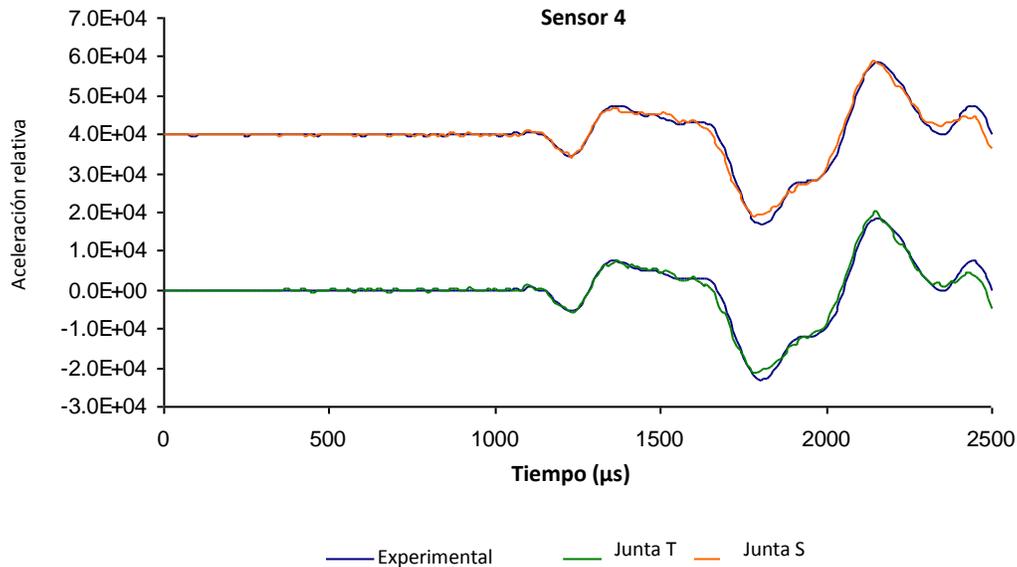


Figura 2.28 Comparación de la respuesta dinámica experimental y del modelo de EF para el arreglo 4, sensor 4

2.6.3 Verificación de los modelos de EF

Una forma confiable para verificar la calibración de un modelo de EF es a través de una prueba experimental para la reconstrucción de la fuerza de excitación, ya que en estos casos la calibración debe ser muy precisa para obtener buenos resultados (Adams, 225-236, 2002; Doyle, 1997; Pines, 627-636, 1998). Para esto, se utiliza el modelo de EF calibrado, las respuestas experimentales de la estructura y el programa para la solución de problemas inversos.

Para poder resolver el problema inverso de la reconstrucción de la fuerza, es necesario resolver un sistema mal condicionado, por lo que utiliza un parámetro de regularización λ ; Adams (2002), Doyle (1997) y Pines (1998) tratan con profundidad el tema de reconstrucción de la fuerza. Para determinar el valor del parámetro de regularización, se realizó una serie de pruebas usando las respuestas dinámicas generados por el modelo de EF y agregándoles ruido aleatorio. Las pruebas consistieron en variar el valor del parámetro de regularización y seleccionar el mejor valor a través de la comparación entre la fuerza original y la generada por el problema inverso; una vez seleccionado el valor óptimo de λ , éste se utilizó como valor inicial para reconstruir la fuerza utilizando las respuestas dinámicas experimentales.

Las figuras 2.29 y 2.30 muestran la reconstrucción de la fuerza de excitación para diferentes valores de λ utilizando los sensores 1 y 2. El algoritmo empleado para reconstruir la fuerza fue *StriDent* y detalles sobre su uso y programación se pueden consultar en Doyle (1997). En la figura 2.29, utilizando la respuesta del sensor 1, se puede apreciar que el mejor valor para λ es de 1×10^7 , puesto que para valores menores se puede observar la formación de una onda sinusoidal debido al mal condicionamiento del problema, y para valores mayores la magnitud de la fuerza no es la misma ya que comienza a tener un decremento con respecto al valor de la fuerza original. En la figura 2.30 se muestran los resultados empleando la respuesta del sensor 2 y se encuentra que el valor de regularización más apropiado es de 1×10^6 .

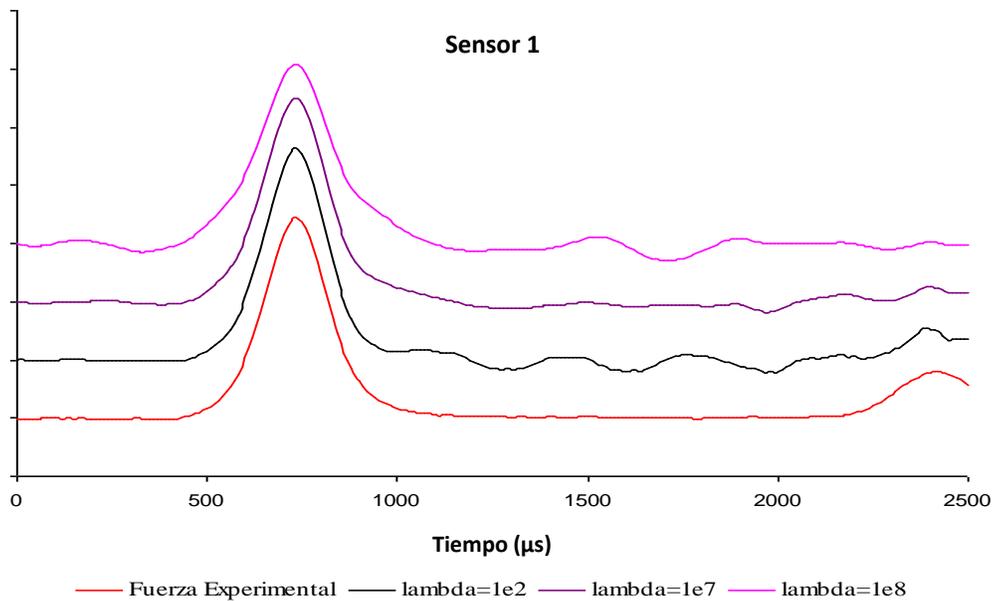


Figura 2.29 Efecto del parámetro de regularización λ sobre la reconstrucción de la fuerza utilizando datos generados por el modelo de EF

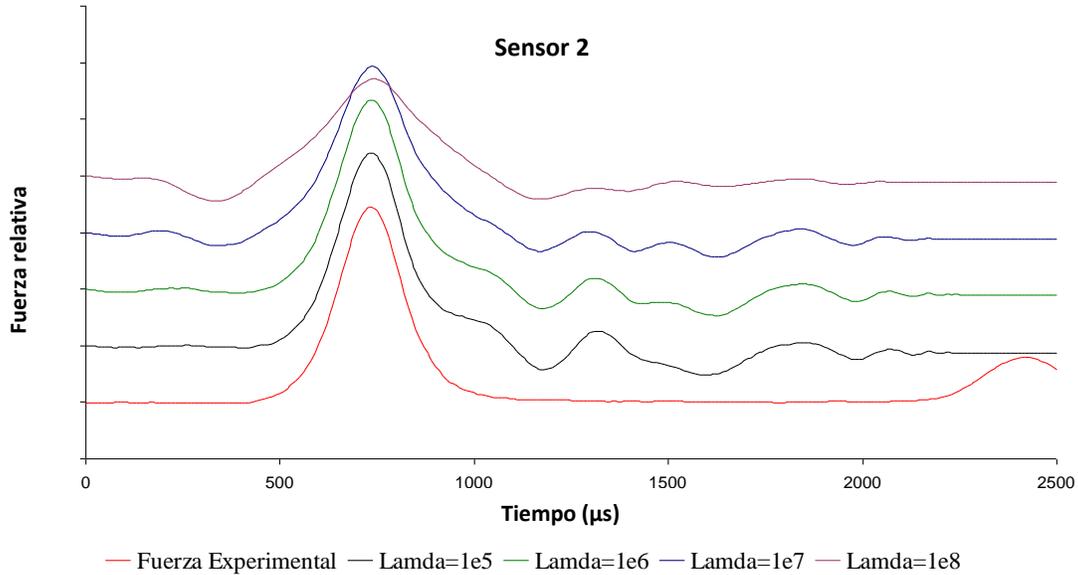


Figura 2.30 Efecto del parámetro de regularización λ sobre la reconstrucción de la fuerza empleando los datos generados por el Sensor 2

En la figura 2.31 se puede observar la reconstrucción de la fuerza experimental comparando la respuesta de los dos tipos de modelos propuestos para las uniones y utilizando el sensor 1, el cual es el más cercano al lugar de excitación. La reconstrucción de la fuerza es muy buena para la Unión S, la cual muestra una mejor aproximación en la magnitud y un menor efecto en la formación de la onda sinusoidal después de la excitación. Cabe hacer notar que ambos modelos no pueden reconstruir la parte final de la excitación, posterior a los 2250 μs , debido a la falta de información en tiempo.

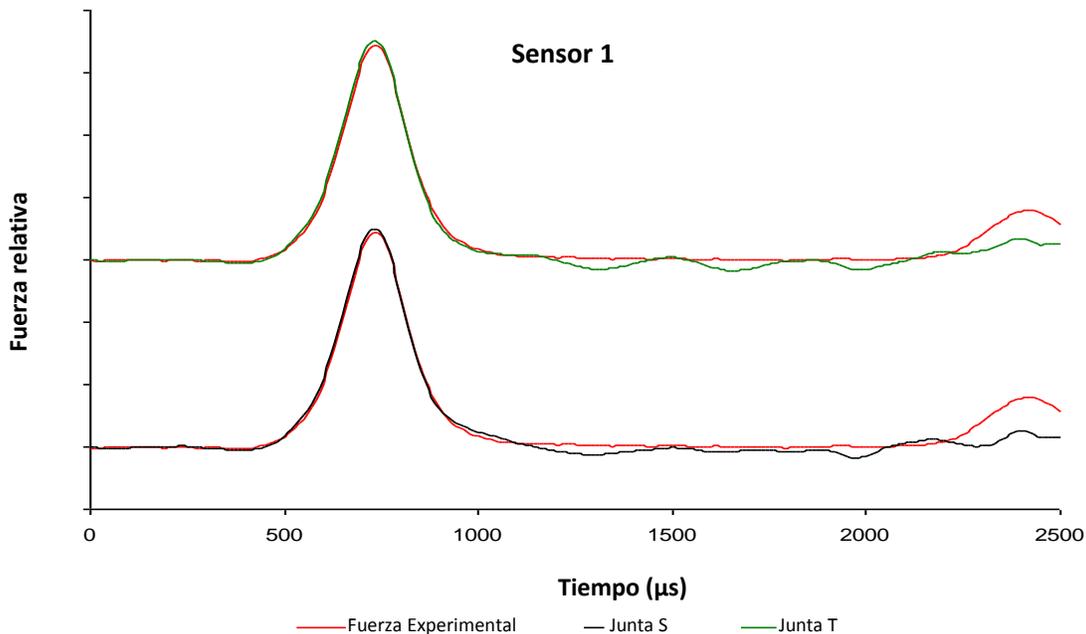


Figura 2.31 Reconstrucción de la fuerza utilizando la respuesta dinámica experimental del sensor 1

En el caso de la reconstrucción de la fuerza empleando el sensor 2, el cual es el más lejano con respecto al lugar de impacto, en la figura 2.32 se puede ver que para los instantes de tiempo inicial la reconstrucción para ambos modelos es buena; sin embargo, después de los 900 μs , ésta comienza a deteriorarse. La pobre aproximación en los instantes finales se debe a que el sensor 2 recibe menos información por el trayecto que debe viajar la onda para llegar a dicho sensor. Este problema se puede minimizar cuando, para reconstruir la fuerza, se utilizan dos o más sensores.

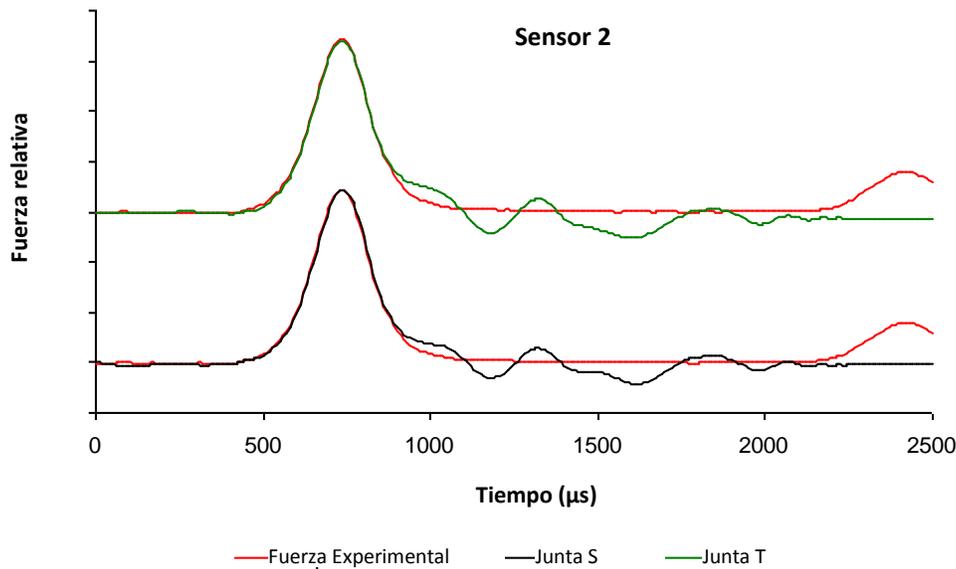


Figura 2.32 Reconstrucción de la fuerza utilizando la respuesta dinámica experimental del sensor 2

La reconstrucción de la fuerza usando el sensor 3 se puede ver en la figura 2.33. La gráfica muestra una mejor representación de la fuerza que cuando se emplea el sensor 2, esto se debe a su posición respecto al impacto. De nueva cuenta, las dos formas de representar las uniones en el modelo de EF pueden reconstruir la fuerza adecuadamente. Para el sensor 3 ésta se acopla muy bien a la excitación experimental hasta los 1000 μs y, para los tiempos posteriores, se puede observar otra vez el problema de la generación de la onda sinusoidal por el mal condicionamiento del problema.

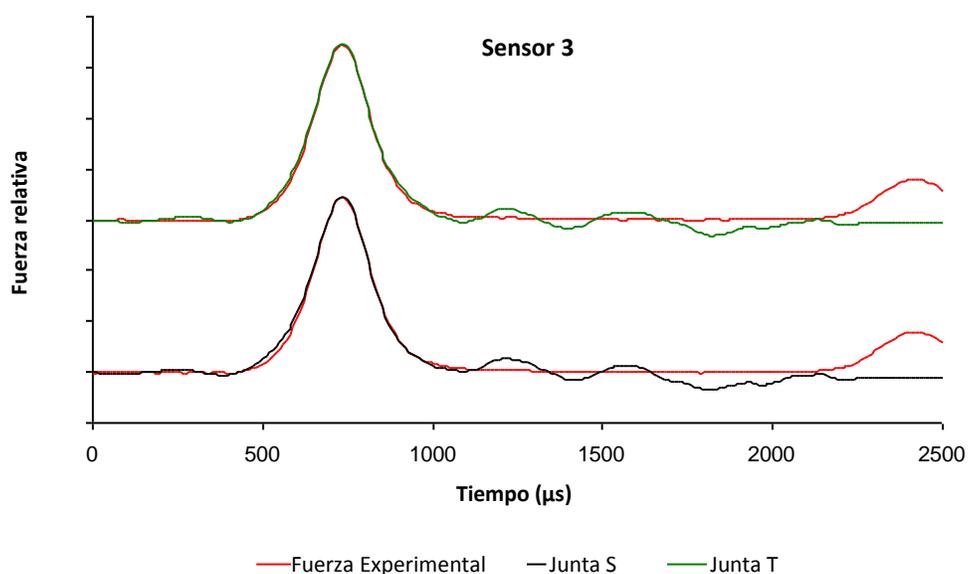


Figura 2.33 Reconstrucción de la fuerza utilizando la respuesta dinámica experimental del sensor 3

Finalmente, en la figura 2.34, se muestra la reconstrucción de la fuerza utilizando la respuesta dinámica experimental de los sensores 1, 2 y 3 simultáneamente. Para las uniones S y T se puede observar que la identificación de la fuerza es bastante precisa, como se puede apreciar en la figura 2.34. En este gráfico se puede apreciar una mejor representación cuando el modelo para la Unión T es utilizado, aunque esta mejoría no es muy significativa. Cabe también mencionar que se distingue una pequeña diferencia en la magnitud de la fuerza en ambos modelos; en uno y otro casos la fuerza experimental es mayor que la generada a través del problema inverso.

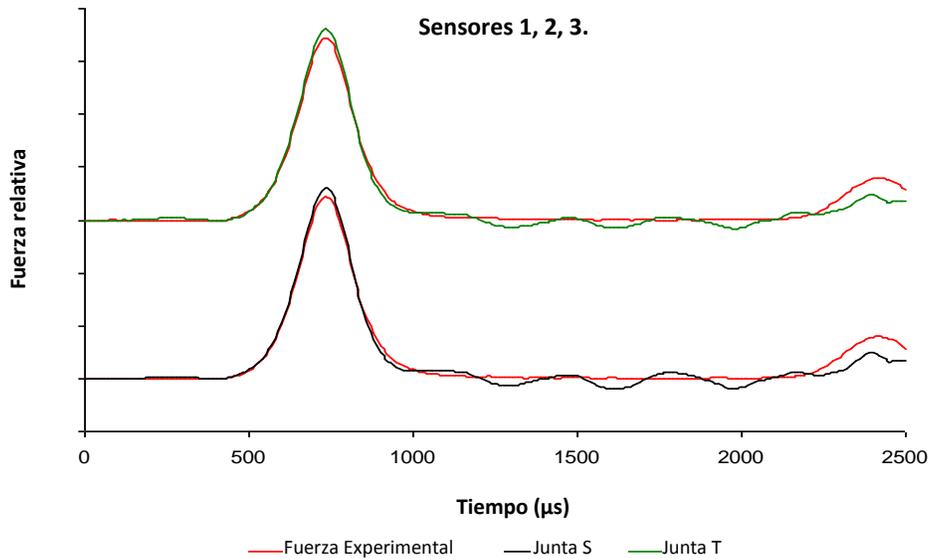


Figura 2.34 Reconstrucción de la fuerza utilizando la respuesta dinámica experimental utilizando múltiples sensores

2.6.4 Modelo de EF, H y viga calibrados

Algunas de las conclusiones de las últimas secciones se pueden sintetizar de la siguiente manera: primero, es mejor emplear elementos tipo marco mejorado para las secciones largas, ya que producen las mismas respuestas que los elementos tipo placa bidimensional. Segundo, para representar la unión del modelo H conviene emplear elementos placa bidimensional y, aunque ambas formas de representar la unión tanto la Unión S como la T, mostraron ser apropiadas para su representación, se utiliza finalmente la Unión S por las ligeras mejoras que muestra. En la figura 2.35 se observa esquemáticamente el modelo H final, el cual como se mencionó, utiliza una combinación de elementos tipo marco mejorado y placa, el resto de los parámetros calculados en las secciones anteriores y su geometría representan las características finales del modelo H.

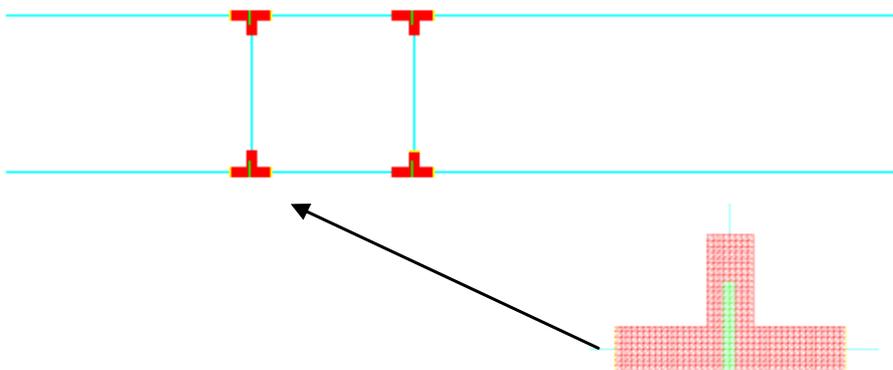


Figura 2.35 Representación final del Modelo H

Con respecto al modelo Viga empleó sólo elementos tipo marco mejorado porque, al no tener secciones complejas el modelo, no fue necesario incluir ningún otro tipo de elementos para su representación. Para garantizar que ambos modelos representaran el comportamiento dinámico adecuadamente y que pudieran generar las respuestas dinámicas en cualquier lugar, se realizó un conjunto de repuebas adicionales usando el arreglo experimental de la Figura 2.36. La fuerza de excitación para los experimentos tiene una duración de $350 \mu s$, la ubicación de los sensores y el transductor de fuerza se puede ver en la Figura 2.36, los datos son recolectados a través del Dash 18 a una frecuencia de $0,1 \text{ MHz}$

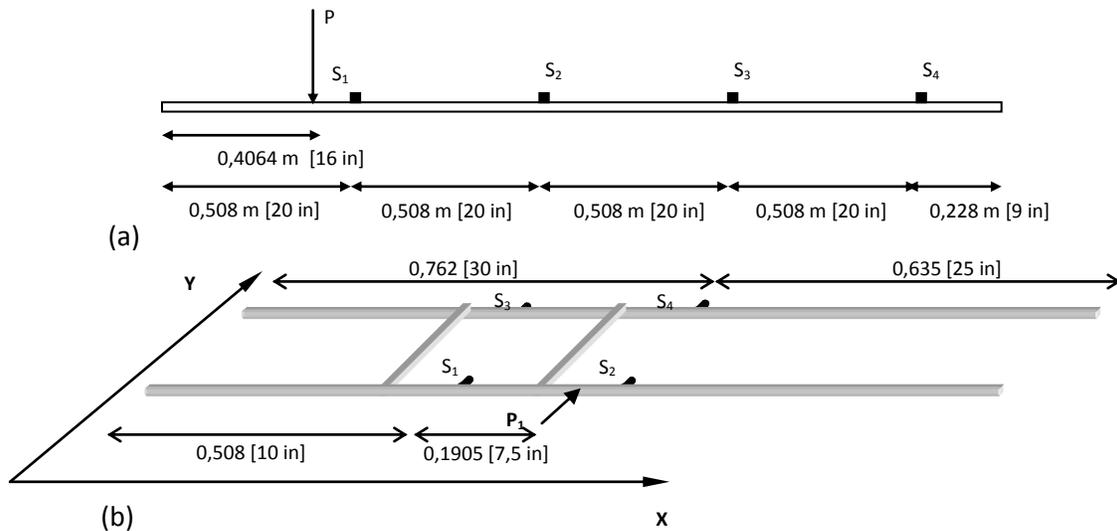


Figura 2.36 Arreglos experimentales (a) Modelo H (b) modelo Viga

Las figuras 2.37 y 2.38 muestran las respuestas dinámicas generadas por el modelo viga de EF y experimentales para los sensores 1 y 3 respectivamente. Como se puede apreciar de las figuras, el comportamiento dinámico de la señal concuerda muy bien con respecto a la respuesta experimental aunque por algunos instantes de tiempo tienen pequeñas variaciones en magnitud.

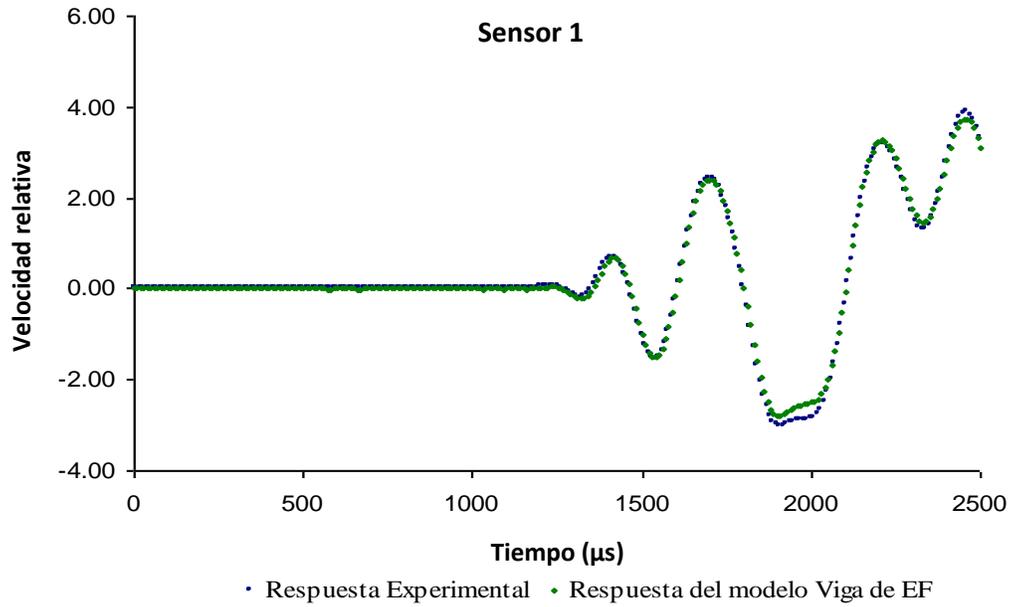


Figura 2.37 Comparación de las respuestas dinámicas para el Sensor 1

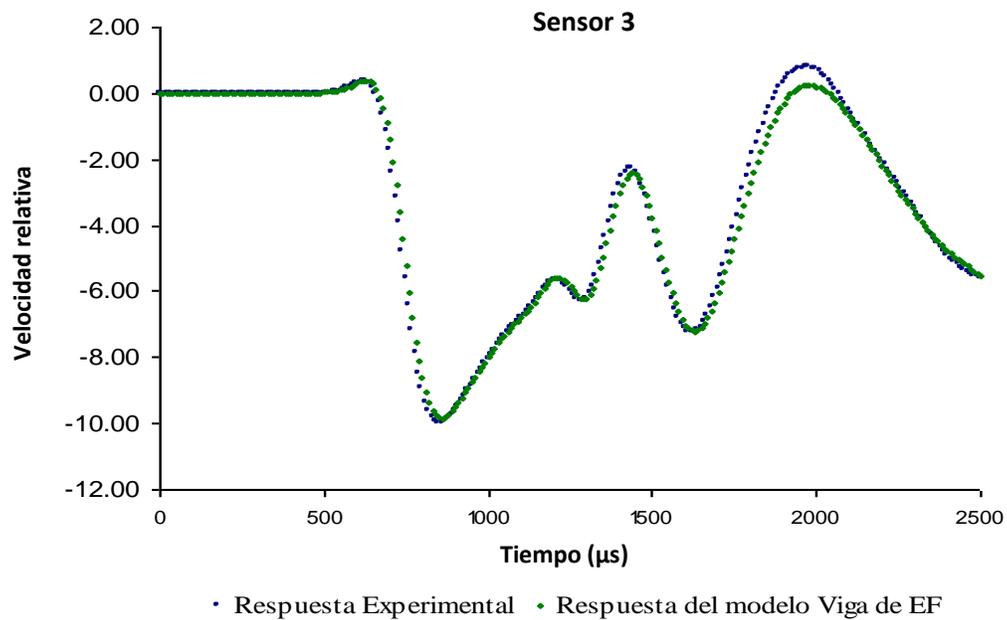


Figura 2.38 Comparación de las respuestas dinámicas para el Sensor 3

En las figuras 2.39 y 2.40 se puede ver la comparación entre las respuestas experimentales y del modelo H para los sensores 2 y 4. Como se puede ver en ambos casos, la correlación entre el par de respuestas es aceptable. En el caso del sensor 2 se observó que las dos señales son casi iguales, con pequeñas diferencias en magnitud en algunos instantes de tiempo; mientras que el comportamiento dinámico de ambas es similar. Los dos modelos de EF

generados, H y Viga, serán empleados en los próximos capítulos para asociar el daño a cambios en los parámetros estructurales.

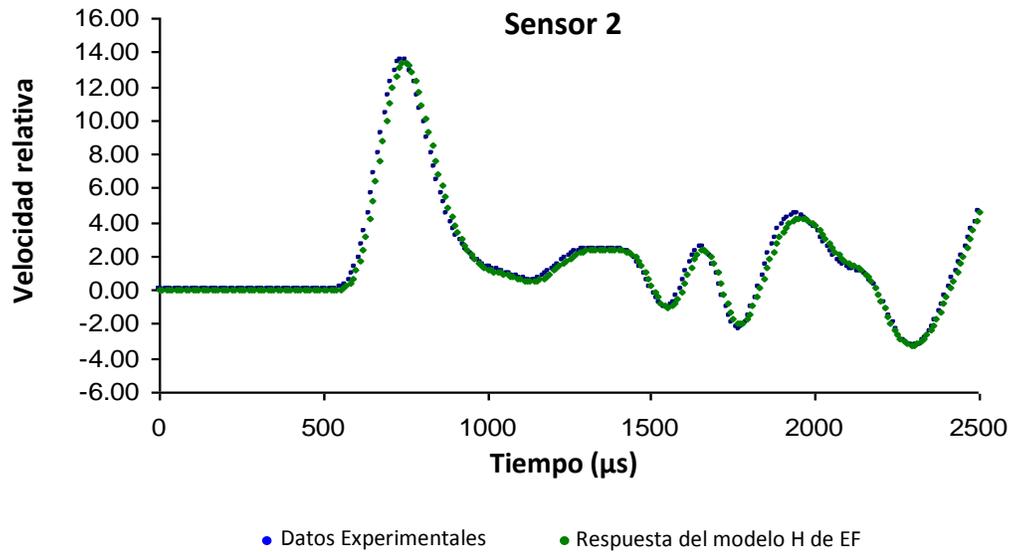


Figura 2.39 Comparación de las respuestas dinámicas para el Sensor 2.

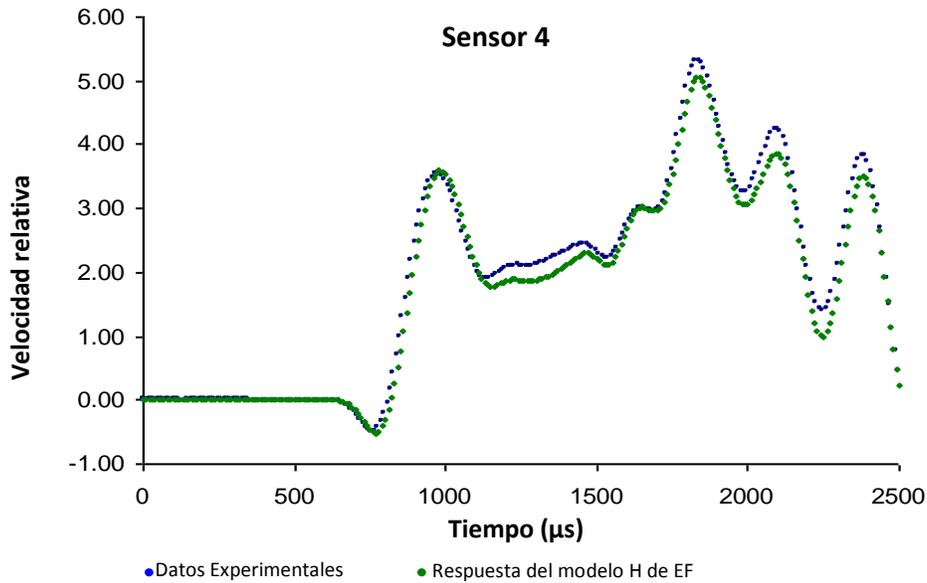


Figura 2.40 Comparación de las respuestas dinámicas para el Sensor 4

3 Método de Búsqueda Global

Este capítulo se enfoca al problema de localización de daño mediante la identificación de cambios en los parámetros estructurales. La base de este método es la existencia de un modelo estructural de EF previamente calibrado, lo cual fue discutido en el capítulo 2.

Un parámetro, en el presente contexto, es cualquier variable estructural que describe al modelo de EF y que puede ser modificado sin cambiar la estructura básica del modelo mismo. Ejemplos de parámetros estructurales son: el módulo de elasticidad, la densidad, la geometría y el amortiguamiento (Doyle, 404-408, 1993; Doyle, 1997). Por otro lado, existen otras variables a las cuales se les denominará como indirectas, ya que no describen una característica directa del modelo, sino que son resultado de la respuesta del modelo ante una fuerza, carga o acción; tal es el caso del factor de intensidad de esfuerzos, la frecuencia natural de vibración o la velocidad de propagación de ondas. Todas las variables indirectas pueden cambiar por efecto de los cambios en los parámetros estructurales o mediante la modificación del programa fuente al modificar el modelo matemático que describe el fenómeno físico en cuestión. En el desarrollo de esta investigación, para la calibración de un modelo, sólo se consideran los parámetros estructurales directos, especialmente los siguientes: módulo de elasticidad, masa (densidad), tamaño del elemento finito y geometría (espesor o área). En consecuencia, una vez calibrado el modelo, los cambios subsecuentes en los parámetros estructurales serán considerados como daño.

El daño es sinónimo a cambios en la estructura que desmeritan la capacidad estructural inicial. Estos cambios, directa o indirectamente, se manifiestan en pérdida de masa o de rigidez en el modelo estructural. La presencia de daño en una primera etapa puede ser detectada comparando la respuesta dinámica experimental de una estructura dañada con respecto a otra similar sin daño; sin embargo, tener dos modelos estructurales para comparación no es muy factible. Comparar las repuestas experimentales de una estructura dañada con las repuestas experimentales previas a la existencia de daño, aunque es posible, es muy restrictivo ya que sólo se limita al análisis de las condiciones de prueba en las cuales se obtuvieron las repuestas experimentales sin daño, lo cual implica cierto nivel de repetibilidad y puede estar restringido por la sensibilidad misma del sistema. Por lo anterior, es donde se concluye que la mejor opción es involucrar un modelo de EF calibrado de la estructura para que asuma el papel de la estructura sin daño y, a la vez, permita modificar los parámetros estructurales para identificar y analizar el daño asociado al cambio en éstos.

Así, se puede establecer que el daño es toda aquella afectación a la estructura que involucra cambios en los parámetros estructurales, como son el módulo de elasticidad, la densidad, el espesor o el amortiguamiento.

Partiendo de la definición de daño anterior, se propone un método de búsqueda global para la localización e identificación de daño en una estructura. Este método se basa en el análisis comparativo de las respuestas experimentales del modelo físico, con las respuestas de un modelo de EF calibrado al que se le modifican sus parámetros estructurales hasta igualar ambas respuestas. Para ello, es necesario el diseño de una estrategia secuencial para la modificación de los parámetros estructurales y de un método de optimización para minimizar la diferencia entre las respuestas experimentales y las del modelo de EF.

Para lo anterior, además de definir intervalos de variación para los parámetros estructurales, se adicionan dos variables agregadas de búsqueda que se relacionan con el tamaño del daño (número de elementos involucrados) y la ubicación del mismo (posición del elemento modificado). Como se mostró en el capítulo 1, una vez establecido un intervalo de variación suficientemente angosto para los parámetros desconocidos (incluyendo posición), el programa *StriDent* puede ser usado para determinar el valor de los parámetros estructurales asociados al daño (Doyle, 64-69, 1993; Doyle, 1997). Por lo tanto, este capítulo describe el procedimiento para la búsqueda global del daño y la reducción del rango de los parámetros estructurales.

3.1 Identificación de cambios en los parámetros

3.1.1 Detección del cambio de parámetros

El objetivo principal es detectar el cambio en los parámetros estructurales de una manera sensible y única, suponiendo que un experimento es diseñado en forma adecuada de manera que suficientes respuestas dinámicas fueron registradas de sensores colocados en diferentes lugares de la estructura. Así, el daño puede ser detectado; sin embargo, no es necesariamente cuantificado en magnitud, ni posición. En esto último es que radica el verdadero reto y con ello se mostrará la utilidad total y conveniencia de tener un modelo de EF calibrado (Bathe, 1995; Friswell, 1995; Hollansworth, 315-322,1996). Tomando ventaja del modelo de EF, es posible calcular la respuesta dinámica sin daño de la estructura, a la cual se le nombrará respuesta dinámica simulada. En la figura 3.1 se puede ver un ejemplo de la respuesta dinámica experimental y simulada cuando hay un daño, comparando ambas señales, se puede concluir que la estructura está dañada. Si ambas respuestas fueran similares, significaría que la estructura no tiene daño. Como primera fase, el daño es muy sencillo de determinar, sin embargo encontrar los parámetros asociados a este daño y su ubicación es el reto primordial.

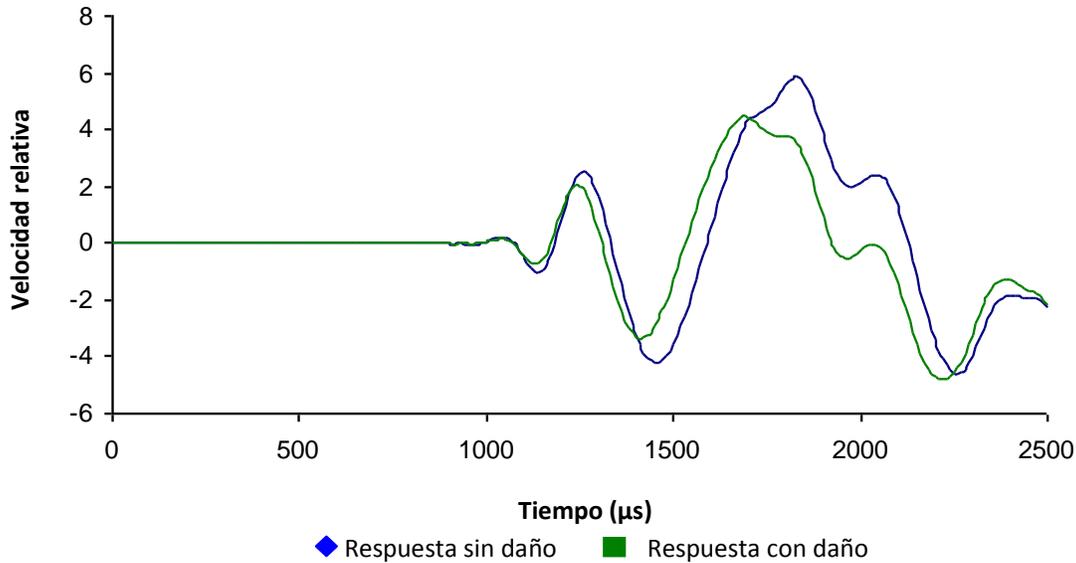


Figura 3.1 Respuestas dinámicas antes y después del daño

El rango en cada uno de los parámetros estructurales determinará una ventana de *búsqueda* individual de parámetros. Lo anterior significa que, basado en conocimiento previo de la estructura o por experiencia de los inspectores, se pueda definir de inicio los parámetros estructurales y su rango; por ejemplo, si se considera una reducción en la sección transversal de un material que conforma una estructura en un determinado lugar y se asocia con daño, se comenzará partiendo de que el cambio en la sección transversal sólo fue en una pequeña variación con respecto a su valor inicial; por lo tanto, esta ventana puede ser escogida, desde un valor inicial conocido --valor de diseño del material-- hasta una variación pequeña, por ejemplo un 10% de reducción respecto al valor inicial. Con relación al tamaño del daño, se puede usar el mismo criterio, considerando que el tamaño inicial es cero y, si se realiza una inspección rutinaria de la estructura, se puede inferir que el daño no se expandirá de manera súbita y por lo tanto también establecer un valor máximo aceptable. Finalmente, la posición, es la variable más complicada debido a que el daño puede aparecer en cualquier lugar de la estructura; por lo que la búsqueda para ésta se realiza en toda la estructura; es decir, debe ser una búsqueda global.

Cuando se selecciona la ventana de búsqueda de los parámetros estructurales, otros factores pueden jugar un papel importante; por ejemplo, si la estructura está más expuesta a daño en algunas regiones que en otras. Un puente puede ser un caso de este tipo, éste puede tener secciones en contacto con agua salina por intervalos de tiempo y por lo tanto estas secciones estarán más expuestas a tener problemas de corrosión, en cuyo caso se conocerían los lugares más factibles de daño y se delimitaría la ventana de búsqueda de los parámetros.

3.1.2 Cuantificación del cambio en los parámetros

Una nueva etapa del problema comienza cuando se conoce que la estructura tiene daño y, ahora, el objetivo es encontrar los valores de los parámetros que representan dicha condición y producen la respuesta dinámica registrada experimentalmente. Para ello, se definió una función de error de mínimos cuadrados entre la respuesta experimental y simulada, que se aplica de manera independiente para cada nodo instrumentado. Así, el error asociado a un cambio en los parámetros estructurales se cuantifica usando esta función de error (Ecuación 3.1) que se obtiene de la diferencia entre la respuesta dinámica experimental en el nodo j $\{r_{\text{exp}}\}_j$ y la respuesta del modelo de EF en ese mismo nodo j $\{r_{\text{mod}}\}_j$. En este caso, el vector de respuestas $\{r\}_j$ puede estar definido por los desplazamientos $\{u\}$, las velocidades $\{\dot{u}\}$ o las aceleraciones $\{\ddot{u}\}$, según el tipo de sensor que se utilice. Si no hay diferencia entre ambas respuestas, significa que los parámetros estructurales utilizados en el modelo corresponden con los de la estructura real. Así, cuando el error es significativo, se infiere que existe daño y que, mediante un proceso recursivo, es posible variar los parámetros estructurales del modelo para minimizar dicho error e inferir las cualidades del daño.

$$E_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (r_{i,j,\text{exp}} - r_{i,j,\text{mod}})^2}{N}} \quad (3.1)$$

El término r_i representa la respuesta dinámica en el nodo j al tiempo i y N es el número de datos en el que dicha respuesta es discretizada en el tiempo. El tiempo total y la frecuencia de muestreo determinarán el número de datos en la ecuación de error; por ejemplo, si los datos son adquiridos a una frecuencia de 100 kHz durante un periodo de tiempo de 2500 μs , los puntos a evaluar en la ecuación de error serán 250. La figura 3.2 representa un segmento de la figura 3.1 para visualizar con más detalle la idea de la cuantificación de los puntos discretos para todos los instantes.

La aplicación de esta función de error tiene muchas ventajas; la primera, permite el uso de diferente tipos de sensores como acelerómetros, velocímetros, extensómetros, etc.; segunda, sirve para cualquier tipo de estructura; tercera, no se restringe a problemas lineales, siempre y cuando se pueda modelar el comportamiento dinámico no lineal para cualquier evento; y cuarta, no depende del tipo de prueba, por lo que evaluar vibraciones mecánicas (que se caracterizan por tener largos periodos de tiempo y bajas frecuencias) o la propagación de ondas (normalmente definidas por periodos de tiempo muy cortos y contenido de altas frecuencias).

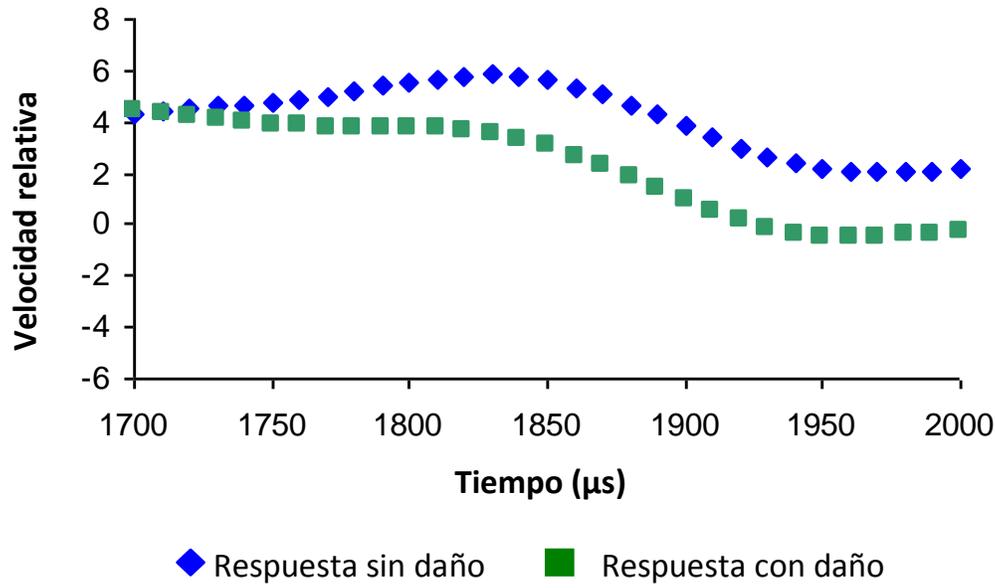


Figura 3.2 Extracción del error por mínimos cuadrados entre las respuestas dinámicas experimentales y del modelo de EF calibrado

3.2 Metodología para la búsqueda del cambio en parámetros

3.2.1 Método de Búsqueda Global

Para identificar los parámetros asociados con daño, es necesario generar datos, respuestas de simulación, con diferentes valores en los parámetros estructurales. La idea básica supone un daño inicial, al cual se le atribuye una posición, un tamaño y otros parámetros iniciales, para los cuales será calculada la respuesta de simulación para deducir el error cuadrático respecto a la señal experimental de la estructura dañada. Estos valores iniciales y su rango quedan definidos en las ventanas de búsqueda. El siguiente paso es cambiar uno de los parámetros estructurales, dejando los otros constantes, y calcular tanto su respuesta simulada como su error, repitiendo este proceso hasta abarcar todos los valores dentro del rango para un parámetro, para todos los parámetros seleccionados inicialmente en las ventanas de búsqueda. La posición del daño se determina bajo las condiciones para las cuales la función de error se minimiza.

El concepto descrito fue implementado en un código de computadora que permite modificar los valores de los parámetros estructurales automáticamente sobre el rango de variación de los parámetros. El código llamado Método de Búsqueda Global (MBG), es básicamente una serie de ciclos iterativos que efectúan los programas *GenMesh* y *StaNyn* en cada ciclo (Doyle, 64-69, 1993; Doyle, 1997). *GenMesh* es un código que modifica el archivo que define la estructura del modelo de EF y que permite cambiar el valor de los parámetros estructurales de forma automática. *StaNyn* es un programa el software de EF para calcular la respuesta

dinámica simulada del modelo. Una vez generada la respuesta de simulación, el error cuadrático es calculado y almacenado en el disco duro junto con la respuesta.

El diagrama del programa para la búsqueda global se muestra en la figura 3.3. El programa tiene algunas características importantes que vale la pena señalar para mejorar la búsqueda de los parámetros en toda una estructura. La primera de ellas es que la ventana de búsqueda puede ser de cualquier tamaño para cualquier parámetro, lo que da la pauta para que la búsqueda sea, sobre todo, el conjunto de valores en un parámetro o sólo para una pequeña parte del mismo; por ejemplo, en el caso de la posición, ésta puede ser en toda la estructura o sólo sobre un miembro o sección en particular. La segunda ventaja es que es posible discretizar cada uno de los parámetros en forma individual, con cualquier valor de discretización; por ejemplo, si se toma de nueva cuenta la posición, la búsqueda se puede realizar sobre cada nodo de la estructura o se puede realizar cada 4 nodos. La tercera ventaja es que las respuestas dinámicas generadas por el cambio en los valores de los parámetros pueden ser almacenadas en una base de datos, lo anterior significa que una sola corrida es necesaria para un experimento en particular y para evaluar la estructura en un futuro. Si bien las respuestas pueden ser diferentes debido al impacto de la excitación, éstas se pueden guardar en funciones de respuesta en el dominio de la frecuencia y, por tanto, hacerlas independientes del impacto de excitación. Estas respuestas pueden ser usadas para toda la vida útil de la estructura y hacen las búsquedas de daño altamente eficientes. La cuarta ventaja es que múltiples conjuntos de datos se pueden calcular simultáneamente, porque se puede asignar diversas tareas a diferentes procesadores.

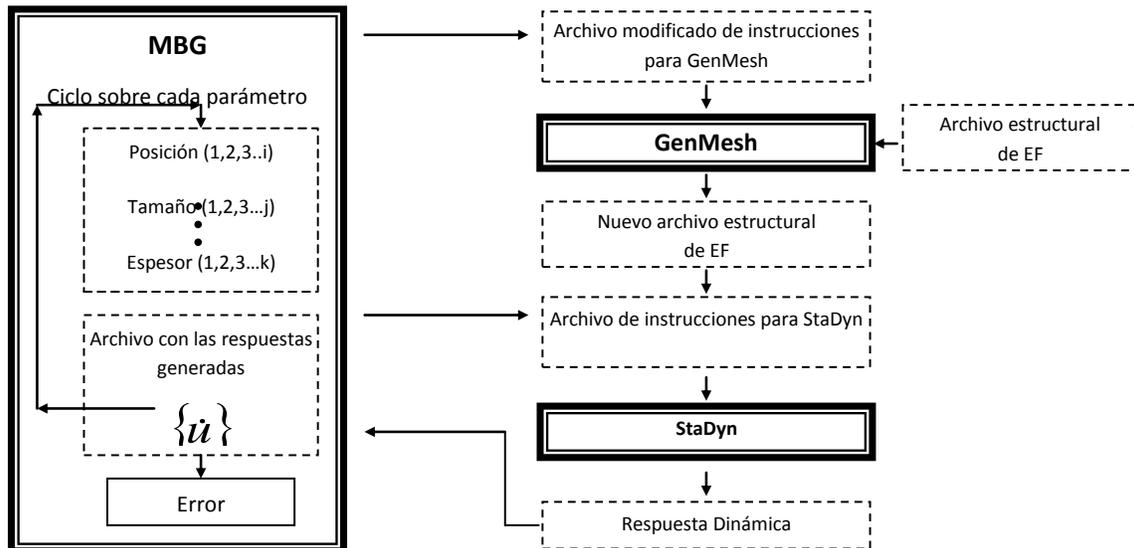


Figura 3.3 Esquemático del programa de búsqueda global

Una vez que las respuestas dinámicas han sido calculadas para cada una de las combinaciones de los parámetros estructurales, el error cuadrático asociado a

cada una de ellas es calculado. Para calcular el error cuadrático se generó un subrutina llamada “Error”, cuyo diagrama de flujo se puede ver esquemáticamente en la figura 3.4 y básicamente se puede ver que el subprograma consiste en dos ciclos iterativos; uno que calcula el error mediante la ecuación 3.1 y el segundo que llama a cada una de las respuestas dinámicas asociadas con un combinación de cambios en los parámetros estructurales. Posteriormente, el subprograma almacena el valor del error así como los parámetros estructurales que produjeron dicho error. El subprograma Error permite al usuario tener alternativas para calcular el error cuadrático, una de ellas es que se puede calcular el error cuadrático de una o dos posiciones de excitación de la fuerza, otra es que permite calcular el error cuadrático usando un sensor o una combinación de sensores.

Para visualizar los datos existen múltiples posibilidades; sin embargo, siempre existe la dificultad de analizar más de tres parámetros en un solo gráfico. Generalmente en una gráfica en dos dimensiones, dos variables son independientes y las otras son fijas. Por simplicidad, en el estudio que se muestra, se manejarán tres parámetros estructurales y el error cuadrático asociado a ellos, sin que necesariamente esté limitado a tres variables ya que puede calcular tantos parámetros estructurales como variables pueda manejar el archivo que contiene la información del modelo de EF. Para visualizar los datos se utilizan gráficos bidimensionales a los que se les agrega un parámetro más, con lo que se pueden visualizar dos parámetros estructurales y el error asociado a ellos en una sola gráfica. El parámetro adicional se observa en el gráfico como múltiples líneas, el número de líneas depende de la discretización realizada sobre el parámetro graficado. Decidida la forma de visualizar los datos el siguiente paso consiste en analizar los gráficos de errores.

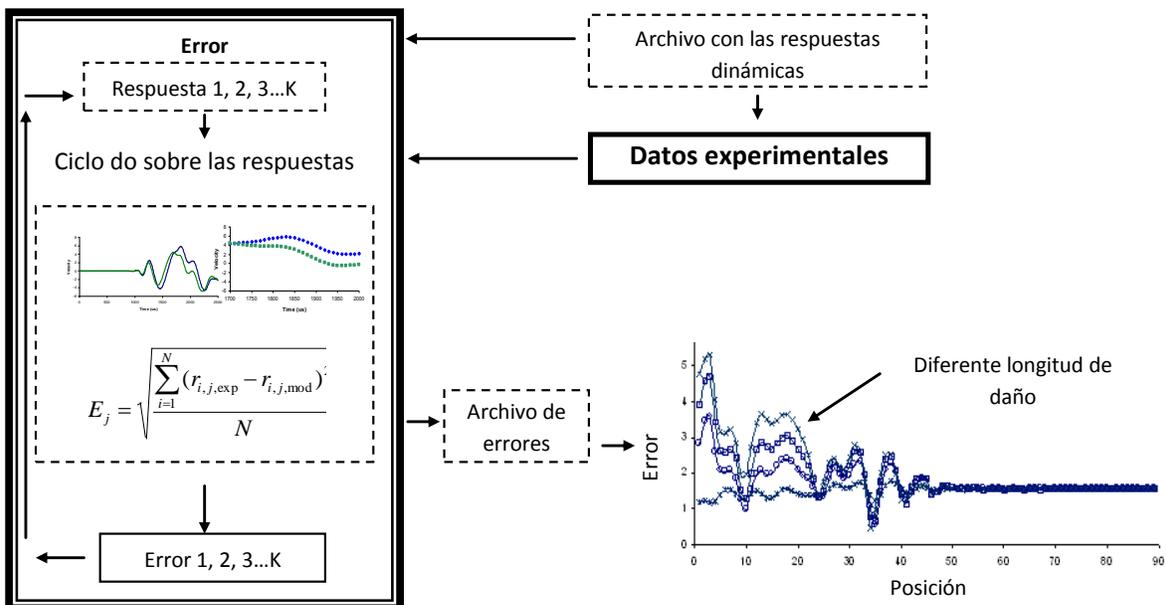


Figura 3.4 Esquemático del subprograma Error

3.2.2 Patrones en los gráficos de errores

El análisis de los patrones generados por las gráficas de errores, tiene como finalidad extraer información de ellos para la identificación de daño. Para este análisis se desarrolló un estudio en el que se utilizaron los datos generados por el modelo de EF de una viga por ser un modelo sencillo y se varió el espesor de la viga de 0,0127 m (0,5 in) a 0,00762 m (0,3 in) en un segmento con una longitud de 0,04445 m (1.75 in), ubicado a una distancia de 0,8636 m (34,0 in) medida a partir de su lado izquierdo. La figura esquemática de la viga con las características mencionadas anteriormente se puede ver en la figura 3.5. Sobre la viga se simuló una instrumentación de seis sensores de los cuales se obtuvo su respuesta dinámica. El uso de información de simulación generada por un modelo de EF, permitió una mejor evaluación del algoritmo. En el capítulo 4 se usará información experimental para corroborar los resultados obtenidos en este capítulo.

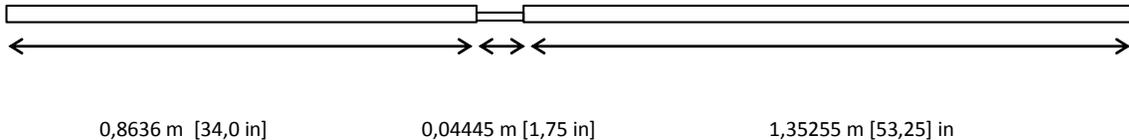


Figura 3.5 Reducción de espesor en el modelo Viga

Para este problema, el programa MBG utilizó la siguiente selección de ventanas y nivel de discretización por variable: para la posición; toda la viga, es decir de 0 a 2,2606 m (89,0 in) con un nivel de discretización de 0,0254 m (1,0 in); para la longitud del daño, de 1 a 13 elementos es decir de 0,00635 m (0,25 in) a 0,08255 m (3,25 in) con un nivel de discretización de 4 elementos, 0,0254 m (1,0 in) , es decir magnitudes de 1, 5, 9 y 13 elementos, y para el espesor, de 0,00381 m (0,15 in) a 0,01143 m (0,45 in) con un nivel de discretización de 0,00254 m (0,10 in). Los gráficos serán representados con el espesor constante, la posición en el eje "X" con diferentes longitudes de daño a lo largo del mismo y el error asociado a los parámetros en el eje "Y".

El primer conjunto de gráficos de errores para analizar es generado usando un sensor y seis posiciones diferentes de impacto. Estos datos son mostrados en la figura 3.6, de la cual se pueden observar patrones definidos de los gráficos. Primero, se puede visualizar la presencia de una línea recta en todos los gráficos. Esta línea será conocida como línea de referencia, y se asociará con aquellas posiciones donde no hay información. En el resto del gráfico hay variaciones en los valores de los errores, y por tanto es posible extraer información. La variación de los valores de los errores depende de la distancia entre el sensor y la posición de impacto y la posición relativa de ambos al lugar donde se encuentra el daño. Por ejemplo, en el gráfico de error generado por el sensor 2 y la posición de impacto 6, P_6S_2 , la distancia es más de 1,524 m (60 in), y la línea de referencia tiene un valor menor a 1, mientras que en otro gráfico donde se utiliza el sensor 2 y la posición de impacto 4, P_4S_2 , la distancia es menos de 1,27 m (50 in) y la línea de referencia tiene un valor mayor a 1. Estas distancias influyen en el valor de la

línea de referencia y entre más cercanas se encuentren al daño mayor es el valor de la línea de referencia.

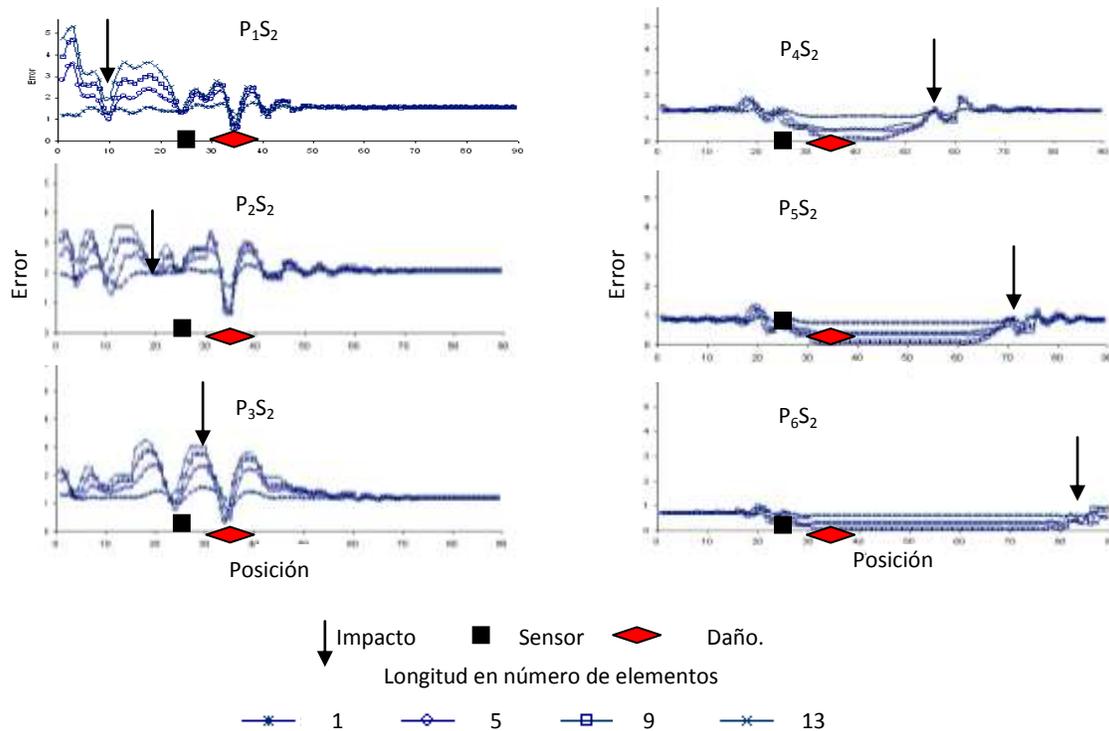


Figura 3.6 Gráficos generados usando un sensor y diferentes lugares de excitación, manteniendo el espesor constante.

De los gráficos también es posible observar que hay puntos por arriba y por debajo de la línea de referencia. Los valores por debajo de la línea de referencia son mínimos, y estas posiciones es donde existe la probabilidad de encontrar daño. Se puede ver que todos los gráficos del primer conjunto de datos presentan más de un mínimo, por lo que no se podría utilizar un método iterativo directo para ubicar el daño. Por otra parte, si sólo una prueba fuera realizada, sería casi imposible encontrar la posición del daño. Algunos gráficos como P_4S_2 , P_5S_2 y P_6S_2 , tiene una extensión muy grande del mínimo por lo que es posible determinar una ubicación incorrecta para la localización del daño.

De los gráficos de la figura 3.6 también se puede observar que hay errores arriba de la línea de referencia. Estos puntos es donde existe alta probabilidad de que no exista daño en esa zona. Otra característica importante de señalar, es que no hay información acerca de dónde se impacta la estructura y dónde es colocado el sensor, como consecuencia en estas posiciones aparecen como mínimos o máximos en los gráficos. No es claro por qué se tiene este fenómeno en los lugares donde se impacta y se coloca el sensor.

El segundo conjunto de datos que es analizado, es aquel donde la posición del sensor será cambiada respecto a la posición del daño y la posición del impacto será variable en cada gráfico. Esta prueba permite cubrir las cuatro posibilidades de encontrar al sensor y el lugar de impacto respecto al lugar donde se encuentra el daño; cuando el sensor y el lugar de excitación se encuentran al lado izquierdo del daño o al lado derecho, cuando el impacto es al lado izquierdo y el sensor al lado derecho del daño y viceversa. El segundo conjunto de datos también se puede visualizar, como los datos cuando el sensor está a la derecha del daño, el cual abarca dos posibilidades de las cuatro. El gráfico es mostrado en la figura 3.7 y corrobora los patrones discutidos en el gráfico de la figura 3.6.

De este nuevo conjunto de datos es posible extraer información adicional a la que se generó del primer conjunto. De los dos conjuntos es claro que si el daño está entre el sensor y la posición de impacto, todos los errores cuadráticos en esa zona estarán por debajo de la línea de referencia. Lo anterior se puede observar en los gráficos P_1S_3 , y P_2S_3 de la figura 3.7 y P_4S_2 , P_5S_2 y P_6S_2 de la figura 3.6. Por otro lado, los errores cuadráticos están por arriba de la línea de referencia cuando el daño está afuera de la región delimitada por el sensor y el lugar de impacto. Este patrón se puede ver en los casos P_4S_3 , P_5S_3 y P_6S_3 de la figura 3.7 y P_1S_2 y P_2S_2 de la figura 3.6.

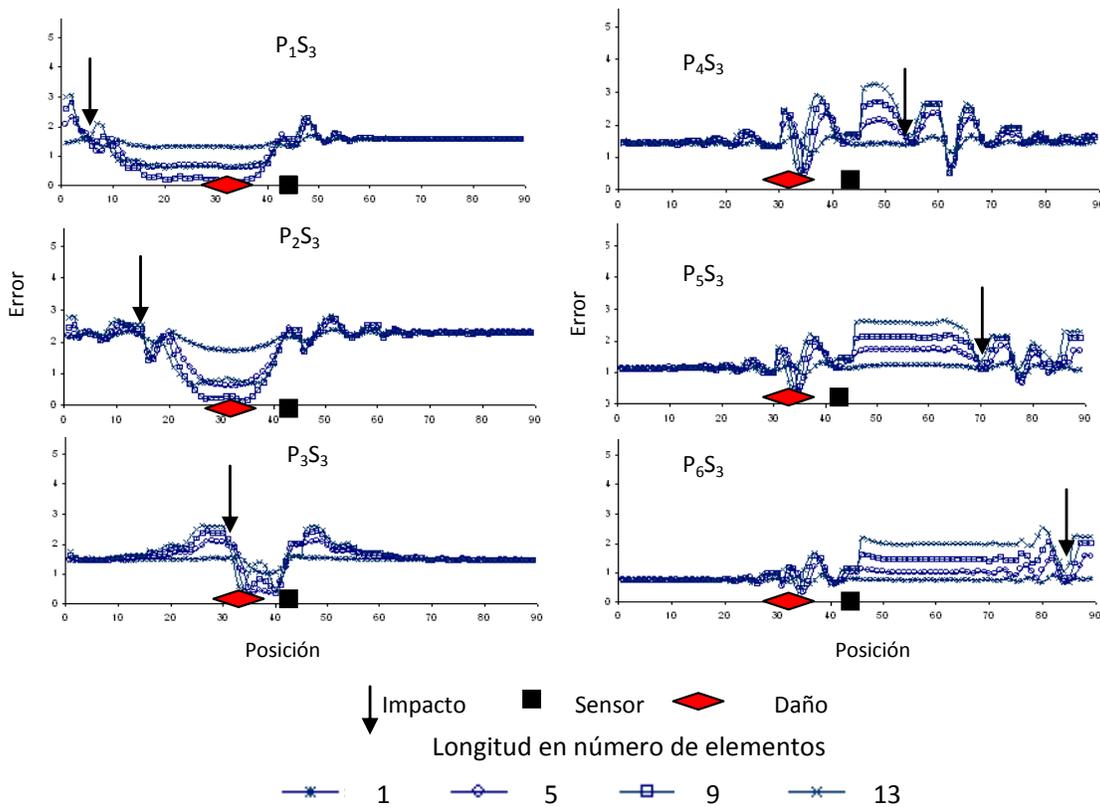


Figura 3.7 Gráficos generados usando un sensor y diferentes lugares de excitación

De los dos conjuntos de gráficos analizados se puede concluir de manera categórica que no es posible localizar el daño utilizando solamente una prueba. Un caso crítico es el ejemplo P_4S_3 , este gráfico muestra dos mínimos que son muy competitivos entre ellos y además tiene regiones donde no es posible inferir si existe daño o no, por lo tanto es muy probable que si sólo se analizará este gráfico se terminaría concluyendo con una respuesta errónea.

Un último análisis fue llevado ejecutado usando sólo un lugar para excitar la viga con múltiples sensores posicionados a lo largo de la misma. Los datos son mostrados en la figura 3.8. Los gráficos de la figura confirman los patrones descritos en los párrafos anteriores y permite obtener nueva información. La información nueva es originada por la línea de referencia. Debido a que el impacto es el mismo para cada uno de los gráficos, un sensor por gráfica, la línea de referencia puede compararse para los diferentes gráficos, esto permite concluir lo siguiente: Cuando el lugar de excitación y el sensor son cercanos a la zona donde se encuentra el daño, la línea de referencia tiende a tener valores más altos que cuando ellos están lejos del lugar del daño. Por ejemplo, usando los gráficos P_2S_2 y P_2S_3 la línea de referencia tiene un valor cercano a 2,0, debido a que están cerca de la posición de daño, pero en cambio cuando se observa el gráfico P_2S_6 la línea de referencia tiene un valor aproximado de 0,5 porque el sensor está lejos de la posición del daño.

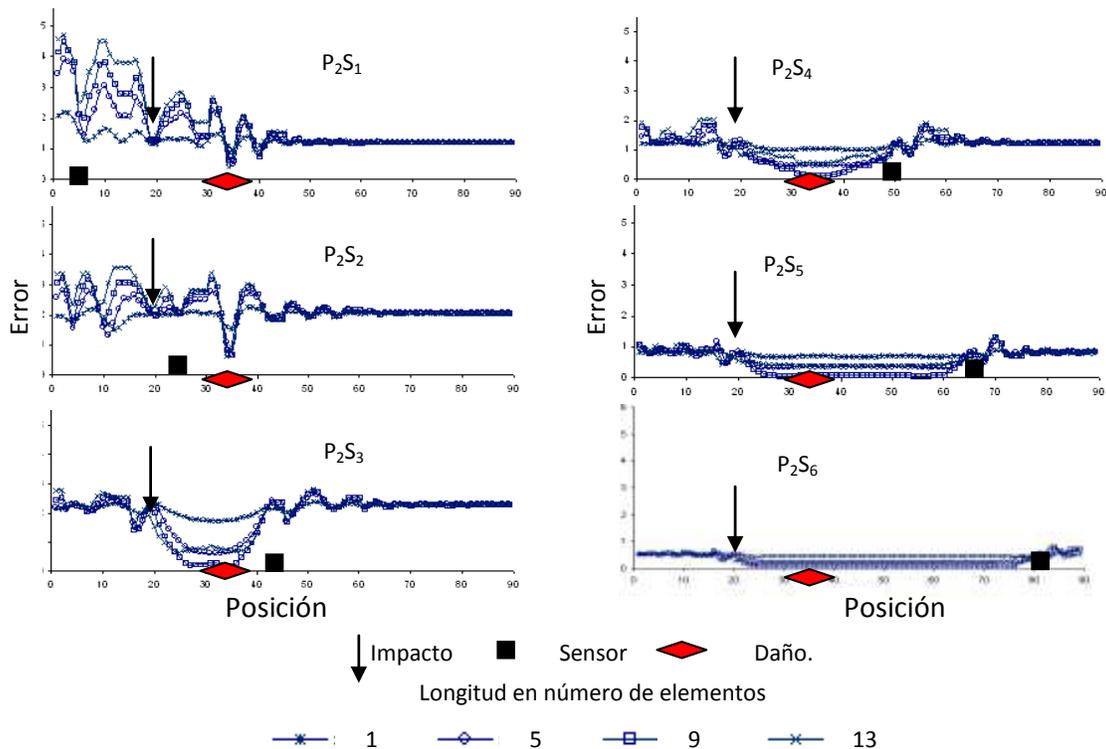


Figura 3.8 Gráficos generados usando una posición de excitación y diferentes sensores simultáneos.

Sintetizando toda la información obtenida de los diferentes gráficos se puede ver los siguientes patrones:

I. Línea de referencia

- Se genera una línea recta a lo largo de la cual no es posible inferir información.
- Entre más cercano se encuentre el impacto y el sensor de la zona de daño más grande es el valor de la línea de referencia.

II. Datos por arriba de la línea de referencia.

- Cuando el daño está fuera de la región delimitada por el sensor y el lugar de excitación el valor de los errores será mayor que el de la línea de referencia para esta región delimitada.
- Los datos, errores cuadráticos, estarán también por arriba de la línea de referencia cuando no hay daño en esa área.

III. Datos por debajo de la línea de referencia.

- Cuando el daño está dentro de la región delimitada por el sensor y el lugar de excitación, el valor de los errores será menor que el de la línea de referencia para esta región delimitada.
- Los datos, errores cuadráticos, estarán también por debajo de la línea de referencia cuando hay la probabilidad de daño en esa área.

Del análisis de los datos también es posible concluir que puede existir intercambio entre los sensores y el número de impactos; esto es, pocos sensores con muchos impactos o muchos sensores con pocos impactos.

3.2.3 Secciones y evaluación por promedios

La evaluación de los errores cuadráticos es una de las tareas principales para valorar la estructura, por lo cual es necesario establecer un método que permita su evaluación. El método consiste en dividir el modelo de EF en varias secciones virtuales, las cuales serán evaluadas una a una dependiendo de la ubicación de los errores cuadráticos respecto a la línea de referencia. Lo anterior permitirá la eliminación de mínimos falsos y hará más robusta la sección donde se encuentre el daño. La longitud de la sección es escogida por el usuario, y se recomienda tener secciones de tamaño razonable, alrededor de 0,254 m (10,0 in) a 0,381 m (15,0 in). Cuando el tamaño de la sección es demasiado pequeño, será necesario realizar una mayor cantidad de pruebas para remover la ambigüedad y si es demasiada larga, el promedio se perderá y tenderá al valor de la línea de referencia.

Para clarificar la idea de la evaluación dividiendo la estructura en secciones, se realizará un ejemplo en la viga, la cual es dividida en seis secciones cinco de 0,381 m (15,0 in) y la última de 0,3556 m (14,0 in). Cada región se identificó con una letra y se simuló daño en la viga, el cual corresponde a una disminución de espesor del 40%, en la región C. En la figura 3.9 se puede ver el esquema de la viga dividida en secciones y el daño en la región C.

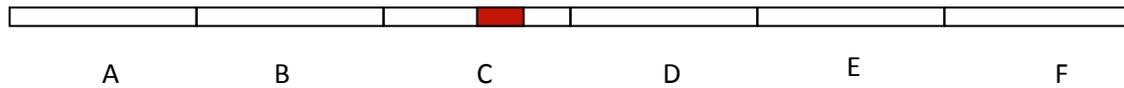


Figura 3.9 Viga dividida en secciones, con daño en la sección C

La figura 3.10 muestra los gráficos con los errores cuadráticos para dos pruebas diferentes, cada gráfico tiene diferentes patrones los cuales serán evaluados y representan todos los casos posibles. Una calificación será asignada a cada sección para evaluar la estructura en todas sus secciones. Para los datos que se encuentran por arriba de la línea de referencia se pueden tener dos calificaciones, la mayor, calificación de 2, para cuando los datos tengan un valor alto respecto al valor de la línea de referencia, y la siguiente, calificación de 1, cuando los datos están por arriba de la línea de referencia pero estén cercanos a ella. Los puntos sobre la línea de referencia tienen sólo una calificación, cero. Para los datos debajo de la línea de referencia también se tienen dos calificaciones, cuando todos los datos están por debajo de la línea de referencia a esta sección se le asignará la calificación más baja, calificación de menos 2, y si, solamente parte de ellos está por debajo de la línea de referencia, se asignará la calificación siguiente mayor, calificación de menos 1.

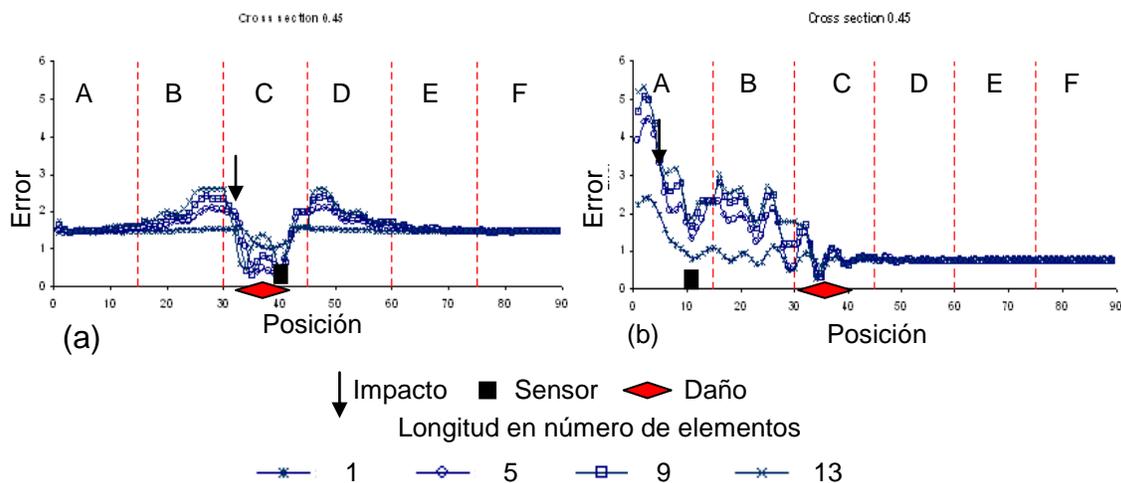


Figura 3.10 Gráficos de errores con diferentes patrones de errores cuadráticos

De esta manera las secciones pueden tener 5 calificaciones, a las cuales se les asignarán valores de 2 a -2. Las calificaciones y los tipos de secciones se pueden resumir como:

- II Regiones sin daño, con alta probabilidad.
- I Regiones ambiguas, probablemente sin daño.
- 0 Regiones sin información.
- I Regiones que son ambiguas, probablemente con daño.
- II Regiones con daño, alta probabilidad.

En todas las regiones, además de asignarse una calificación también se identificarán con un color distintivo de acuerdo a su calificación. Azul fuerte para regiones que no tienen daño, Azul claro para regiones donde es probable que no exista daño, blanco para regiones en las cuales no hay información, rosa para regiones con probabilidad de daño y rojo para regiones con alta probabilidad de daño. En la figura 3.11 se pueden ver todas las posibles calificaciones con su respectivo color distintivo.

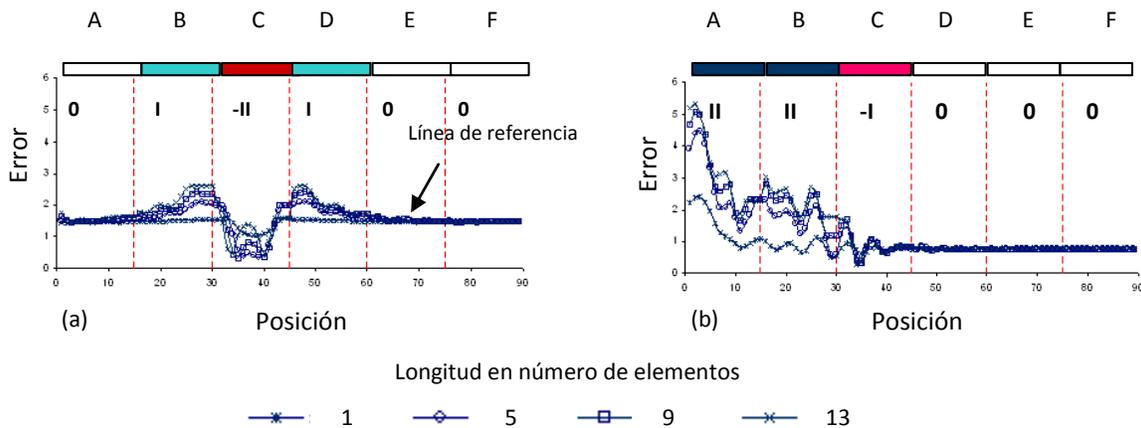


Figura 3.11 Calificaciones y colores asignados a las secciones

En los dos gráficos mostrados en la figura 3.11, pueden ser vistos ejemplos de las cinco posibles calificaciones a una sección. En la gráfica b de la figura 3.11 puede verse para las secciones A y B calificaciones de II, los valores que reportan estos errores son altos respecto al valor de la línea de referencia. En la gráfica (a) de la misma figura, las secciones B y D tienen calificaciones de I debido a que la mayoría de sus valores están cercanos a la línea de referencia, pero por arriba de ella. Regiones con calificación de 0 son obvias en ambos gráficos. La calificación de -I se puede decir que es la más difícil de asignar. La existencia de valores debajo de la línea de referencia es indicativa de daño y, por lo tanto es marcada como -I. La sección B en la gráfica (b), no fue marcada con valor de -I, porque la

mayoría de sus valores están por arriba de la línea de referencia, generalmente el juicio se basará en que al menos dos líneas deben mostrar valores por debajo de la línea de referencia. La calificación de $-II$, es relativamente fácil de asignar ya que todos los valores se encuentran por debajo de la línea de referencia, un ejemplo se puede ver en la sección C de la gráfica (a).

Una vez que una calificación es asignada a cada sección, es necesario promediar todos los gráficos de errores de un conjunto de pruebas. El número de gráficos de errores dependerá del número de sensores e impactos usados independientemente. Promediar las secciones ayuda a remover mínimos falsos y a tener mayor grado de confiabilidad en las secciones que presentan daño como en las que no lo presentan.

Procedimiento automático

Asignar una calificación a cada sección puede ser causante de consumo de tiempo, por lo que la implementación de un método automático es de utilidad. El procedimiento automático es un programa que permite calificar cada sección y evaluar la estructura; el funcionamiento radica en el cálculo de la línea de referencia a partir de remover un porcentaje de los valores, errores cuadráticos, altos y bajos, este porcentaje va hasta un 15% para los valores altos y hasta un 5% para los valores bajos, después los datos restantes se agrupan en 20 clases de las cuales las tres clases consecutivas, con mayor cantidad de datos acumulados, son seleccionadas como el rango de la línea de referencia. Una vez que la línea de referencia es calculada, el programa lee los errores de cada sección y asigna la calificación automáticamente de acuerdo con el siguiente criterio:

- Si el 75% de los datos, errores, en una sección es dos veces mayor que el valor de la línea de referencia, el programa asigna la calificación de II.
- Si el 75% de los datos, errores, en una sección están arriba de la línea de referencia pero no es dos veces mayor que este valor, el programa asigna una calificación de I.
- Si el 50% o más de los datos, errores, están en el rango de la línea de referencia el código asigna una calificación de 0.
- Si el 25% de los datos, errores, en una sección están debajo de la línea de referencia el programa asigna una calificación de $-I$.
- Si el 75% de los datos en una sección están por debajo de la línea de referencia el programa asigna una valoración de $-II$.
- Cualquier otro caso el programa asigna una calificación de cero.

Para mostrar el funcionamiento del procedimiento automático, se realizó una prueba en la viga usando sólo datos simulados. La prueba consistió en dividir la

viga en seis secciones de las cuales cada una tiene un sensor, se simuló daño mediante la pérdida de sección transversal en la región C y se excitó en la sección B. Un esquemático de la prueba puede verse en la figura 3.12, cabe mencionar que para este ejemplo fueron generados seis gráficos de errores, uno por cada respuesta dinámica de cada sensor. Las calificaciones calculadas por el procedimiento automático para cada sección se pueden ver en la figura 3.13.

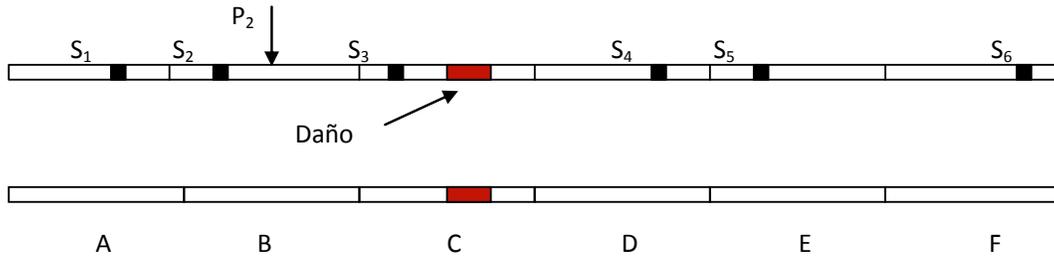


Figura 3.12 Arreglo de la prueba en la viga para probar el procedimiento automático

En los gráficos de la figura 3.13 se puede ver que el método automático trabaja adecuadamente; sin embargo es importante mencionar que una evaluación de manera visual de los gráficos quizá pueda producir resultados diferentes dependiendo del criterio del evaluador. Una forma de asegurar y robustecer los resultados, no importando si son por el método automático o visual, es promediando todas las calificaciones de los gráficos de las pruebas. En la figura 3.14 se presentan los resultados promediados de la prueba para el método automático, en esta figura -como se esperaba- la región que presenta la mayor probabilidad de daño es la región C, aunque las regiones D, E, F tienen indicaciones de que puede existir daño en ellas, esto es falso, la razón de la indicación de probabilidad de daño es porque a partir del sensor 4, el daño queda delimitado entre la región del sensor y el lugar de excitación, produciendo que los valores de los errores cuadráticos tengan un valor menor que el de la línea de referencia. Si se realizará una prueba adicional donde el daño quedara fuera de la región delimitada del lugar de impacto y los sensores 4, 5 y 6, las regiones D, E y F tendrían el indicativo que no hay daño en esos lugares.

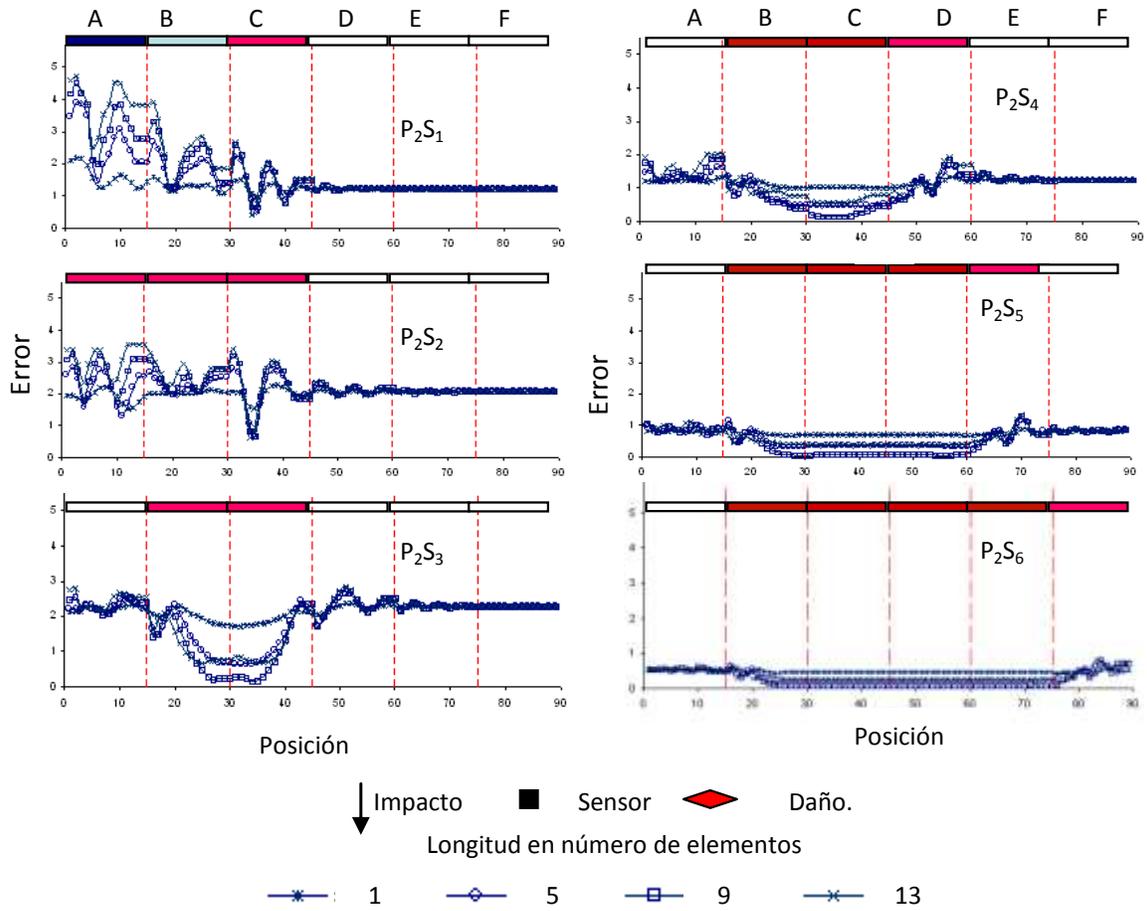


Figura 3.13 Calificaciones asignadas a cada sección por el método automático

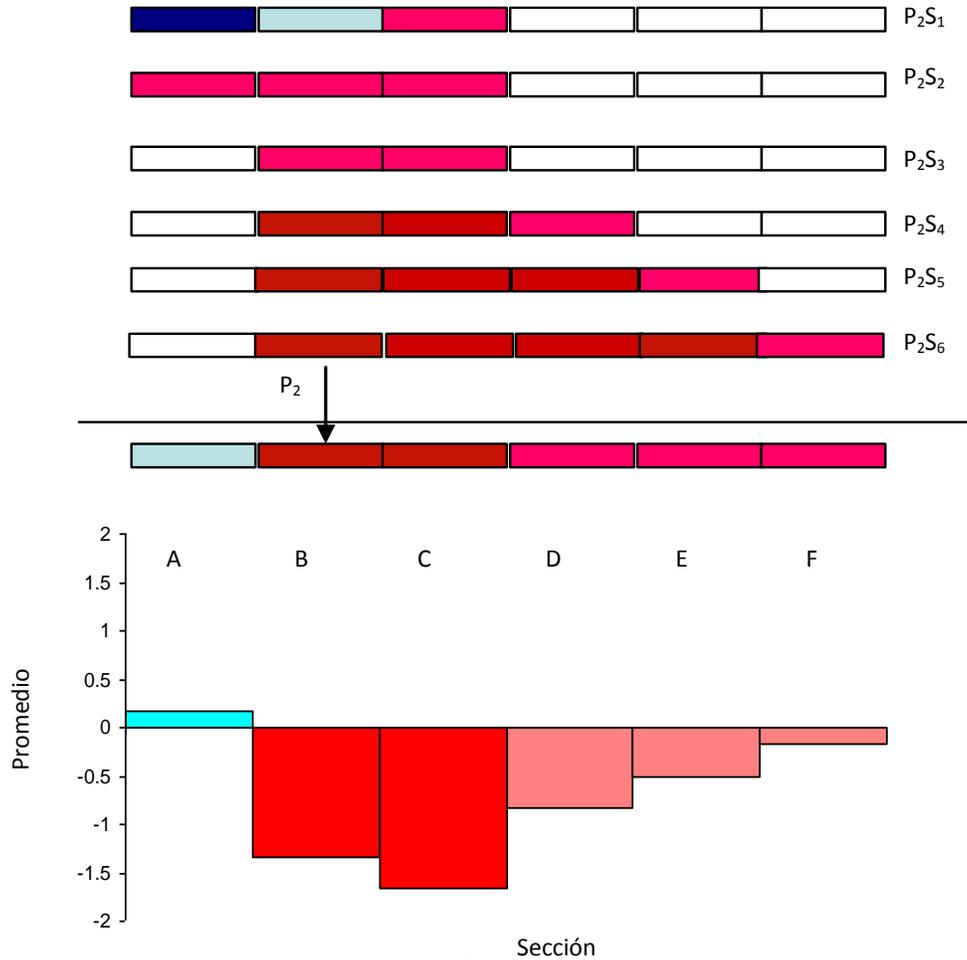


Figura 3.14 Calificación promedio de cada sección por el método automático

La figura 3.15 muestra el promedio de las calificaciones cuando la evaluación se realiza de forma visual, de igual manera que el método automático el promedio final arroja como conclusión que la región que tiene mayor probabilidad de tener el daño es la región C. La inspección visual tiene la ventaja de que se puede utilizar todo el conocimiento que se tiene acerca del comportamiento de los patrones para evaluar las secciones, haciendo posible que en un solo conjunto de pruebas se determine de manera contundente la sección con daño. Por ejemplo, se puede inferir que en las regiones B y C puede estar el daño, partiendo del hecho de que las secciones que tienen valores altos de la línea de referencia son las más cercanas al daño; esto, complementado con el promedio de las calificaciones de las secciones, arrojaría que la sección C es la sección con mayor probabilidad de daño.

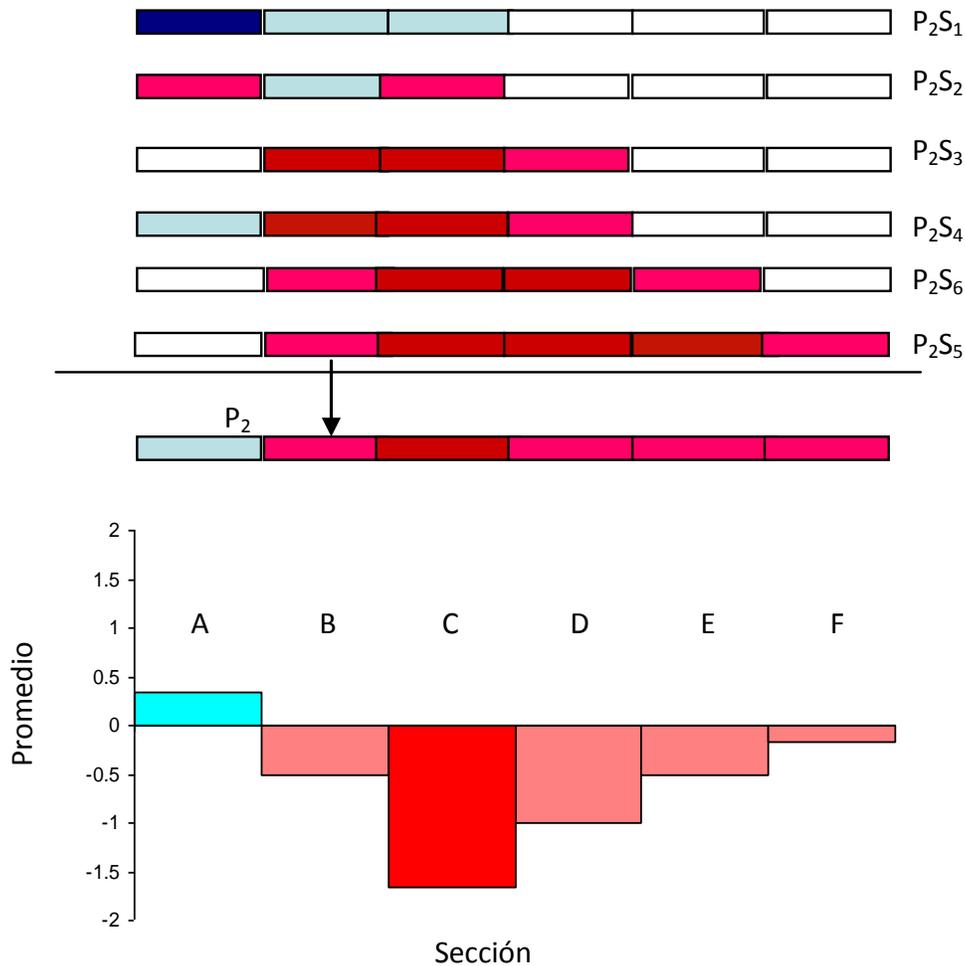


Figura 3.15 Calificación promedio de cada sección por el método visual

3.2.4 Tipos de pruebas

De acuerdo con el número de sensores y el número de experimentos ejecutados se consiguen identificar tres tipos de pruebas que se pueden realizar en una estructura, la primera de las tres pruebas es cuando un solo experimento es realizado, para la cual un solo impacto es usado para excitar la estructura, y múltiples sensores son colocados en toda la estructura. El segundo de ellos se obtiene cuando sólo se dispone de un sensor y se efectúan múltiples impactos en diferentes lugares de la estructura conservando la posición del sensor fija, es decir, se realizan varios experimentos independientes, los cuales dependen del número de secciones en la estructura. El tercer tipo es cuando un sensor, un impacto y un experimento se realizan por sección, el sensor no es fijo, se mueve al lugar de la sección que se evalúa y se ejecutan múltiples experimentos como secciones hay en la estructura.

Los tipos de prueba se pueden visualizar en una matriz, donde las columnas representan los sensores y los renglones representan los impactos de excitación,

el subíndice i representa la sección donde la estructura fue excitada y el subíndice j la sección donde el sensor es colocado en la estructura. Toda la información dinámica de la estructura se puede extraer en N experimentos donde N es igual al número de secciones en que la estructura fue dividida. Los tipos de prueba se visualizan en la matriz de la siguiente manera; los renglones representan las pruebas que son del tipo 1, las columnas representan las pruebas que son del tipo 2 y la diagonal corresponde a una prueba del tipo 3. La figura 3.16 muestra la matriz que se genera cuando se usa la viga dividida del ejemplo de la sección anterior, la cual fue dividida en 6 secciones, en esta figura también se muestra esquemáticamente los tres posibles tipos de prueba.

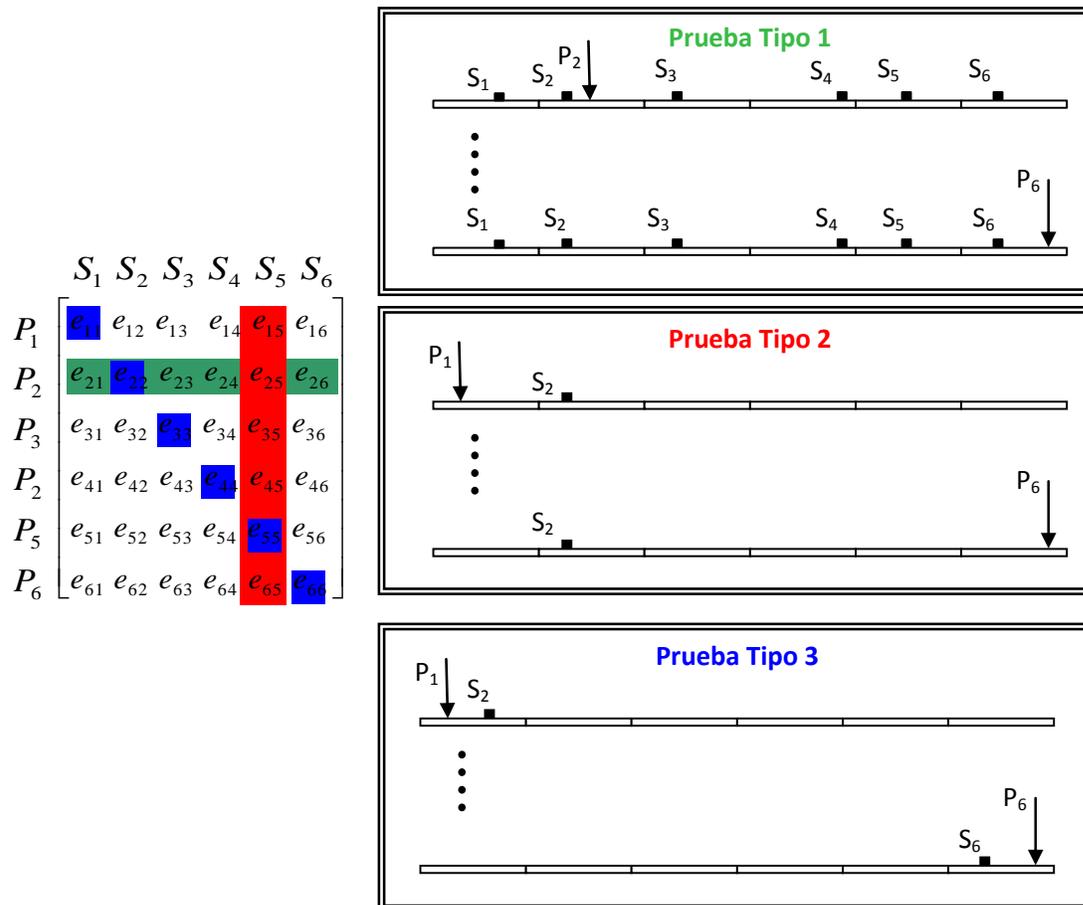


Figura 3.16 Esquemático de los tipos de prueba que se pueden realizar en una estructura

En la sección previa se analizó un ejemplo en el cual se realizó una prueba tipo 1, un solo impacto y múltiples sensores en la estructura, por lo que ahora se analizarán los dos tipos de prueba restantes considerando exactamente las mismas condiciones que en el ejemplo anterior, mismo número de secciones, parámetros de búsqueda y daño.

Prueba tipo 2

Para realizar esta prueba el sensor 3 fue elegido como el sensor fijo, cabe recordar que en esta prueba sólo se usa un sensor y se realizan múltiples experimentos de acuerdo al número de secciones. Para la viga, por ejemplo, se ejecutaron seis experimentos, un impacto de excitación por cada sección. Cada experimento generó una gráfica de errores para tener un total de seis gráficos para evaluar y detectar el lugar del daño, dicha evaluación se realizará usando los dos procesos descritos anteriormente, el visual y el automático.

En las figuras 3.17 y 3.18 se puede ver la evaluación de los gráficos de errores utilizando el proceso automático, los resultados muestran que existe la misma probabilidad de que el daño se encuentre en la región B y C, esto como resultado de que los gráficos P_4S_3 y P_5S_3 tienen una calificación de uno, cuando es claro que algunos datos están por debajo de la línea de referencia por lo que deberían tener calificación de menos 1, pero al no tener el porcentaje de datos requeridos por debajo de la línea de referencia el código los marca con calificación 1. Una solución es la modificación de los parámetros para asignar calificaciones en el código, sin embargo lo mejor es realizar una serie de experimentos hasta calibrar de manera más apropiada el procedimiento automático. Otra solución rápida es realizar una evaluación visual de los gráficos de errores.

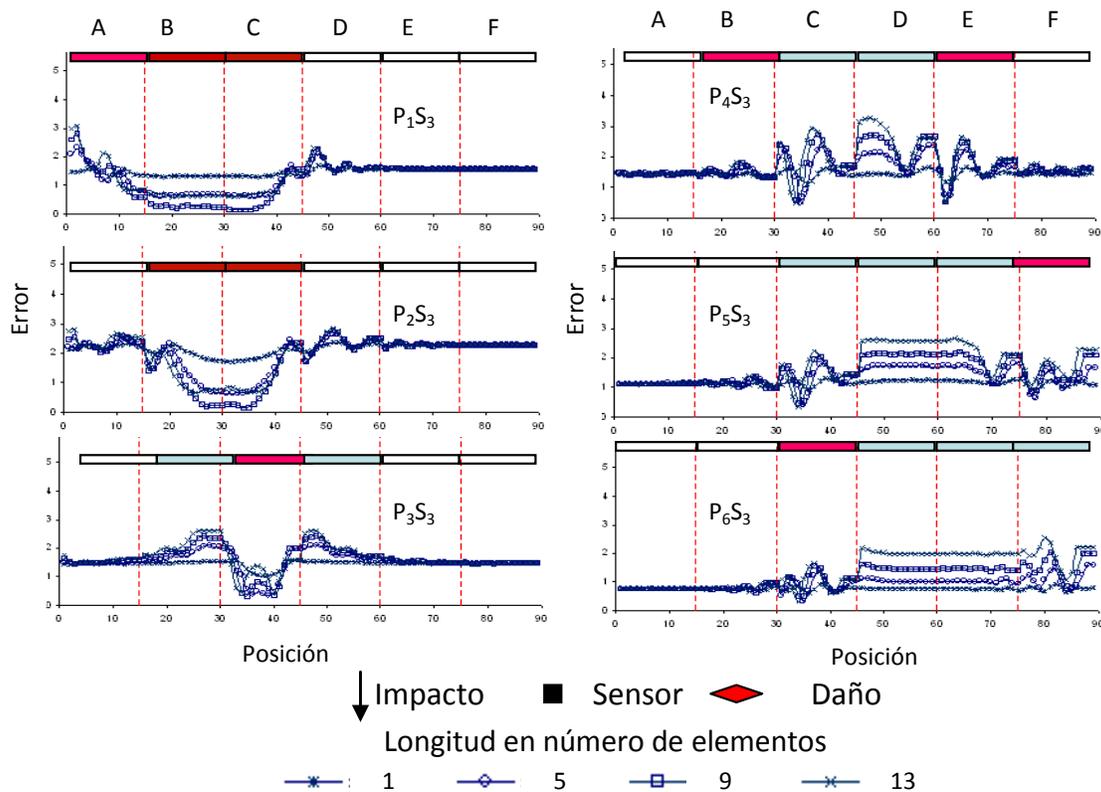


Figura 3.17 Gráficos de errores para la viga utilizando prueba tipo II

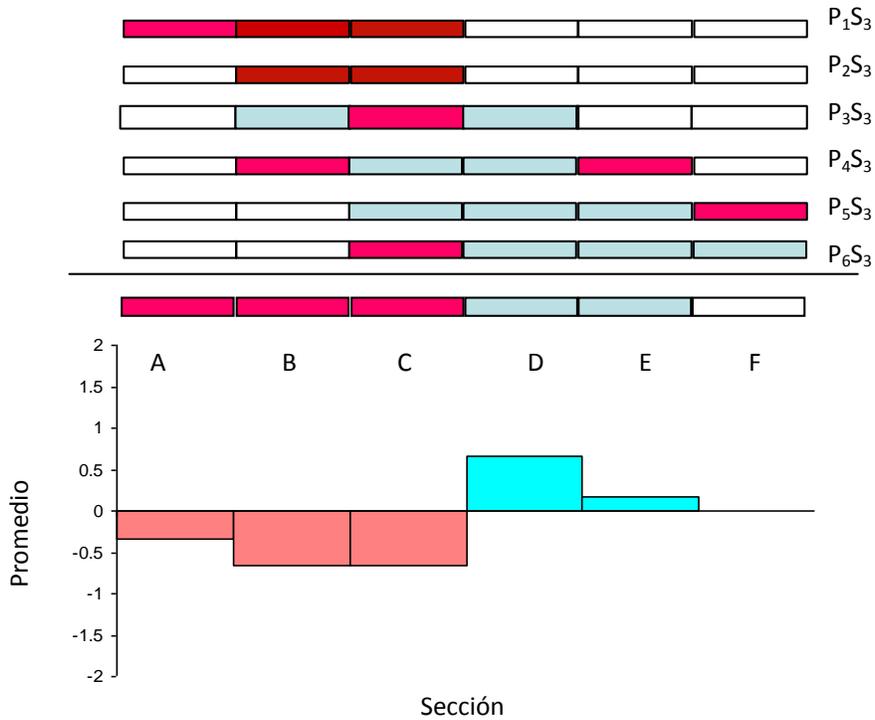


Figura 3.18 Evaluación de la secciones de la viga por el procedimiento automático

En la figura 3.19 se puede ver la evaluación de los gráficos de errores usando el método visual. El criterio empleado para calificar las secciones es el mismo que el empleado para el método automático, sin embargo es posible tomar en cuenta para la evaluación otros de los patrones que no fueron programados en el procedimiento automático; por ejemplo, cuando el daño se encuentra entre el sensor y el lugar de impacto se sabe que todos los datos estarán por debajo de la línea de referencia, en este caso este criterio puede ser empleado para descartar el segmento de la posición del impacto 1 al impacto 2 porque son dos segmentos consecutivos con los datos de errores debajo de la línea de referencia, por lo que el daño puede estar del impacto 2 al sensor 3 o, aún más preciso, del impacto 3 al sensor 3. Una vez realizada la evaluación el gráfico de barras se revela que la región con mayor probabilidad de daño es la región C, aunque en este caso no fue necesario calificar las secciones utilizando otros criterios correspondientes al comportamiento de los patrones, una conclusión más robusta se podría obtener si se tomará en consideración dichos patrones.

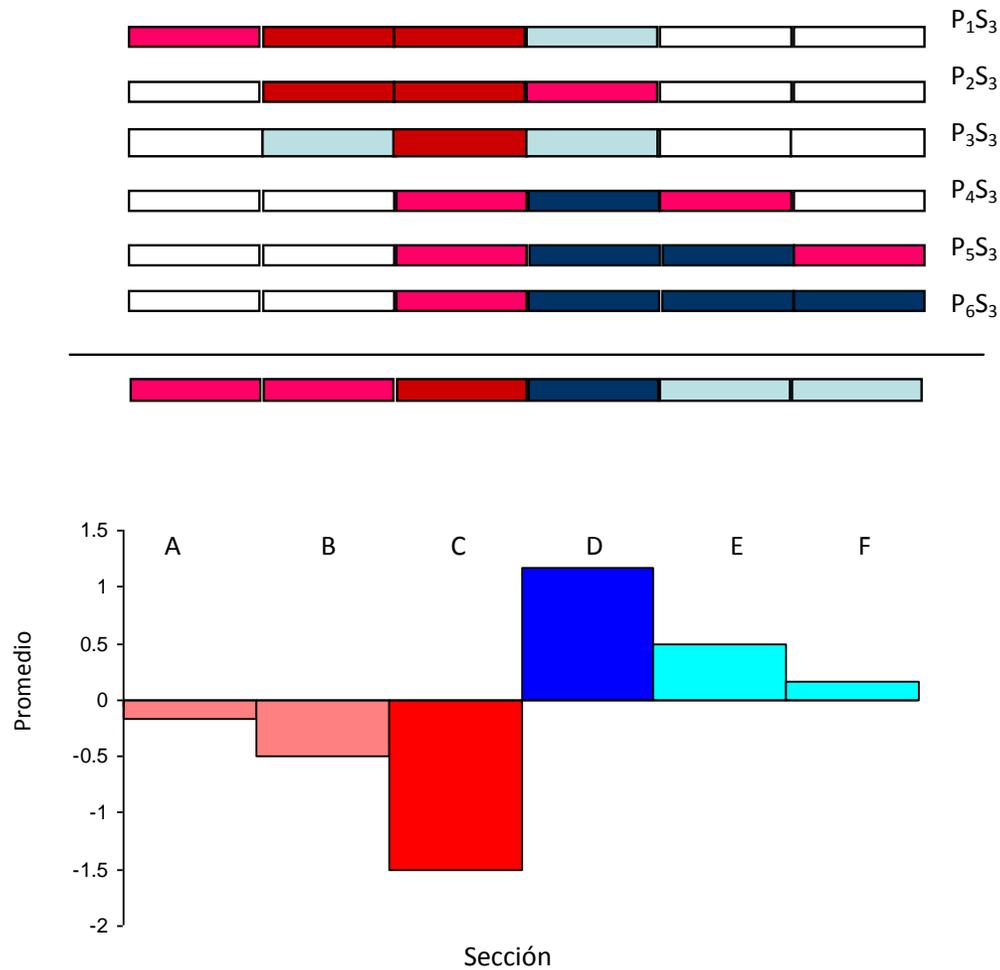


Figura 3.19 Evaluación de las secciones de la viga por el procedimiento visual

Prueba tipo 3

El último tipo de prueba que se puede utilizar para examinar la estructura es el tipo 3, el cual consiste en colocar un sensor, ya sea móvil o que esté fijo, en cada sección cuando se realice la excitación golpeando esa sección, por lo cual se generará el mismo número de errores de gráficos como secciones tenga la estructura. Una característica especial de este tipo de prueba es que es más fácil determinar las secciones que se encuentran libres de daño debido a la corta distancia a la que se encuentra el sensor del lugar de impacto de excitación. En la figura 3.20 se colocaron los gráficos de errores generados de este tipo de prueba considerando las mismas condiciones en la viga que para los dos tipos de prueba anteriores.

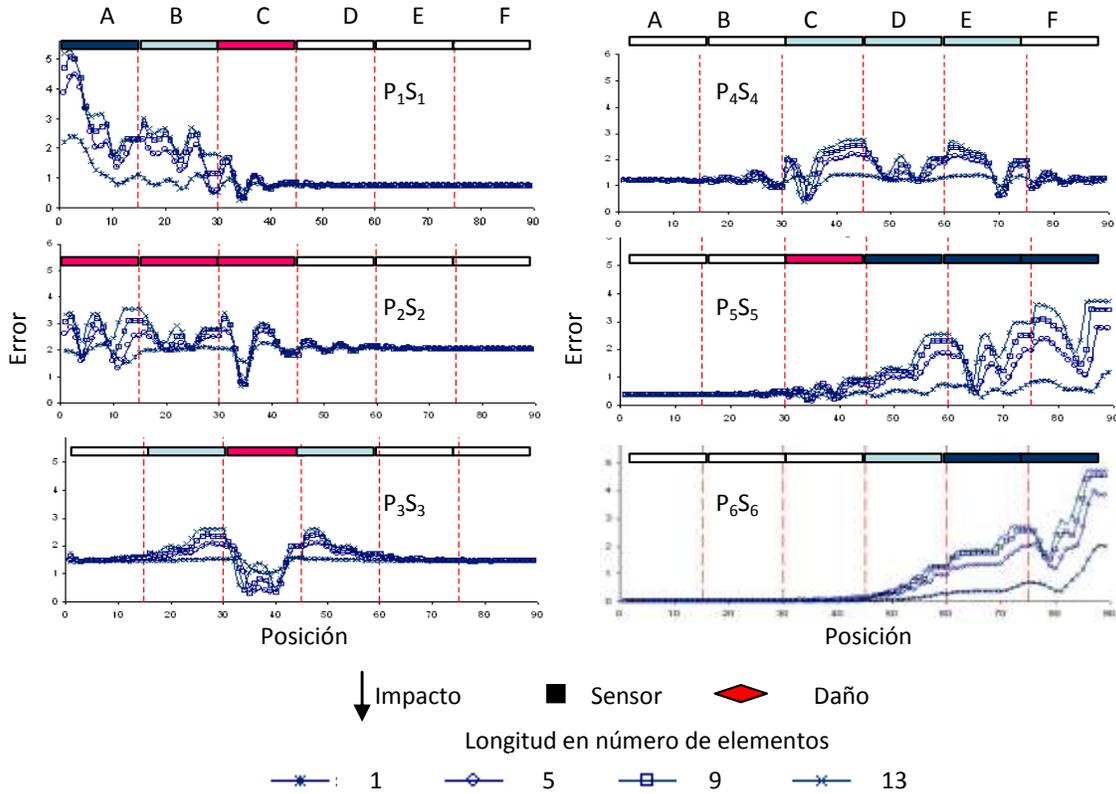


Figura 3.20 Gráficos de errores para la viga utilizando prueba tipo III

De la figura 3.20 es claro las secciones donde no hay daño en ellas, en el caso de las secciones B y D, aunque el valor de los errores no es alto debido a que se encuentran muy cercanas a la zona del daño, gráficos P_2S_2 y P_4S_4 , es sencillo determinar que no hay daño en ellas. La evaluación de todas las secciones por el método automático se puede ver en la Figura 3.21, donde es fácil determinar que todas las regiones se encuentran libres de daño a excepción de la región C que tiene la mayor probabilidad de daño. La Figura 3.22 muestra la gráfica de barras de la evaluación visual de la prueba tipo III, como era de esperarse la región con mayor probabilidad de daño es la sección C, mientras que las secciones restantes están libres de daño.

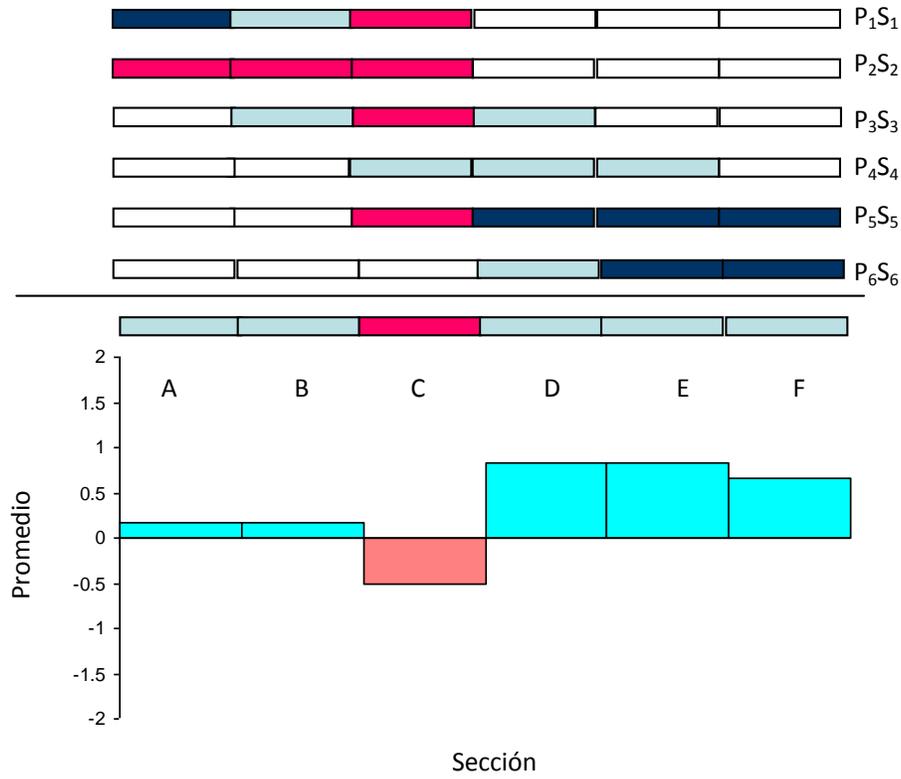


Figura 3.21 Evaluación de las secciones, prueba tipo III, por el método automático

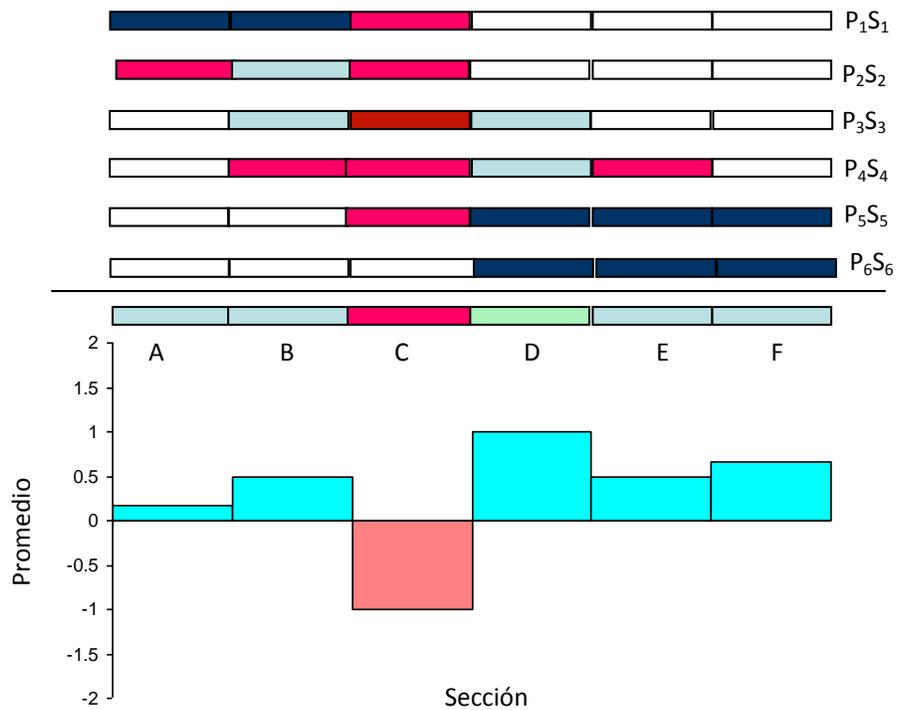


Figura 3.22 Evaluación de las secciones, prueba tipo III, por el método visual

3.2.5 Análisis de los tipos de prueba

Los tres tipos de prueba para generar los gráficos de errores y los dos métodos de evaluación de las secciones demostraron ser capaces de cumplir con su objetivo principal, que es el de ubicar el daño en la estructura. Dependiendo de las características del experimento y del equipo de experimentación disponible es posible escoger un tipo de prueba a partir de las ventajas y desventajas que tiene cada una de éstas, a continuación se presenta un breve resumen de las características de cada prueba.

Prueba Tipo 1

Ventajas:

- La evaluación de todas las secciones, toda la estructura, se puede efectuar en un solo experimento.
- Es fácil observar en los gráficos de errores cuál es la posición del sensor y del lugar de excitación y decidir si el daño se encuentra dentro o fuera del espacio delimitado por la posición del sensor y el lugar de impacto.
- La línea de referencia puede ser utilizada para extraer información de la ubicación del daño.

Desventajas:

- Se necesita de una gran cantidad de sensores, uno por sección, para realizar la prueba.

Prueba tipo 2

Ventajas:

- Sólo se necesita de un solo sensor y un transductor de fuerza para llevar a cabo la prueba.

Desventajas:

- Es necesario realizar varios experimentos para extraer la información de cada sección.
- La línea de referencia no puede utilizarse para extraer información adicional de la ubicación del daño.

Prueba tipo 3

Ventajas:

- Es fácil descartar o aceptar que hay daño en una sección.
- Sólo se necesita de un solo sensor y un transductor de fuerza para llevar a cabo la prueba.

Desventajas:

- Es necesario realizar varios experimentos para extraer la información de cada sección.
- La línea de referencia no puede utilizarse para extraer información adicional de la ubicación del daño.

3.3 Aplicación de la metodología

3.3.1 Aplicación bidimensional

La metodología para la detección del daño ha demostrado ser capaz de localizar el cambio en los parámetros estructurales en una dimensión, modelo viga, en este capítulo se demostrará que también puede ser aplicada en un caso bidimensional y que no es restrictiva de las dimensiones que maneja el modelo. Para realizar el estudio en dos dimensiones se empleó el Modelo H de EF, con el cual se generó una respuesta dinámica asociada a un daño mediante el cambio en algunos de los parámetros estructurales iniciales, los cambios consistieron en cambiar el espesor en un 40% respecto a su valor inicial en un segmento de 0,0381 m, (1,5 in) en la región C, como se puede observar en la figura 3.23. Cabe mencionar que el Modelo H fue dividido en 10 secciones como se ve en la figura 3.23.

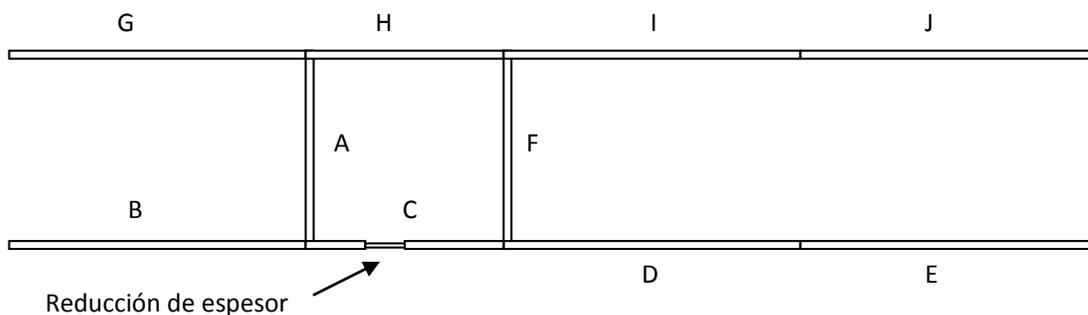


Figura 3.23 Modelo H con daño en la región C representado como una reducción en el espesor

Con los parámetros mencionados anteriormente se generaron las respuestas dinámicas usando el modelo H de EF, las respuestas fueron creadas por un

periodo de tiempo de 2500 μ s con una frecuencia de muestreo de 100 Khz. Para poder realizar y probar la efectividad de los tres tipos de pruebas, se colocó un sensor por cada región -como se puede observar en la figura 3.24-, el nivel de discretización empleado para localizar el daño consistió en buscar en todo el modelo H, cada cuatro elementos, cada pulgada; respecto al tamaño del daño se consideró una extensión no mayor a 13 elementos, 3,25 pulgadas, en intervalos de búsqueda de una pulgada, en tanto a la reducción del espesor se realizó en decrementos del 20% del valor inicial.

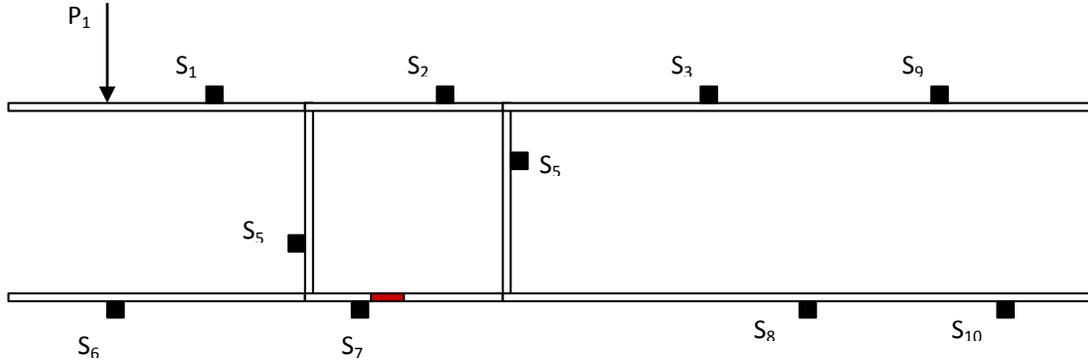


Figura 3.24 Arreglo del modelo H para probar los tres tipos de prueba

Prueba tipo 1

El primer tipo de prueba que se ejecutó es el tipo 1. Para realizar esta prueba es necesario sólo un impacto de excitación en la estructura y recolectar la respuesta dinámica de cada uno de los sensores posicionados en cada una de las regiones. Para agregar dificultad al método de búsqueda global, la estructura fue excitada en la región J, la cual es la más alejada del lugar del daño, 0,8636 m (34,0 in) de la región C.

Una vez adquiridas las respuestas dinámicas producidas por el cambio en los parámetros (sección transversal, tamaño), se realizó la búsqueda de la respuesta dinámica que minimizará la función de error debido a estos cambios en los parámetros, el nivel de discretización usado para la búsqueda es el que se mencionó en párrafos anteriores. Las funciones de error generadas para cada uno de los sensores se pueden ver en la figura 3.25. Lo primero que se puede ver es que estas funciones de error tienen patrones similares a los que se generaron con el modelo de EF de la viga, por lo que es posible identificar datos por arriba, por debajo y en la línea de referencia, los cuales son cruciales para la evaluación de las secciones de la estructura.

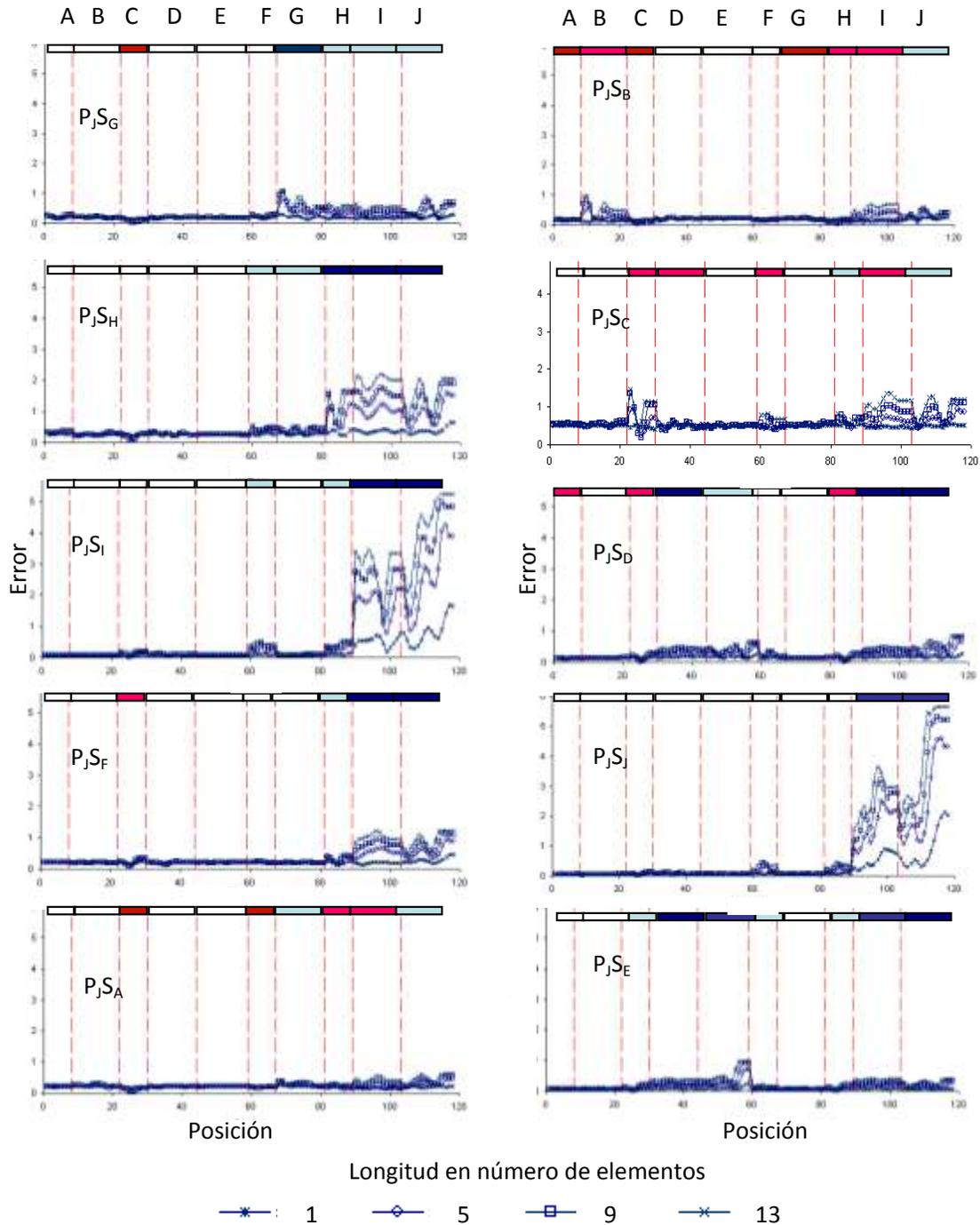


Figura 3.25 Gráficos de error para cada sensor de la prueba tipo 1

Los gráficos de errores generados por la prueba tipo 1 muestran una mayor sensibilidad en las regiones cercanas a la excitación de la estructura, es el caso de los gráficos P_{JS_I} y P_{JS_H} , mientras que en las secciones alejadas los errores, por encima y por debajo de la línea de referencia son muy cercanos a ésta, tal es el caso de los gráficos de la función de error P_{JS_A} , P_{JS_B} , P_{JS_D} , P_{JS_G} .

Para la evaluación de los gráficos en las secciones donde hay alta sensibilidad no existe problema para su valoración por el método visual, no así en las secciones con baja sensibilidad donde se recomienda cambiar la escala de los gráficos para su evaluación o el uso del procedimiento automático.

En la figura 3.26 se presenta la evaluación de cada una de las regiones y su promedio final para la prueba 1 usando el método de evaluación automático. Del análisis se puede concluir, con un alto grado de confiabilidad, que la región J, lugar donde se realizó la excitación, no tiene daño, lo anterior debido a la alta sensibilidad que tiene la región, también se pueden descartar las regiones D, E, G, H y I. Por otra parte, se puede ver que las regiones donde es posible encontrar el daño son las secciones A, B, C y F, siendo C la sección con mayor probabilidad de encontrar el daño, de acuerdo con los datos iniciales de los parámetros que se cambiaron, la conclusión es correcta.

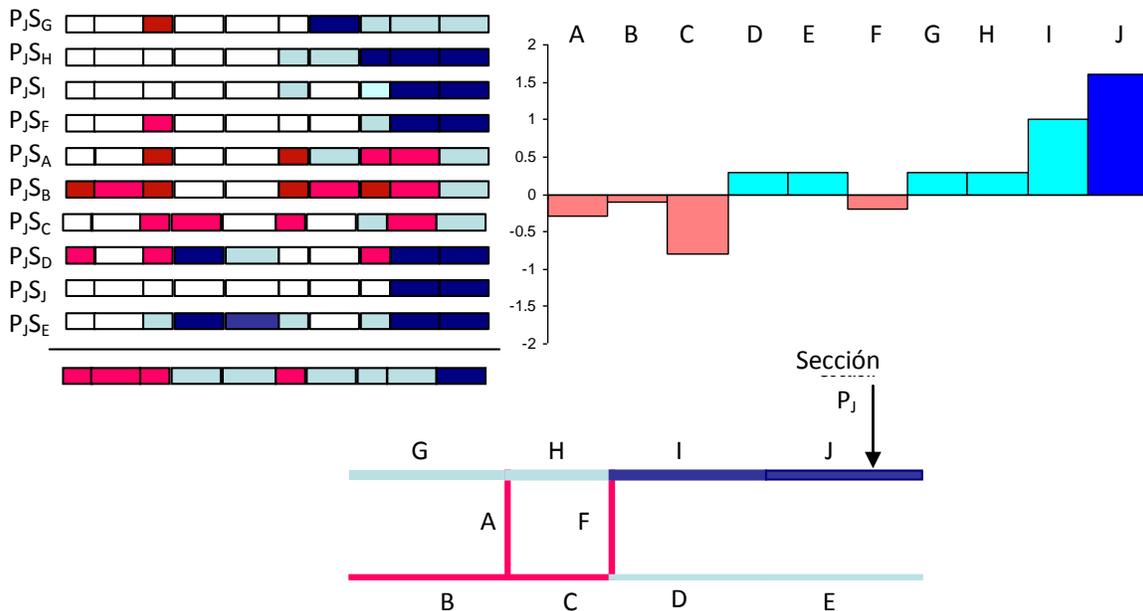


Figura 3.26 Evaluación de las secciones del modelo H, para una prueba tipo 1, usando el método automático

En la figura 3.27 se puede observar la evaluación de los gráficos de error usando el método de evaluación visual del promedio final, al igual que usando el método automático, se concluye que la región con mayor probabilidad de daño es la sección C, a diferencia del método automático en el método visual la región C es la única con probabilidad de daño y esto se debe a que en la inspección visual se puede analizar con más detalle las secciones que tienen datos por debajo o por encima de la línea de referencia. Ambos métodos de evaluación también son claros en descartar, como regiones sin daño, con alto grado de confiabilidad las regiones que son más sensibles. También se puede ver, en la figura 3.27, que la sección A no pudo ser evaluada por el método visual, debido a que en todos los

gráficos de errores generados los valores correspondientes a esta sección son muy cercanos al valor de la línea de referencia.

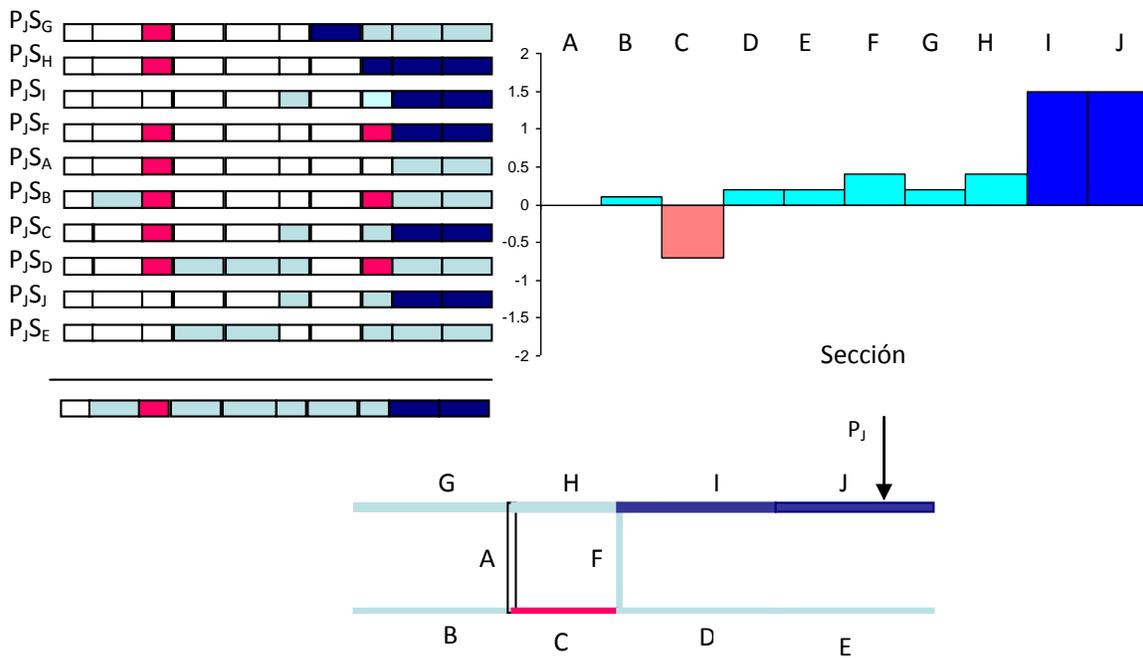


Figura 3.27 Evaluación de las secciones del modelo H, para una prueba tipo 1, usando el método visual

Con la finalidad de observar el comportamiento de la función de error cuando la estructura se excita en la sección transversal se realizó una nueva prueba tipo 1, golpeando la estructura en la sección A, la prueba también permitió remover las ambigüedades generadas por la prueba tipo 1 excitando la estructura en la región J. Los gráficos con las funciones de errores correspondientes a cada sección se pueden ver en la figura 3.28. Como era de esperarse las regiones con mayor sensibilidad fueron las cercanas a la sección A, P_{AS_A} , P_{AS_F} , P_{AS_H} y P_{AS_C} , por lo que las regiones A, F, H y C son fáciles de evaluar, mientras que las secciones alejadas en este caso representadas por las secciones J y D tienen poca sensibilidad lo que dificulta su evaluación.

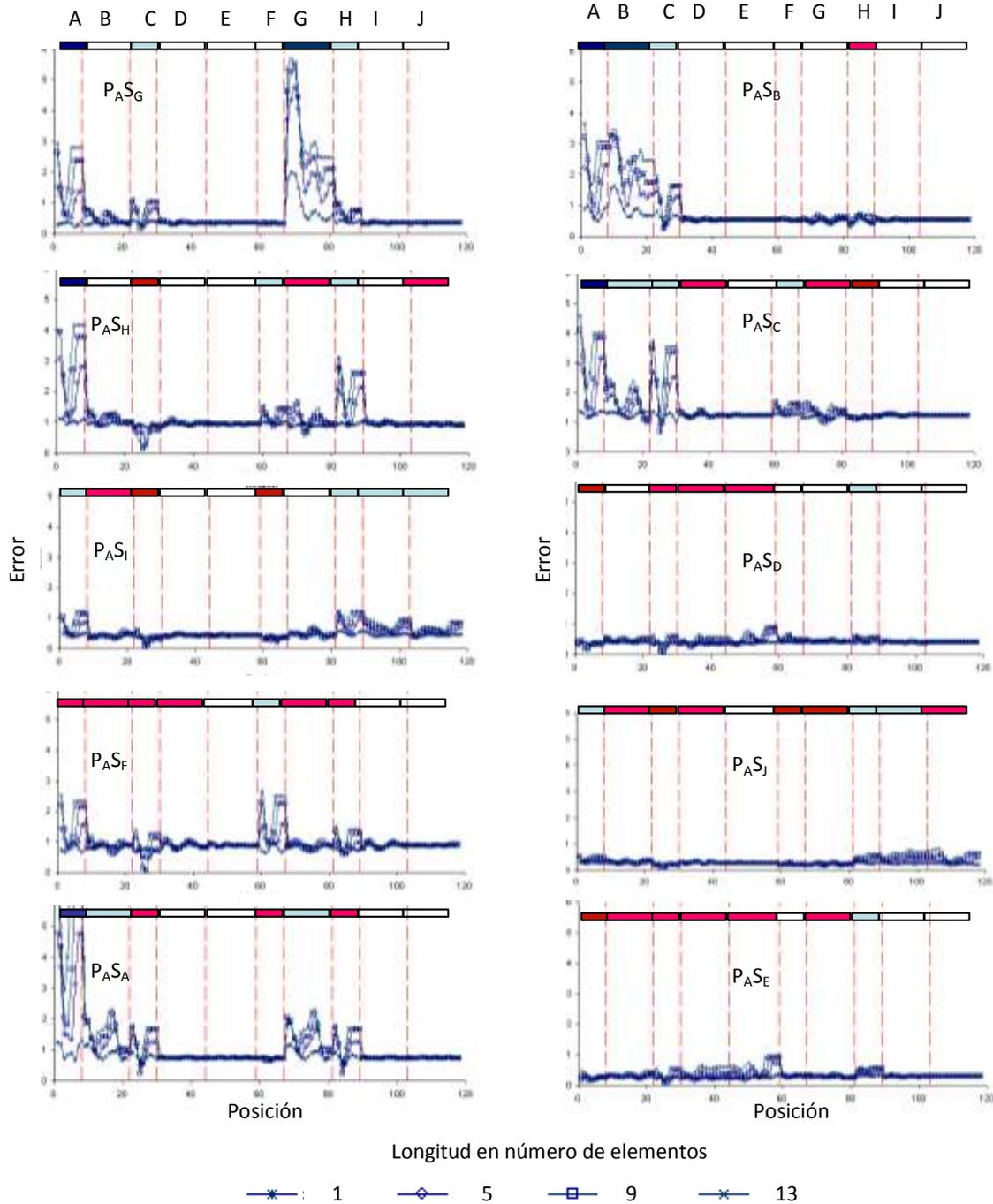


Figura 3.28 Gráficos de error para cada sensor, prueba tipo 1, excitando la estructura en la sección A

La evaluación y el promedio final de cada sección se puede observar en la figura 3.29, esta evaluación se efectuó utilizando el método automático, el promedio final concluye que hay varias regiones con probabilidad de daño siendo la más alta la correspondiente a la región C. Este dato está de acuerdo con el problema inicial. Por otra parte, debido a la alta sensibilidad de la región A, es fácil evaluar por

cualquiera de los métodos si la región tiene daño o no, en este caso es claro que esta región está libre de daño.

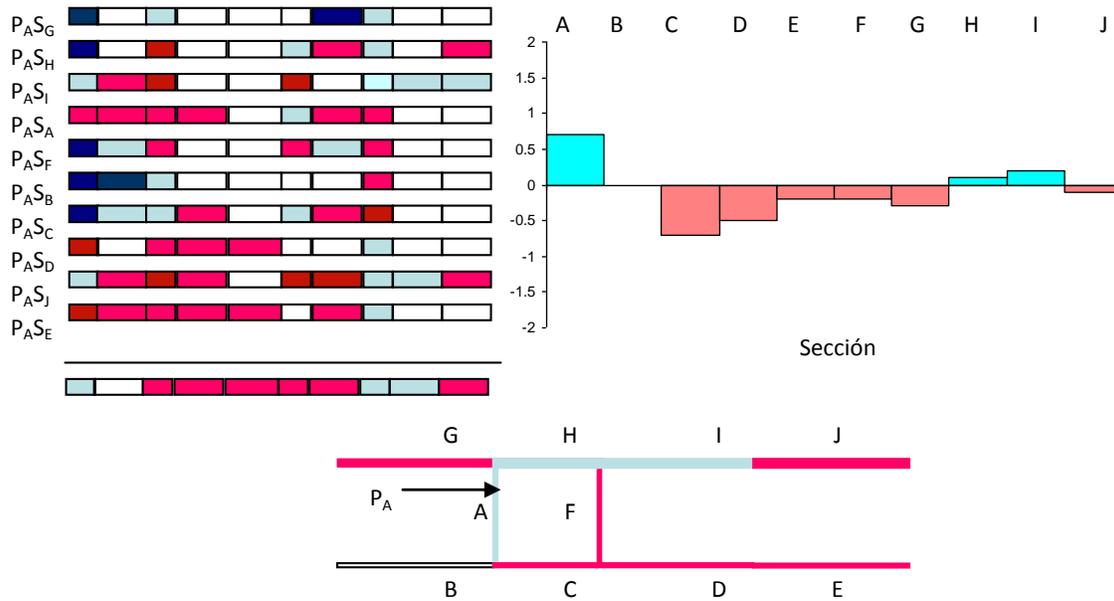


Figura 3.29 Evaluación de las secciones del modelo H, para una prueba tipo 1 excitando la estructura en la sección A, usando el método automático

El análisis final de los gráficos de error por el método automático también muestra que la calificación final de la región B es cero, por lo que no es posible saber si está libre o no de daño; sin embargo, para valorar esta región o cualquier otra donde halla duda sobre la presencia de daño se puede emplear, en primera instancia, una evaluación visual o realizar un estudio más profundo efectuando una nueva prueba donde se excite la región sobre la que se tiene incertidumbre.

En la figura 3.30 se presenta la evaluación de la función de error para cada uno de los secciones por el método visual, este método concluye que la mayoría de las secciones pueden ser descartadas de tener daño en ellas a excepción de las regiones C y D, siendo la región C la que tiene la mayor probabilidad de tener daño. Ambos métodos, en las dos pruebas tipo 1, concluyen que la región con mayor probabilidad de tener el daño es la región C siendo esto acorde con el planteamiento del problema inicial.

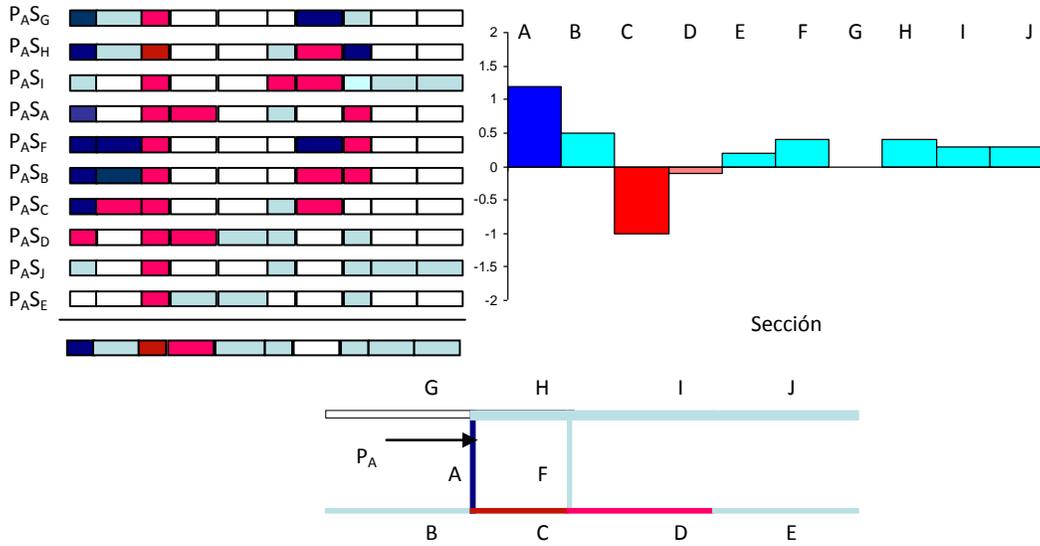


Figura 3.30 Evaluación de las secciones del modelo H, para una prueba tipo 1 excitando la estructura en la sección A, usando el método visual

Prueba tipo 2

La siguiente prueba a realizar es la del tipo 2, en esta prueba sólo se usa un sensor fijo para evaluar toda la estructura, la evaluación es posible porque la estructura es excitada en cada una de las regiones lo que permite la generación de los gráficos con las funciones de error; cabe recordar que debido a que la magnitud de la fuerza de excitación es diferente para cada impacto, la magnitud de la línea de referencia no puede ser usada como información adicional en la evaluación por el método visual.

Los parámetros asociados al daño son los mismos que se manejaron para la prueba tipo 1, así como también lo son los niveles de discretización usados para realizar la búsqueda de los parámetros que minimicen la función de error y los datos para la generación de las respuestas dinámicas del modelo de EF.

Se simuló que el sensor fijo fue colocado en la Región H, S_H , porque es una de las regiones que se encuentran casi a la mitad del modelo H, por lo que la mayoría de las secciones se encuentran relativamente cercanas, siendo las distancias más alejadas las que corresponden a las secciones D y E que se encuentran en la parte inferior derecha del modelo H; por otra parte, la distancia del sensor colocado en la región H al daño simulado se encuentra a 0,4318 m (17 pulgadas). Las regiones con mayor sensibilidad de acuerdo a las distancias entre el sensor y posiciones de impacto serán H, G, I, A y F siendo la H la que tenga mayor sensibilidad.

Los gráficos con los errores generados por el impacto en cada sección se pueden ver en la figura 3.31. Así como en todas las pruebas hechas anteriormente, en los gráficos generados para la prueba tipo 2 se puede ver con facilidad cuándo los

datos están por arriba, por debajo o en la línea de referencia, además también es posible ver la posición del sensor y del impacto en cada uno de los gráficos. De las características importantes de mencionar está el aumento en la sensibilidad de la región donde se realiza la excitación y, por supuesto, donde el sensor está colocado. Los gráficos con menor sensibilidad por la distancia entre el sensor y el lugar de impacto son $P_{D S_H}$ y $P_{E S_H}$.

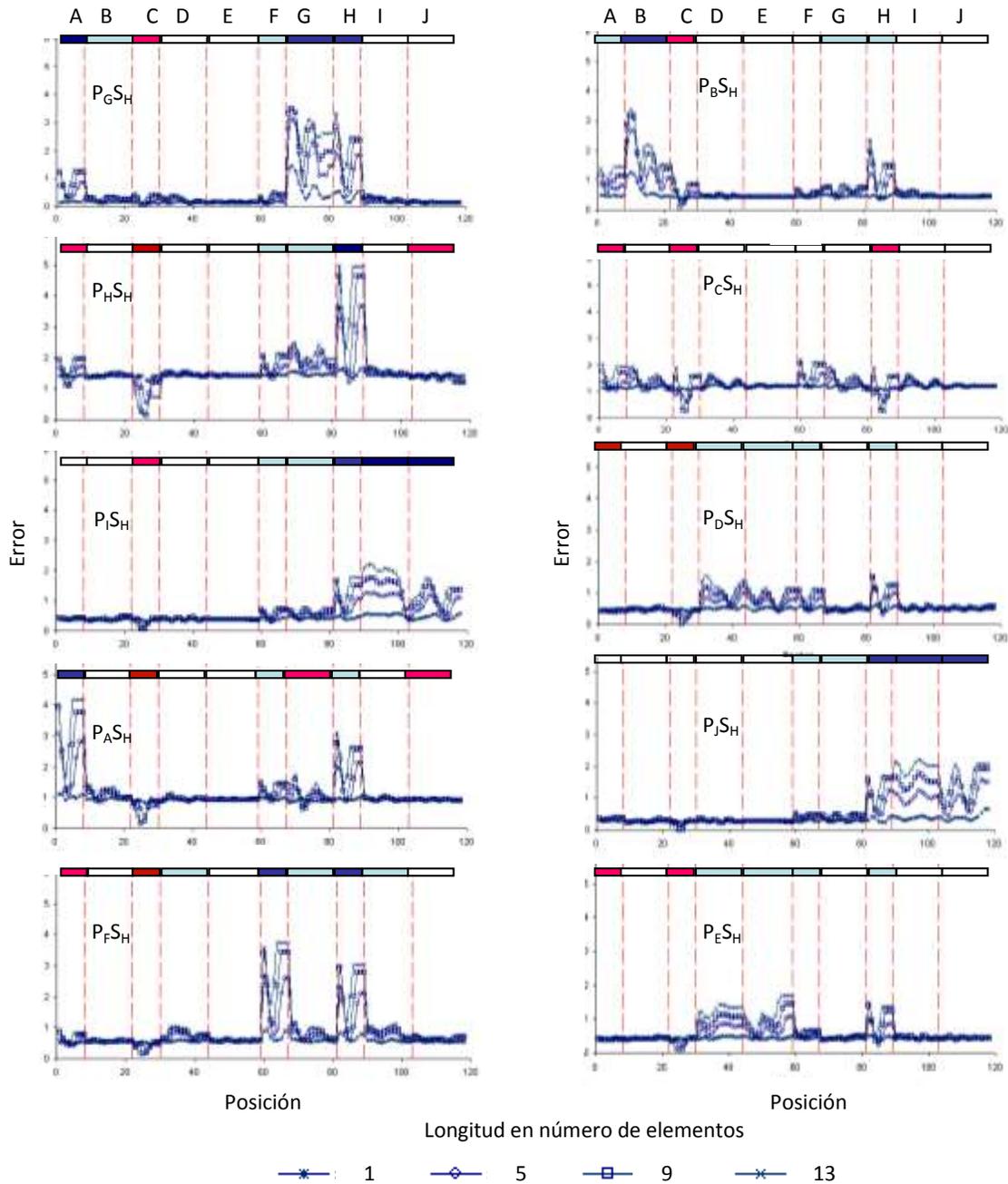


Figura 3.31 Gráficos de error para cada sección, prueba tipo 2, colocando el sensor fijo en la sección H

Usando el método de evaluación automático la región que tiene la mayor probabilidad de daño es la C, la evaluación de los gráficos y su calificación final se pueden ver en la figura 3.32. La calificación final de la sección C sobrepasa el -1, que es mayor, en cuanto a daño, a las que se obtuvieron en las dos pruebas tipo 1 que se realizaron en el modelo H, explicado en párrafos anteriores. La evaluación por el método visual también determinó que la mayoría de las regiones se encuentran libres de daño, siendo como era de esperarse la sección H con la mayor calificación.

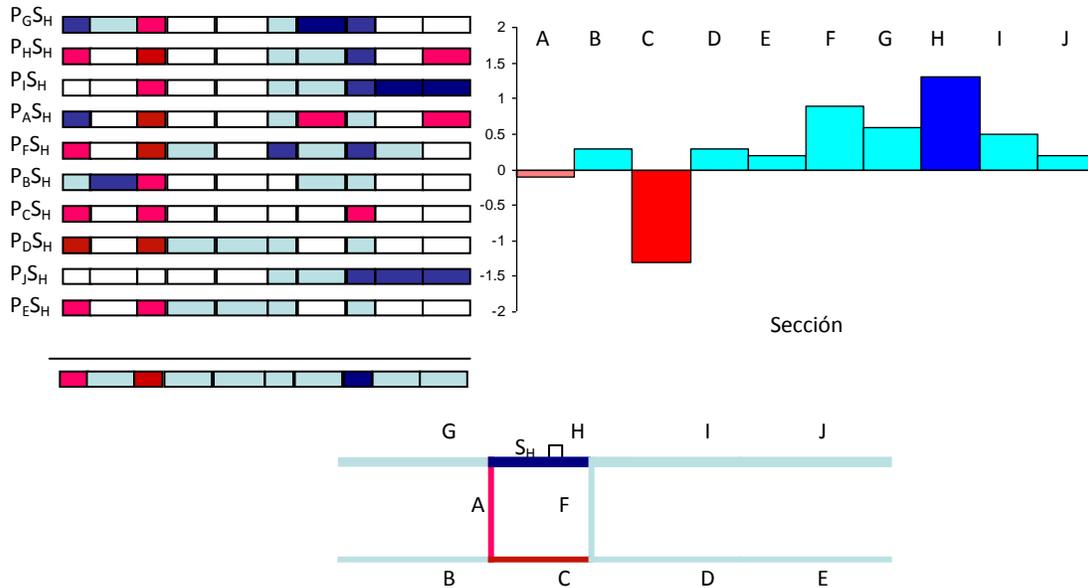


Figura 3.32 Evaluación de las secciones del modelo H, para una prueba tipo 2 colocando un sensor fijo en la sección H, usando el método automático

Las conclusiones utilizando el método visual son contundentes, los gráficos de errores mostrados en la figura 3.33 revelan que la única región donde puede haber daño es la sección C, descartando todas las otras regiones de manera clara. Al igual que el procedimiento automático, la calificación asociada a tener daño en la región C es alta, la razón principal es que el sensor se encuentra cercano a la posición del daño.

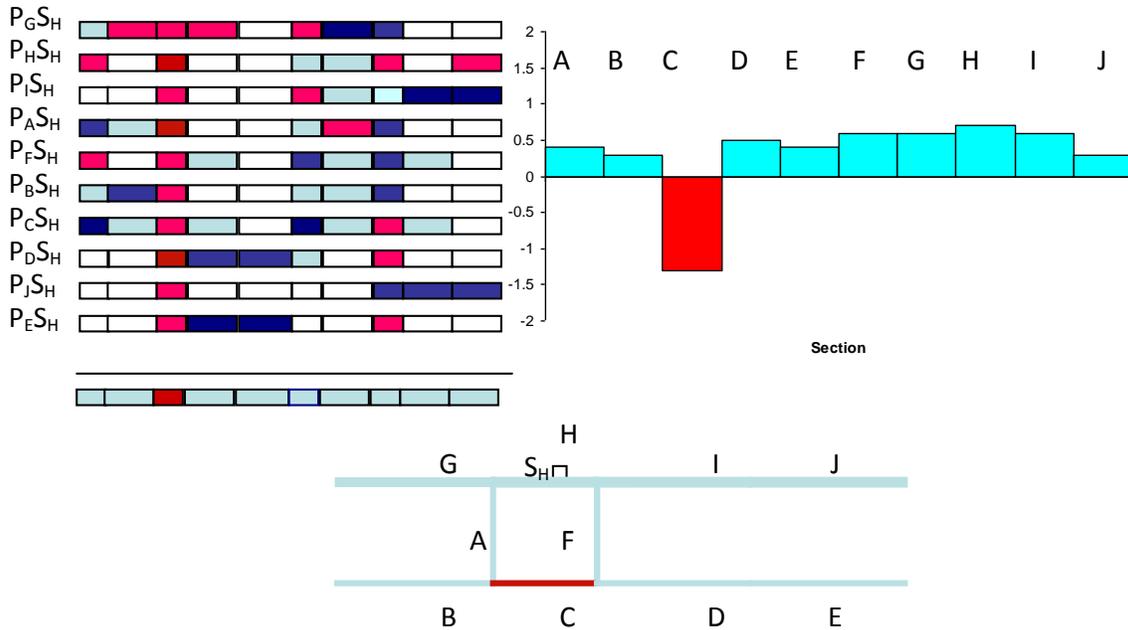


Figura 3.33 Evaluación de las secciones del modelo H, para una prueba tipo 2 colocando un sensor fijo en la sección H, usando el método visual.

Prueba tipo 3

El último tipo de prueba por investigar es el tipo 3. Este tipo de prueba sólo necesita de un sensor, pero a diferencia de la prueba tipo 2, donde el sensor es fijo, en esta prueba el sensor se mueve a la sección donde la estructura es excitada. La prueba, por sus características de colocar el sensor y el impacto en la misma sección, dará más información en el sentido de descartar las secciones que no tienen daño, por lo que la calificación será baja para las regiones que puedan presentar daño.

El daño simulado, las ventanas de búsqueda, los niveles de discretización y los datos para generar la respuesta dinámica son los mismos que para las dos pruebas anteriores, por lo que las conclusiones finales de la ubicación del daño pueden compararse entre los tres tipos de prueba.

Los gráficos con las funciones de errores generados para las diez secciones se pueden ver en la figura 3.34, en los gráficos se puede distinguir que siempre la sección donde fue excitado el modelo H es la que tiene la mayor sensibilidad, lo que da como resultado que cada sección pueda ser valorada de manera más precisa; sin embargo, al obtener el promedio final de la evaluación de cada sección, la región con daño no tiene una calificación final muy alta, esto se debe a que en algunos de los gráficos la sección evaluada corresponde a una sección alejada del daño lo que produce poca sensibilidad en la sección dañada y, por consiguiente, o no se puede evaluar la sección porque los datos están muy cerca de la línea de referencia o la calificación es muy baja.

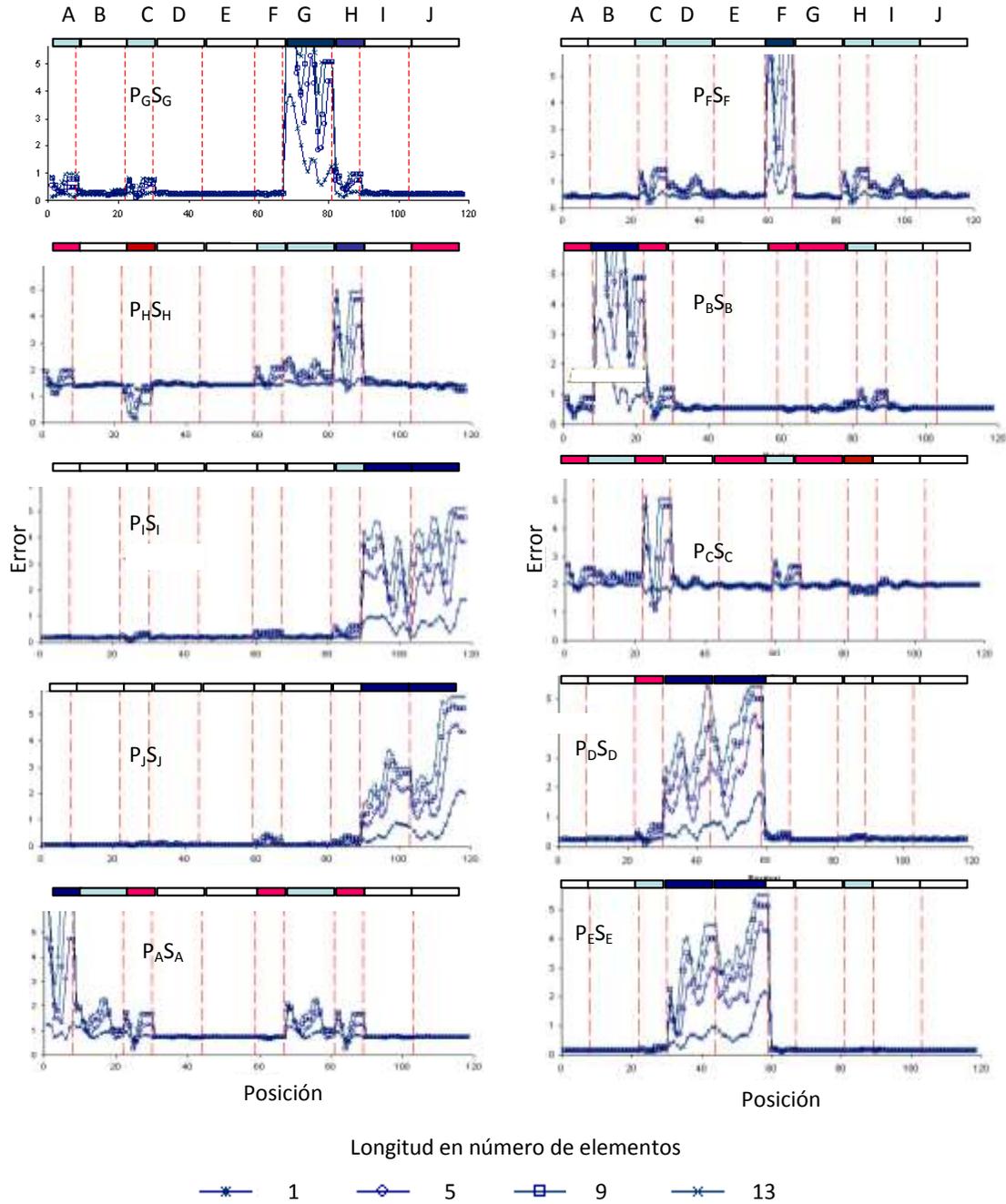


Figura 3.34 Gráficos de error para las secciones del modelo H obtenidas por una prueba tipo 3

La evaluación final para cada sección por el método automático se puede ver en la figura 3.35 Como se esperaba, la gráfica muestra que este tipo de prueba tiene mayor facilidad para demostrar las secciones que se encuentran libres de daño. También se puede decir que el número de secciones en las que se dividió el modelo H fue excesivo ya que la calificación final de las regiones que no tienen daño en ellas es muy pequeña debido al promedio final de todas las secciones. La evaluación, al igual que en los otros tipo de prueba, concluye que la sección con

mayor probabilidad de daño es la sección C, siendo además la única con probabilidad de tener daño en ella.

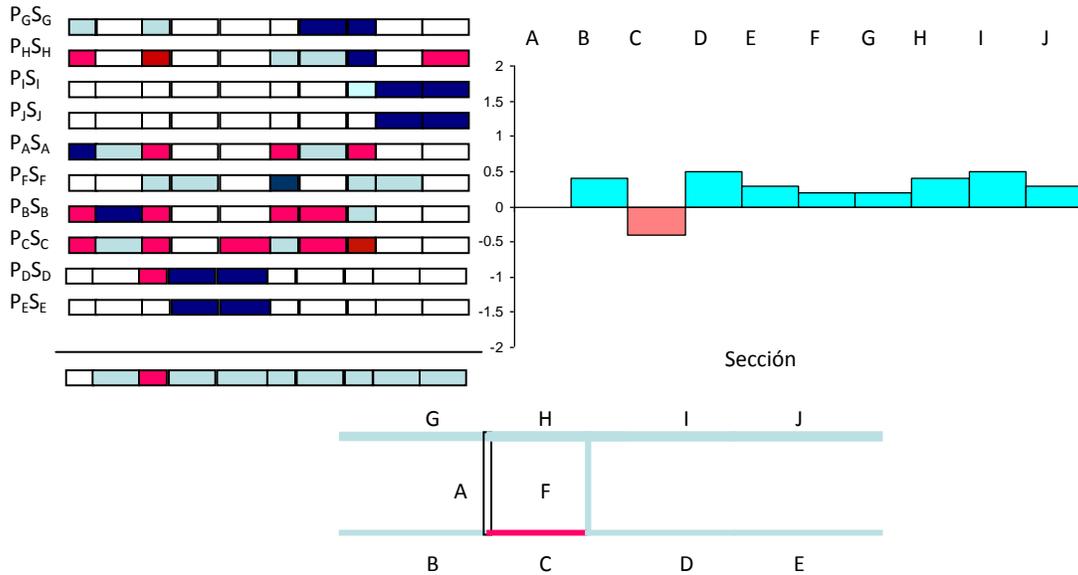


Figura 3.35 Evaluación de las secciones del modelo H, para una prueba tipo 3, usando el método automático.

En la figura 3.36 se puede realizar la evaluación final de los gráficos con las funciones de errores utilizando el método manual, con lo que se corroboran las conclusiones emitidas por el método automático, con la diferencia de que por el método visual se observan dos secciones con probabilidad de tener daño, siendo la sección C la que tiene la mayor probabilidad.

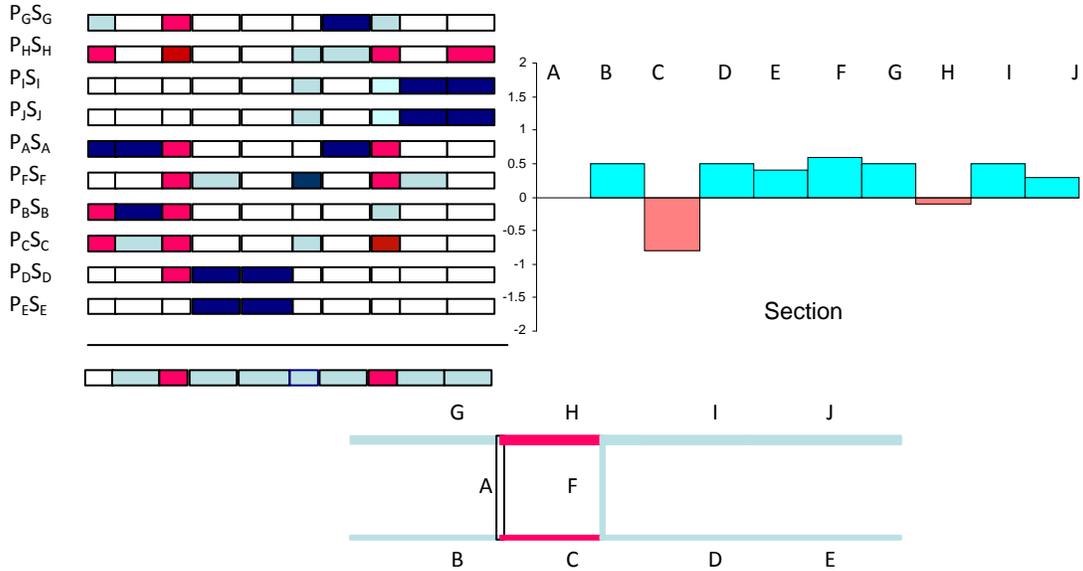


Figura 3.36 Evaluación de las secciones del modelo H, para una prueba tipo 3, usando el método visual.

Los tres tipos de prueba han demostrado satisfactoriamente el lugar donde se encuentra la mayor probabilidad de encontrar el daño, por lo que tomando en consideración las ventajas y desventajas particulares de cada prueba, cualquiera puede ser aplicado según convenga. Para este estudio se seleccionó utilizar la prueba tipo 1 para probar el método experimentalmente, porque sólo es necesario hacer una prueba sobre la estructura, lo que permite el ahorro de tiempo y procesamiento de la información además de que puede ser empleada la línea de referencia para extraer información adicional a los otros dos tipos de prueba.

3.3.2 Análisis de la sección con daño

El último paso de la metodología es encontrar la posición del daño en la sección donde se infirió que existe mayor probabilidad de encontrar daño. El procedimiento que se usa para analizar la sección seleccionada es el mismo que se emplea cuando se evalúa el modelo estructural completo, la diferencia es que ahora se evalúan sub-secciones más finas en la sección, las cuales se califican de igual manera considerando si sus datos están por arriba, por debajo o en la línea de referencia, el valor de la línea de referencia empleado, es el mismo que se obtuvo del promedio de todas las secciones.

El objetivo es encontrar la posición del elemento en la sección seleccionada que tenga la mayor probabilidad de mostrar daño; es decir, dónde comienza el daño en la sección previamente seleccionada. Una vez encontrado el elemento donde el daño comienza, las graficas de función de error se analizarán utilizando como variables el espesor y el tamaño del daño manteniendo constante el elemento donde se encontró la mayor probabilidad de daño. En estos nuevos gráficos de función de error se seleccionará el espesor y la severidad del daño que minimice

la función de error, si el espesor que minimiza la función de error es diferente del valor constante que se utilizó para evaluar las secciones, éstas son evaluadas con el nuevo espesor para determinar la sección y el elemento con mayor probabilidad de daño, este proceso se repite hasta que ambos espesores tengan el mismo valor.

Hasta este paso se puede hacer un resumen de los pasos secuenciales del método de búsqueda global, los cuales se pueden sintetizar de la siguiente manera:

1. Se analizan los gráficos con las funciones de error, manteniendo un valor de espesor constante.
2. Se evalúan las secciones por el método automático o manual.
3. Se evalúan los elementos en la sección donde se determinó que hay la mayor probabilidad de encontrar daño.
4. Se analiza el elemento seleccionado, posición constante, con gráficos con funciones de error generados para diferentes espesores y tamaño de daño.
5. Selección del espesor que minimiza la función de error, si el espesor es diferente se repite el proceso hasta que converja.

Los valores finales de los parámetros encontrados por el método de búsqueda global son aproximaciones muy cercanas a la respuesta real, la exactitud de éstos depende del nivel de discretización usado para cada uno de los parámetros en las ventanas del método de búsqueda global. Cabe mencionar que no es necesario tener gran precisión, es decir un alto nivel de discretización, ya que el objetivo principal del método es encontrar la ubicación del daño, después de ello se puede utilizar cualquier otra técnica de evaluación no destructiva que evalúe de manera más exacta el daño en la estructura.

Análisis de la sección C

El análisis de cada una de las secciones del modelo H estructural, determinó que la sección con mayor probabilidad de tener el daño, es la Sección C. Con la finalidad de mostrar la metodología completa del método de búsqueda global, se llevará a cabo el análisis de la sección C para ubicar el elemento donde existe la mayor probabilidad de que el daño comience. El análisis de la sección C se puede llevar a cabo con los datos de cualquier tipo de prueba, en este caso se realizará el análisis utilizando la prueba tipo 1, excitando la estructura en la sección J, por lo tanto el valor de las líneas de referencia es el calculado por el método automático para cada sensor.

En la figura 3.37, se puede observar los gráficos con las funciones de errores para cada uno de los sensores en el modelo H para la sección C. Como se puede ver en esta figura, es fácil apreciar los datos que se encuentran por debajo, encima o

en la línea de referencia, los cuales son sólo cuatro datos que representan el tamaño del daño. La variación de los valores de la línea de referencia dependen del sensor empleado para generar los gráficos con las funciones de error por lo que es diferente para cada uno de ellos.

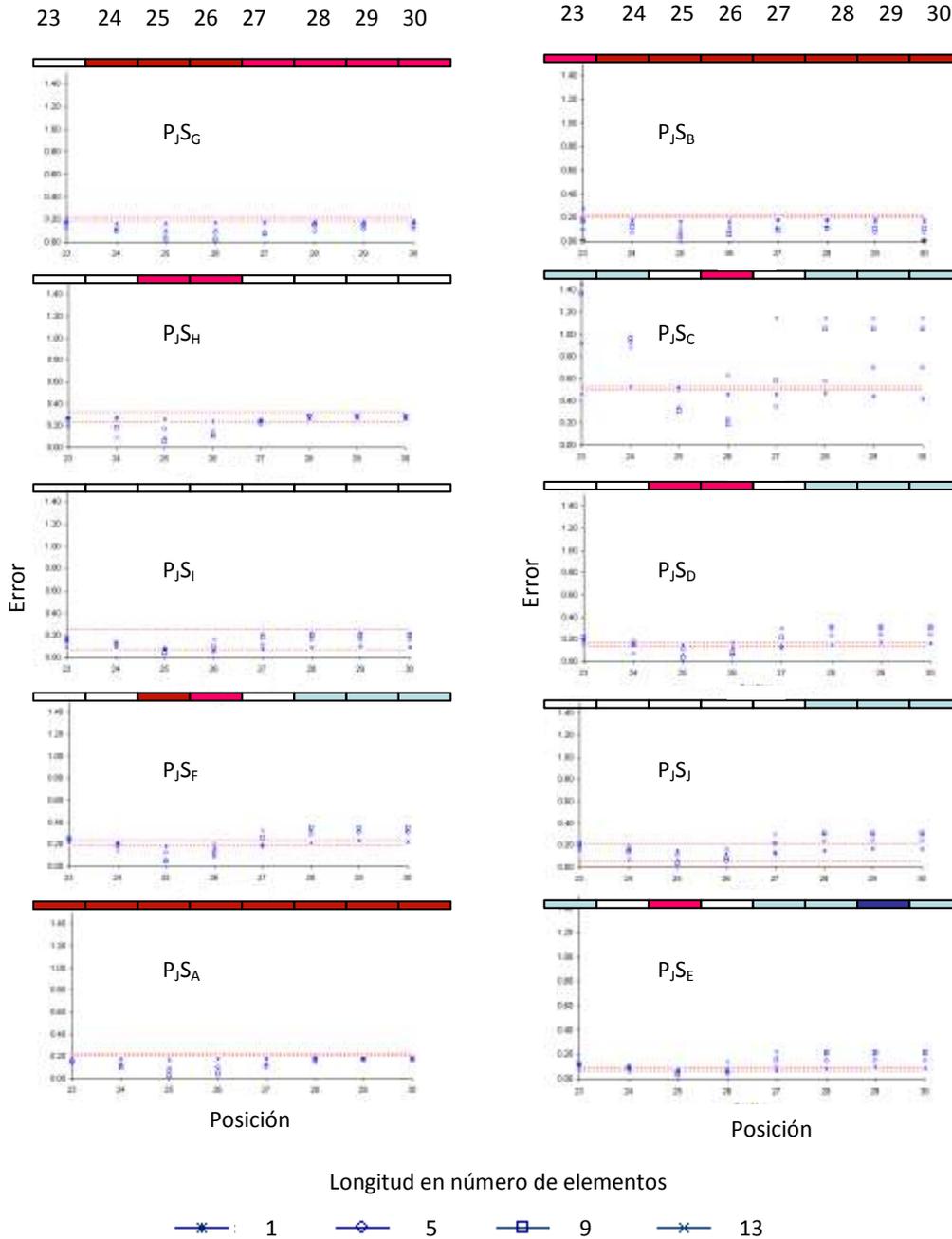


Figura 3.37 Calificaciones de la posición de los elementos en la región C, las líneas rectas rojas representan el rango de valores de la línea de referencia

El procedimiento de evaluación para esta etapa se llevó a cabo por el método visual, ya que en el método automático se dispondría de pocos datos para evaluar

a los elementos, por lo que no sería totalmente robusto. El método visual, además, tiene la ventaja de que se pueden adaptar las escalas de los gráfico para una mejor evaluación de cada elemento.

La calificación final promedio para cada elemento se puede ver en la figura 3.38, la evaluación determinó que el daño tiene mayor probabilidad de comenzar en el elemento que corresponde a la posición 25 y 26, siendo la posición 25 la que tiene mayor probabilidad.

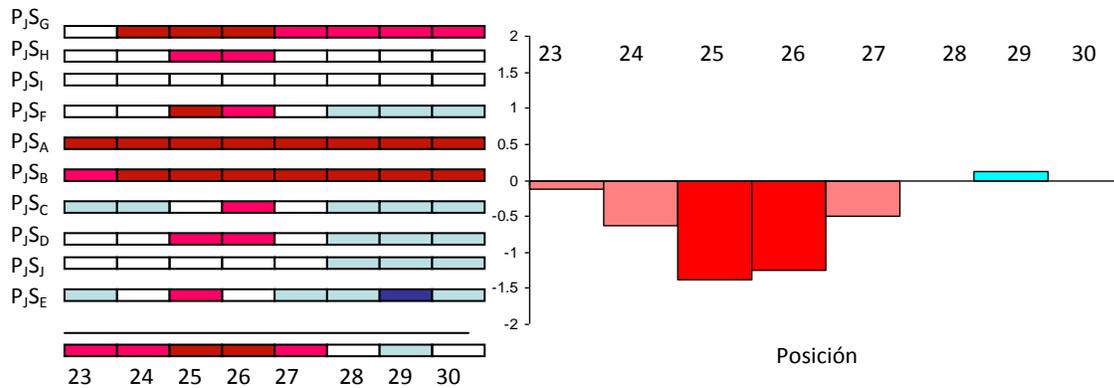


Figura 3.38 Calificación asignada para cada posición de la sección C

Con el valor de la posición del elemento, lo siguiente es obtener los valores del tamaño del daño y de la reducción de espesor, para lo cual se analizarán los gráficos de error dejando la posición constante; en la figura 3.29 y en la tabla 3.1 se pueden ver los valores asociados con estos parámetros que minimizan la función de error en la posición seleccionada previamente.

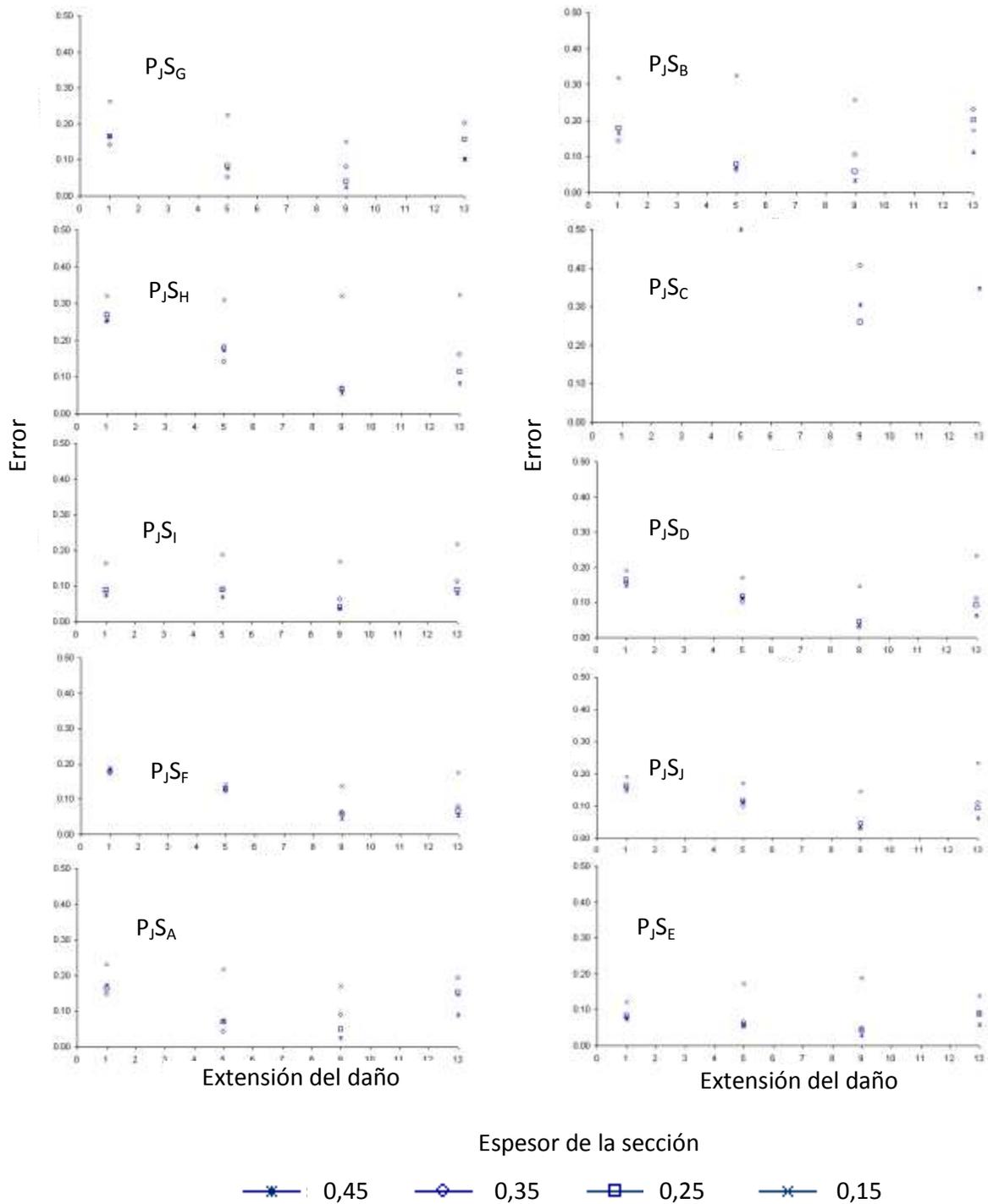


Figura 3.39 Gráficos de error conservando la posición constante y variando el espesor y la extensión del daño

La tabla 3.1 indica que la mayoría de los valores que minimizan la función de error corresponden a un espesor de 0,01143 m (0,45 pulgadas) con una extensión de 9 elementos que corresponde a 0,05715 m (2,25 pulgadas). El análisis de las secciones se realizó con los gráficos de error manteniendo fijo el espesor de

0,01143 m (0,45 pulgadas) por lo que no es necesario analizar otra vez las secciones ya que los valores convergieron en la primera iteración. En resumen, el método de búsqueda global obtuvo los siguientes valores, el daño comienza en la posición 25, la cual corresponde al elemento 1014, con una reducción del espesor de 0,0127 m (0,5 pulgadas) a 0,01143 m (0,45 pulgadas) en 9 elementos a partir del elemento 1016, en comparación con la respuesta correcta que indica que el daño comienza en el elemento 1016, con una reducción en el espesor de 0,0127 m (0,5 pulgadas) a 0,00762 m (0,30 pulgadas) con una extensión de 7 elementos. Se puede concluir que es una muy buena aproximación en donde la posición es una de las que mejor se identificó y donde se puede notar una correlación dependiente entre la extensión del daño y el espesor que se reduce en dicha extensión.

Tabla 3.1 Tamaño del daño y espesor

Elemento 1014 (posición 25)		
Prueba	Extensión del daño (en número de elementos)	Espesor
P _J S _G	9	0,45
P _J S _H	9	0,45
P _J S _I	9	0,45
P _J S _F	9	0,45
P _J S _A	9	0,45
P _J S _B	9	0,45
P _J S _C	9	0,25
P _J S _D	9	0,35
P _J S _J	9	0,35
P _J S _E	9	0,45

Aunque los datos obtenidos por el método de búsqueda global convergieron en la primera iteración, también fueron analizados los gráficos con la función de error utilizando los espesores de 0,00889 m (0,35 pulgadas) y 0,00635 m (0,25 pulgadas). Los resultados, utilizando ambos espesores, obtienen como conclusión que la región C es la que presenta mayor probabilidad de tener el daño, en la figura 3.40 se puede ver el análisis de las posiciones de la región C para ambos espesores. A diferencia de la evaluación realizada usando el espesor de 0,01143 m (0,45 pulgadas) donde la posición en que comienza el daño es la 25, en las evaluaciones hechas con estos espesores la posición donde comienza es la 26, que corresponde al elemento 1018.

En la figura 3.40 se puede apreciar que la posición 26 es la que tiene la mayor probabilidad de que el daño comience para ambos espesores, puesto que es el mismo valor, sólo es necesario analizar el espesor y la extensión del daño para esta posición. Los resultados para la posición 25, elemento 1018, se pueden ver en la tabla 3.2, los cuales concluyen que los otros dos parámetros son un espesor de 0,01143 m (0,45 pulgadas) con una extensión de 9 elementos o un espesor de 0,00889 m (0,35 pulgadas) con una extensión de 5 elementos, ambos resultados son buenas aproximaciones a la respuesta real.

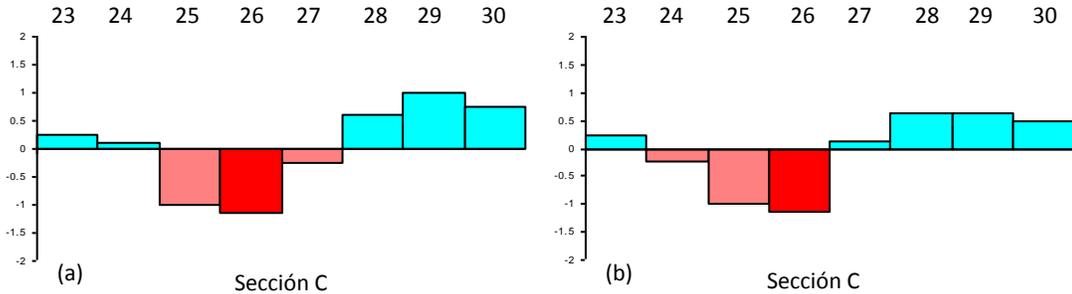


Figura 3.40 Evaluación de las posiciones de la sección C (a) Para un espesor de 0,00889 m (0,35 pulgadas) (b) 0,00635 m (0,25 pulgadas)

Tabla 3.2 Extensión del daño y espesor en el elemento 1018

Elemento 1018		
Prueba	Extensión del daño (en número de elementos)	Espesor
P _J S _G	9	0.45
P _J S _H	5	0.35
P _J S _I	5	0.45
P _J S _F	5	0.35
P _J S _A	9	0.45
P _J S _B	9	0.45
P _J S _C	5	0.35
P _J S _D	5	0.35
P _J S _J	5	0.35
P _J S _E	5	0.35

Se puede concluir que el método de búsqueda global ha cumplido totalmente con su objetivo principal, que es el de localizar el daño. Una vez localizada la zona del

daño otras técnicas de inspección no destructiva se pueden aplicar de acuerdo a las condiciones particulares de la estructura para cuantificar de una manera más exacta el nivel de daño.

4 Estudios experimentales

En estudios de simulación, el Método de Búsqueda Global ha demostrado ser una herramienta capaz de detectar daño asociado al cambio en los parámetros estructurales y considerando pruebas en las que se utilizan datos generados por el modelo calibrado de elemento finito. En este capítulo se demuestra que el Método de Búsqueda Global puede ser empleado apropiadamente para la detección de daño en estructuras reales, donde se diseñaron pruebas experimentales induciendo daño en una estructura tipo Viga y otra estructura tipo H. Las primeras pruebas experimentales se realizaron en la estructura tipo viga por ser más sencilla y no presentar uniones que dificultan el proceso de calibración.

Las pruebas experimentales se diseñaron de manera tal que el daño se asocia a sólo tres variables experimentales; espesor, tamaño y posición. Sin embargo, cabe recordar que el Método de Búsqueda Global no está limitado a estos tres parámetros y se pueden manejar tantos parámetros como sea requerido. De las tres variables consideradas, la posición es la más importante por el MBG, porque ubicando el daño con relativa exactitud, es posible combinar el Método de Búsqueda Global con otras técnicas para determinar al resto de las variables de una manera más precisa.

Para inducir el daño en las estructuras se decidió alterar la masa en secciones de los dos tipos de estructuras añadiendo barras de aluminio a las caras laterales de éstas. Lo anterior se decidió para simular el daño de manera que no se alteraran las estructuras en forma permanente y pudieran ser utilizadas en futuros experimentos para probar el MBG con otros parámetros o utilizar nuevas técnicas experimentales. Agregar barras de aluminio en las estructuras es semejante a tener un incremento en el espesor, por el contrario a lo general de una estructura que pierde sección transversal en sus componentes estructurales, pero para el propósito de evaluar los algoritmos del MBG, el daño producido por este fenómeno es equivalente.

4.1 Estudios experimentales en la viga

4.1.1 Arreglo experimental

El daño en la viga se indujo pegando con epóxico dos pequeñas barras de aluminio en dos de las caras laterales como se puede ver en la figura 4.1. La longitud de cada una de las barras es de 0,0508 m (2 in) con una sección transversal de 0,00762 m por 0,0127 m (0,3 in por 0,5 in) y fueron adheridas en la viga a una distancia de 0,889 m (35 in) tomando como referencia el lado izquierdo.

Con estas dos barras se incrementó el espesor de la viga 0,01524 m (0,6 in), respecto a su valor original, en la ubicación antes mencionada.

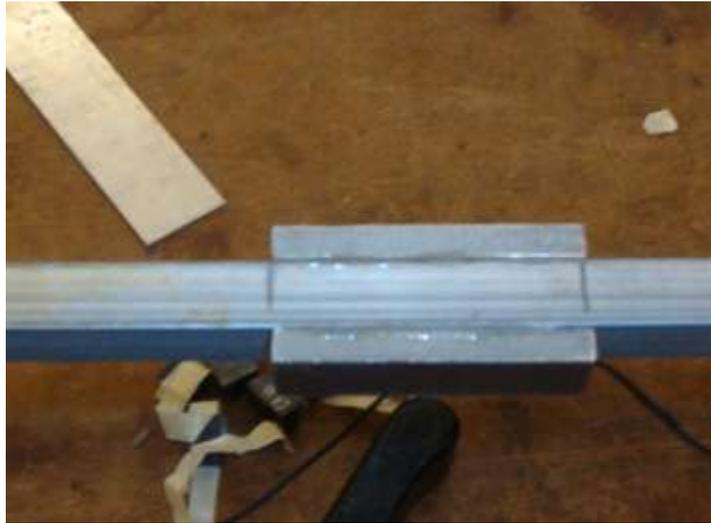


Figura 4.1 Barras de aluminio adheridas a la estructura tipo viga

La figura esquemática del arreglo de la viga se puede ver en la figura 4.2, en donde se puede ver la posición de las barras de aluminio y las seis secciones en que fue dividida la viga, cada una de las secciones tiene una longitud de 0,0381 m (15,0 in) con excepción de la sección F, cuya longitud es de 0,03556 m (14,0 in). Para realizar el experimento se ocuparon cuatro acelerómetros, los cuales se colocaron en las secciones B, C, D y E, debido a que la parte de interés es el centro de la viga, las posiciones de los acelerómetros y el lugar donde se excitó la estructura se puede ver en el arreglo esquemático de la figura 4.3, mientras que la figura 4.4 muestra una fotografía del arreglo experimental.



Figura 4.2. Secciones de la viga y daño generado en la sección C

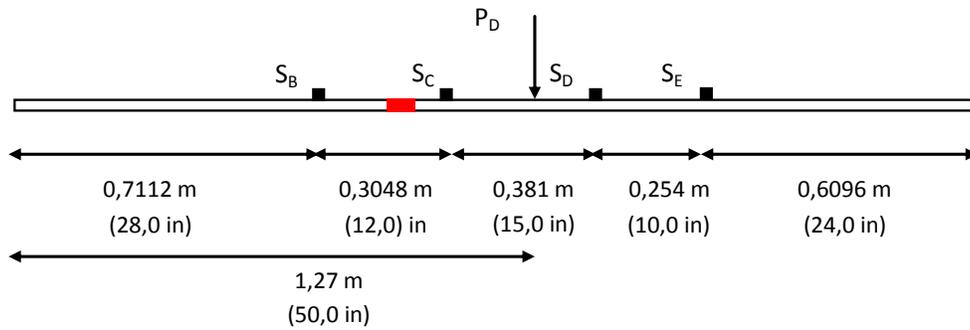


Figura 4.3. Ubicación de los sensores y el lugar de excitación



Figura 4.4. Arreglo experimental para la viga

Las respuestas dinámicas experimentales son adquiridas por el sistema descrito en el capítulo I, los cinco sensores adquieren los datos a una frecuencia de muestreo de 100 mil muestras por segundo por un periodo de 2500 μ s, la sensibilidad de cada acelerómetro y el transductor de fuerza se pueden consultar en el apéndice.

4.1.2 Parámetros de búsqueda en el MBG

Para identificar el daño en una estructura mediante el MBG, primero es necesario definir, además de la posición, los parámetros estructurales que se van a variar, así como sus límites e intervalos de variación. A lo anterior, se le llama definir las ventanas de búsqueda. Una vez hecho lo anterior, se calculan las respuestas dinámicas del modelo de elemento finito para cada una de las condiciones en

forma recursiva y se comparan con las obtenidas experimentalmente en la viga real. Para este problema en particular se seleccionaron los rangos, para la posición del elemento 1 al 356; para el tamaño del daño, desde un elemento, 0,00635 m (0,25 in), hasta 13 elementos, 0,08255 m (2,25 in); y para el espesor, desde 0,01524 m (0,60 in) hasta 0,0381 m (1,50). Por otra parte, los niveles de discretización para cada una de las variables fueron los siguientes: para la posición la búsqueda se llevó acabo cada 4 elementos, es decir cada 0,0254 m (1,0 in); para la magnitud del daño, en incrementos de 0,0254 m (1,0 in); y para el espesor en incrementos de 0,00762 m (0,30 in). Cabe recordar que el daño que se simula al agregar las barras de aluminio a la viga, es similar a tener un incremento en el espesor original de 0,01524 m (0,60 in) en 8 de los elementos de la viga, es decir 0,0508 m (2,0 in).

Una vez seleccionados los rangos y ventanas de las variables y definido el procedimiento experimental, se obtuvo la respuesta dinámica de la viga utilizando la configuración descrita en la figura 4.3. En las figuras 4.5 y 4.6 se puede ver la comparación entre las dos respuestas dinámicas, la generada por el modelo y la de la viga con daño, para los sensores S_C y S_E .

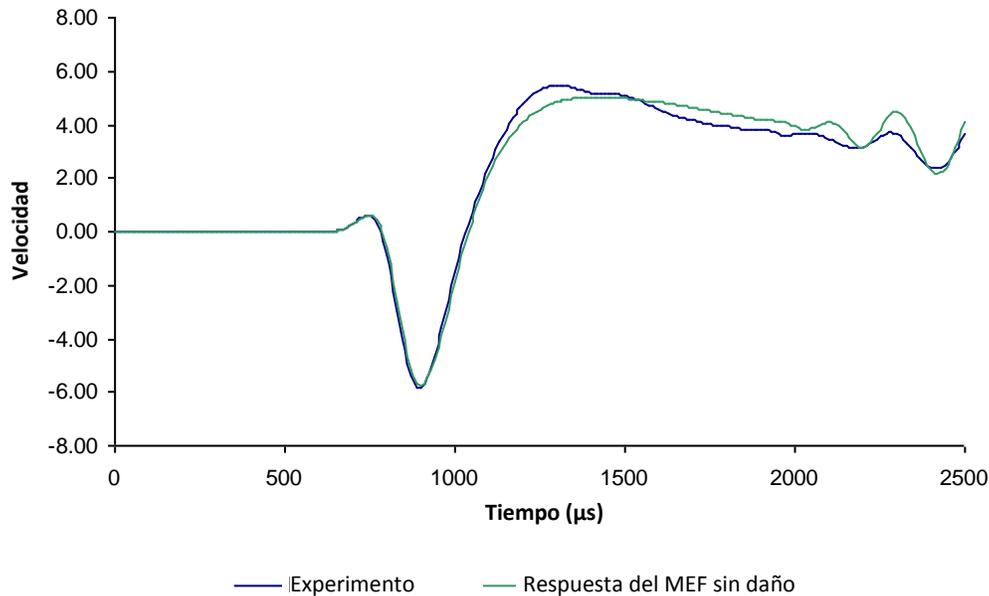


Figura 4.5 Respuesta dinámica experimental y del MEF sin daño en el sensor C

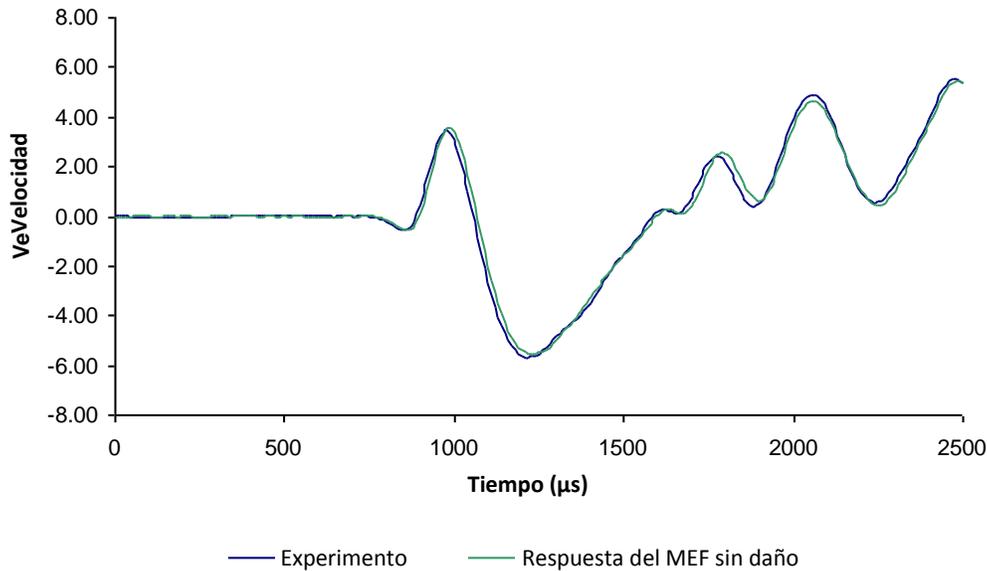


Figura 4.6 Respuesta dinámica experimental y del MEF sin daño en el sensor E

De ambas figuras es claro que existe una diferencia entre las respuestas tanto en magnitud como en fase, especialmente en los instantes finales de tiempo, siendo ésta mayor en el Sensor C, por lo que se puede concluir que existe un daño en la viga y es necesario utilizar el MBG para la localización del mismo.

4.1.3 Determinación de la zona con daño

Conocidos todos los valores de entrada del MBG se puede comenzar a generar los gráficos con las funciones de error, los primeros datos generados son usando un valor de espesor constante de 0,02286 m (0,9 in) y como parámetros variables la magnitud del daño y la posición. Se realizó la prueba experimental usando el arreglo de la figura 4.3, que corresponde a una prueba del tipo 1. En la figura 4.7 se pueden ver los 4 gráficos con la función de error correspondientes a cada acelerómetro.

Los gráficos que se ven en la figura 4.7 son, como se esperaba, similares a los generados en el capítulo II utilizando solo datos creados por el modelo de elemento finito. Los patrones característicos de los gráficos cumplen las mismas particularidades; por ejemplo, para el gráfico $P_D S_B$, es claro que el daño queda delimitado entre el lugar de impacto y el sensor B; mientras que para el gráfico $P_D S_E$, el daño está fuera de la distancia entre ambos sensores, los datos que están tanto por arriba como por debajo de la línea son fáciles de detectar y los valores de la línea de referencia tienden a ser mayores cuando el daño está cerca del sensor y el transductor de fuerza, éste es el caso del gráfico $P_D S_C$, ya que el sensor C es el más cercano a la zona del daño. En las figuras 4.8 y 4.9 se pueden ver los resultados de la evaluación de las secciones utilizando el método manual y automático respectivamente.

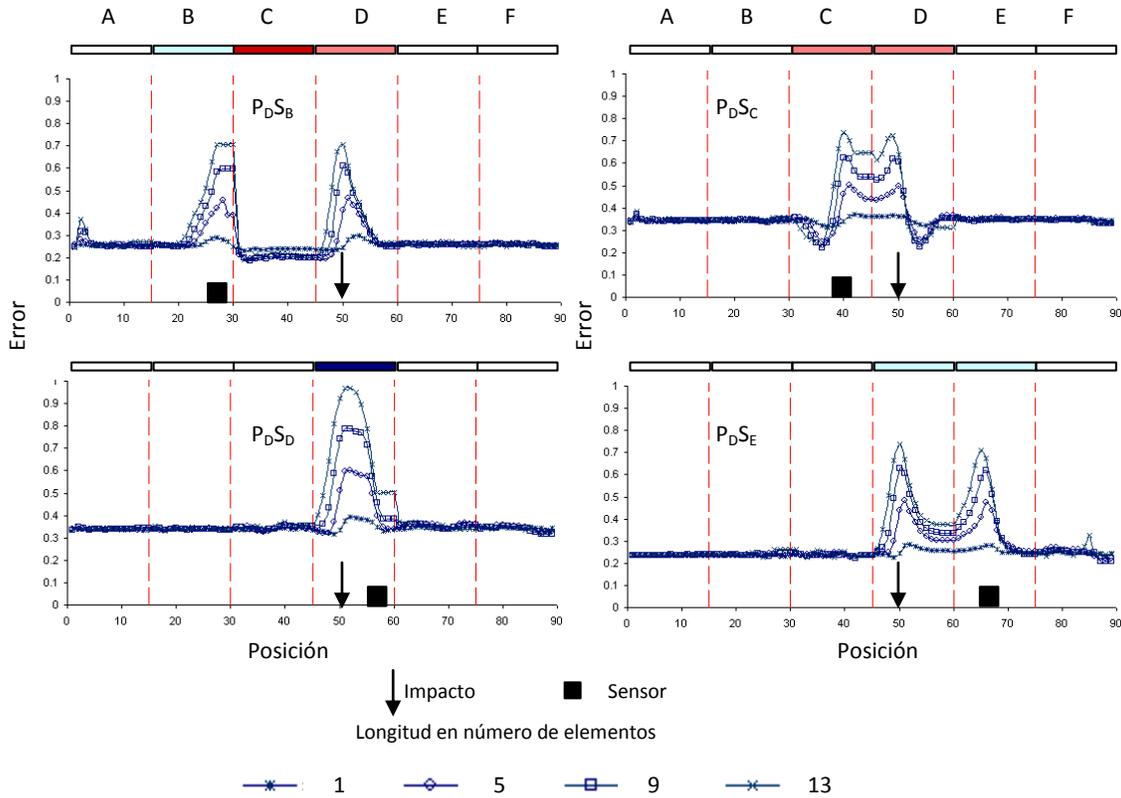


Figura 4.7 Gráficos de error generados con un espesor constante de 0,02286 m

En la grafica 4.8, la evaluación del método automático, se observa que para las secciones A, B, E y F no hay suficiente sensibilidad para evaluarlas, por lo que terminan con calificación de cero; sin embargo, la sensibilidad en estas secciones se puede incrementar si la estructura es excitada en una de éstas o se colocan sensores en las regiones donde no hay. En tanto que para la figura 4.9, la cual presenta los datos por el método visual, las secciones B, D y E terminan con una calificación mayor de cero, lo que indica que estas secciones están libre de daño, lo anterior debido a que en el método visual es posible para el evaluador aplicar otros criterios de los patrones, no programados en el método automático, además de que la evaluación no es rígida como en el procedimiento automático. Los dos procedimientos, el manual y el automático, concluyen que la sección que presenta la mayor probabilidad de tener el daño es la sección C. Tampoco ambos procedimientos tienen suficiente información para evaluar las secciones A y F, lo cual es normal al no haber sensores ni provocar la excitación en estas secciones.

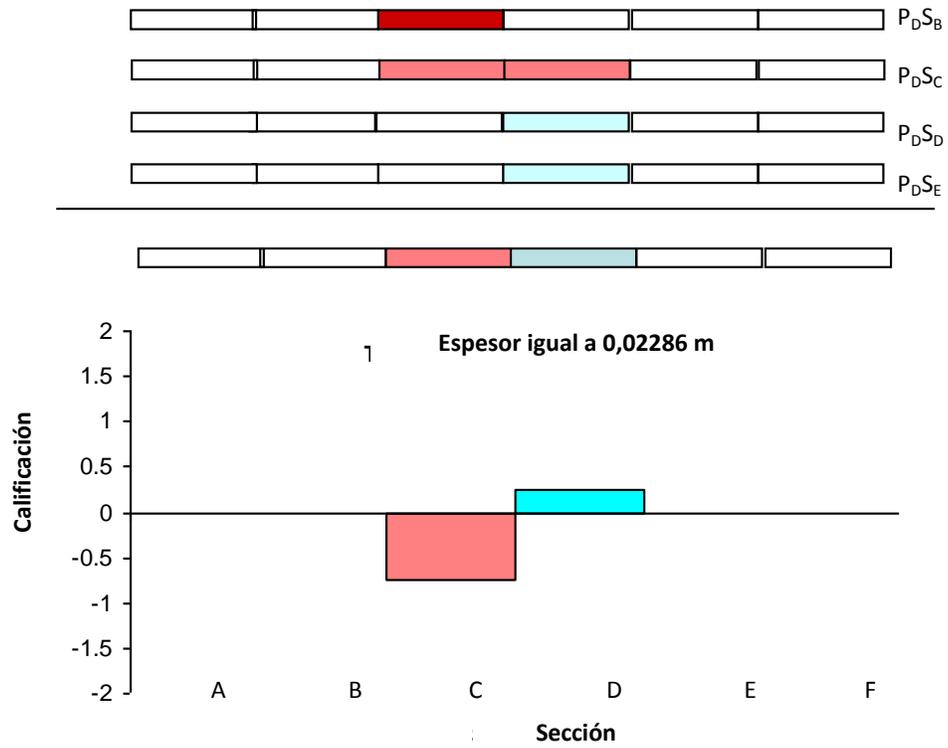


Figura 4.8 Calificación promedio de las secciones de la viga por el método automático

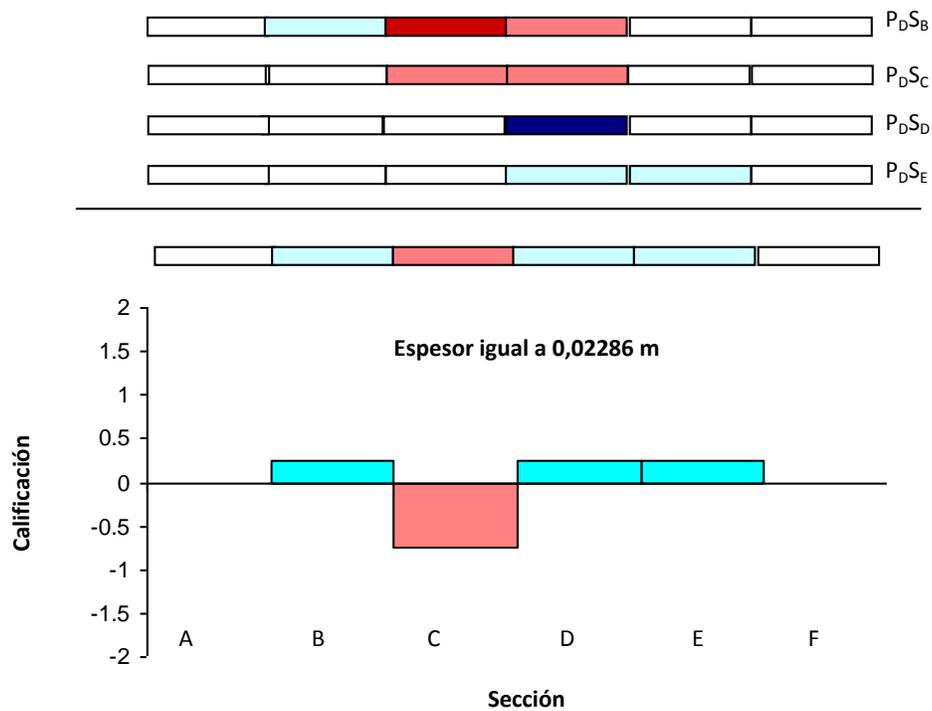


Figura 4.9 Calificación promedio de las secciones de la viga por el método manual

Para corroborar que la sección donde se encuentra el daño es la sección C, se analizó el conjunto de gráficos de error que corresponde a tener un espesor constante de 0,0381 m (1,5 in). En las figuras 4.10 y 4.11 se pueden ver las calificaciones para cada sección por el procedimiento automático y por el procedimiento manual respectivamente para este espesor.

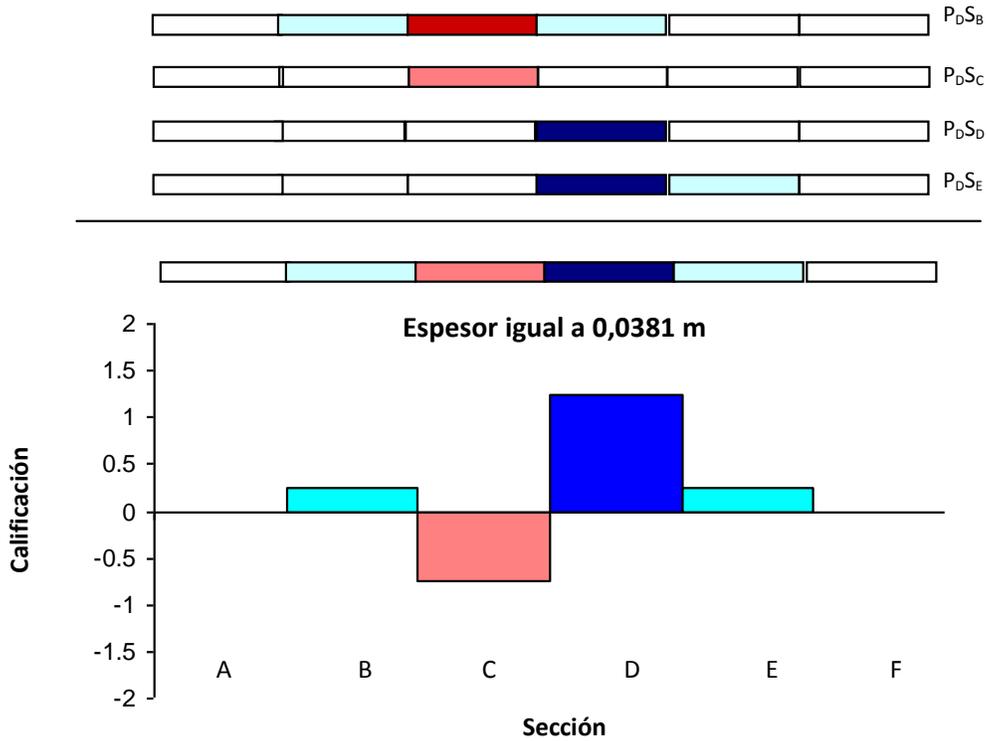


Figura 4.10 Calificación promedio de las secciones de la viga por el método automático

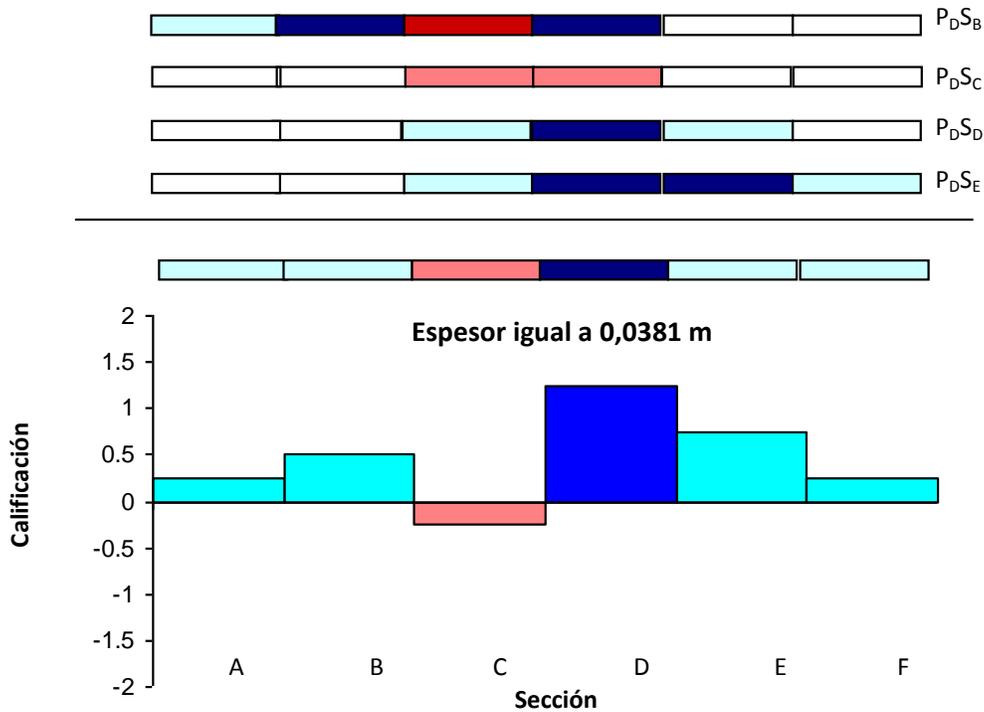


Figura 4.11 Calificación promedio de las secciones de la viga por el método automático

Ambos procedimientos, manual y automático, concluyen nuevamente que la sección que tiene la mayor probabilidad de tener el daño en ella es la sección C. A diferencia de los gráficos de error generados con un espesor de 0,02286 m (0,9 in), estos nuevos gráficos tienen más sensibilidad, la prueba de ello es que el método automático ahora puede evaluar la mayoría de las secciones con excepción de la A y la F y el método visual puede evaluar todas las secciones de la viga. Lo más importante es que los dos gráficos de errores, usando diferentes espesores para su evaluación, concluyen que la región C es la que tiene la mayor probabilidad de daño.

4.1.4 Evaluación de la sección con daño

El siguiente paso en el MBG fue evaluar cada uno de los elementos de la sección que presentó la mayor probabilidad de daño, es decir, la sección C. En la figura 4.12 se puede ver los gráficos con las funciones de error para cada prueba para la sección C, los gráficos de error corresponden a tener un espesor constante de 0,02286 m (0,9 in).

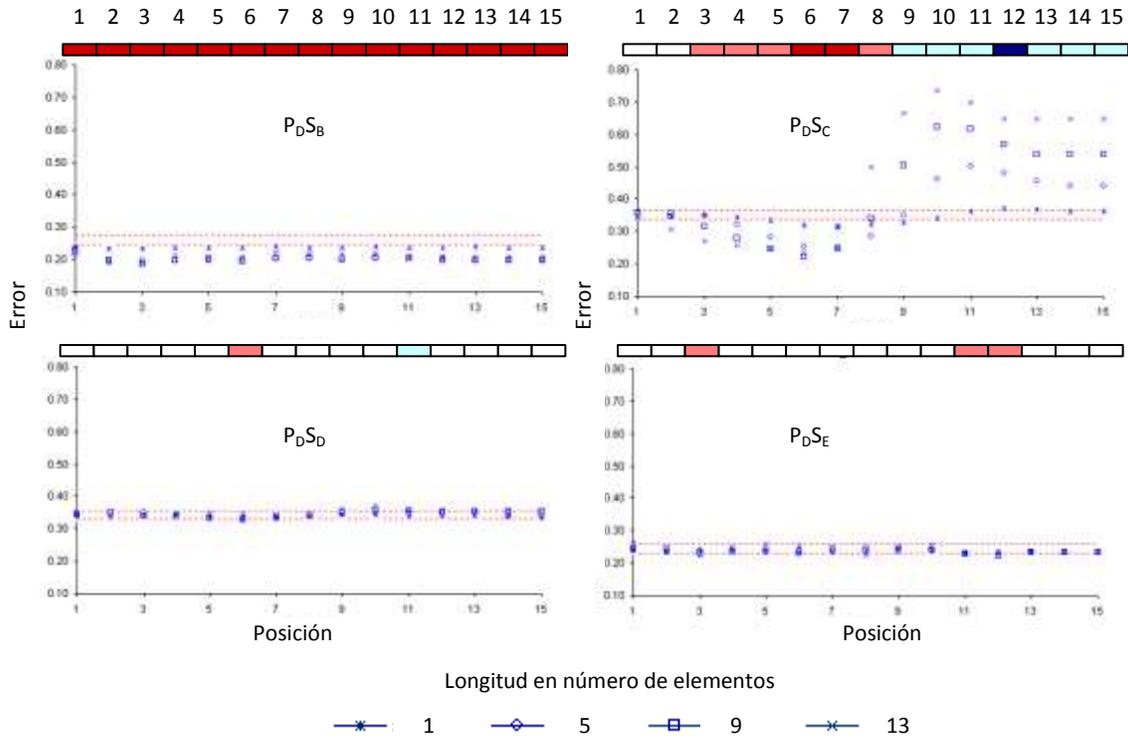


Figura 4.12 Gráficos de error para la sección C, usando un espesor constante de 0,02286 m (0,9 in).

Como se puede observar en la figura 4.12, las posiciones de los elementos no son difíciles de evaluar, aunque en algunos de ellos es necesario cambiar la escala para tener una mejor apreciación de la posición de los datos respecto a la línea de referencia. Las calificaciones de cada uno de los elementos de la sección se pueden ver en la figura 4.13, en ésta se puede percibir que las posiciones que tiene más probabilidad de que el daño inicie en ellas son 3, 6 y 7, siendo la posición 6 la que tiene el valor más alto y, además, corresponde al valor de la posición del lugar donde se colocaron las barras de aluminio. Por tanto, se puede concluir que el MBG ha detectado con bastante precisión el lugar donde comienza el daño. Para corroborar la posición, se analizó también los gráficos que corresponden a tener un espesor de 0,0381 m (1,5 in), la figura 4.14 muestra la evaluación de las posiciones al utilizar este espesor.

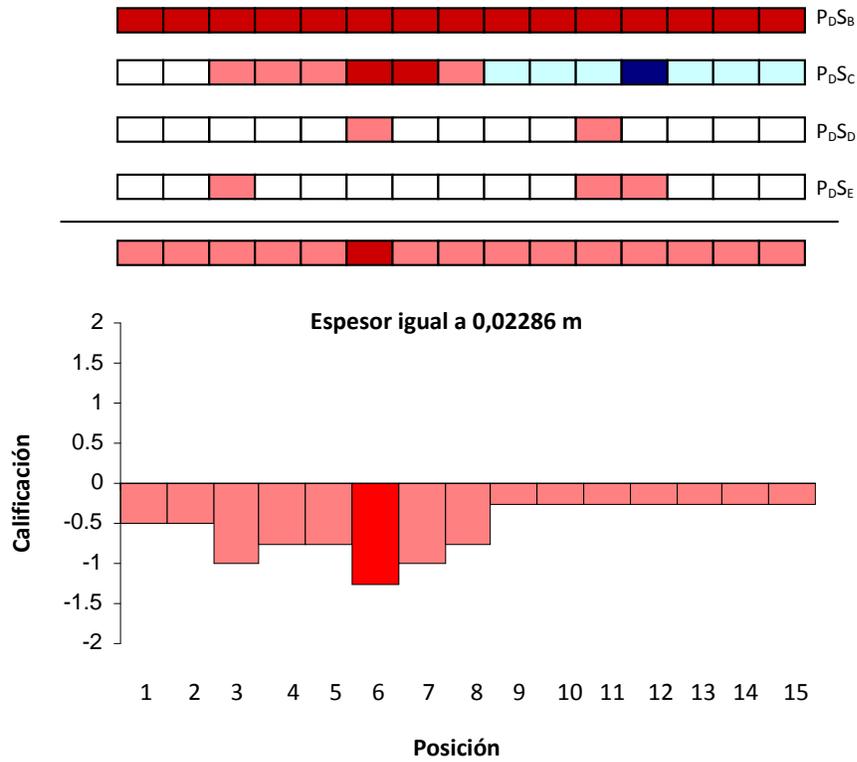


Figura 4.13. Evaluación de las posiciones de la región C, con un espesor igual a 0,02286 m (0,9 in)

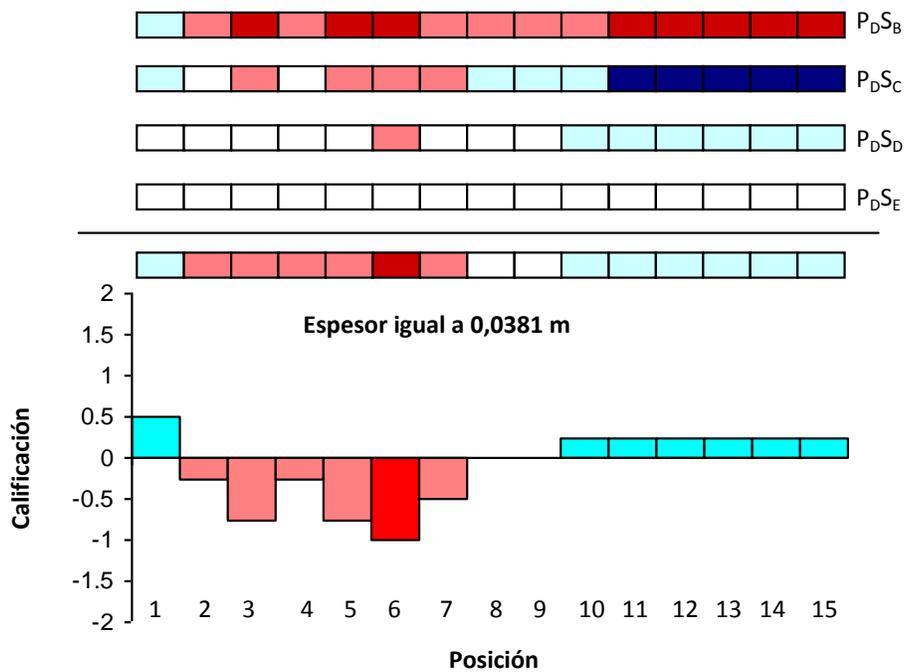


Figura 4.14 Evaluación de las posiciones de la región C, con un espesor igual a 0,0381 m (1,5 in)

El siguiente paso en el MBG es analizar los gráficos de errores manteniendo la posición fija y dejando como variables el espesor y las dimensiones del daño, en la figura 4.15 y la tabla 4.1 se muestran los datos de los gráficos para la posición 6, la cual corresponde al elemento 141.

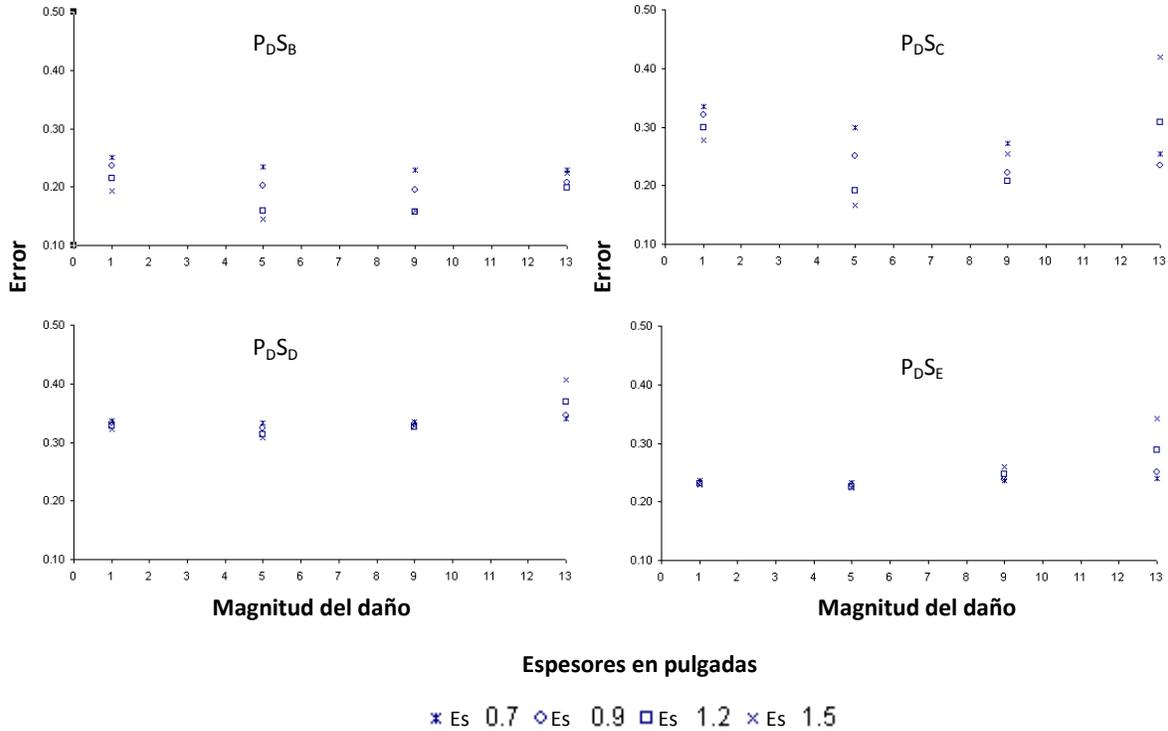


Figura 4.15 Valores de la función de error para el elemento 141 para diferentes espesores y magnitudes de daño

De la tabla 4.1 se puede concluir que los valores que se asocian a tener un daño equivalente al agregar dos barras de aluminio a la viga son; para la posición, el daño comienza en el elemento 141, con 5 elementos de extensión, 0,03175 m (1,25 in), y un espesor de 0,0381 m (1,5 in).

Tabla 4.1 Espesores y magnitudes de daño asociados a el elemento 141 que minimizan la función de error

Elemento 141		
Prueba	Magnitud del daño (número de elementos dañados)	Espesor (m)
P _D S _B	5	0,0381 (1,5 in)
P _D S _C	5	0,0381 (1,5 in)
P _D S _D	5	0,0381 (1,5 in)
P _D S _E	5	0,0381 (1,5 in)

4.1.5 Discusión de resultados

Los resultados arrojados por el MBG, en comparación con las respuestas reales, son los siguientes; el daño real está situado a 0,889 m (35 in) del lado izquierdo de la viga; el MBG encontró que el daño comienza en el elemento 141, que corresponde a una distancia de a 0,889 m (35 in), la extensión real del daño es de 0,0508 (2 in), la indicada por el MBG es de 0,03175 m (1,25 in) y, por último, el espesor real es de 0,02794 (1,1 in) y el mostrado por el MBG es de 0,0381 m (1,5 in). Estos resultados encontrado por el MBG son muy alentadores si se toman en cuenta los siguientes factores:

1. Siempre habrá una diferencia entre la respuesta dinámica del modelo de EF y la estructura real que depende del nivel de calibración del modelo, pero siempre existirá ya que difícilmente se logrará una calibración perfecta.
2. Los sensores siempre tendrán un nivel de incertidumbre en los valores que se registren del experimento dinámico.
3. El daño fue simulado, como incremento en el espesor, representa un caso relativamente simple y el caso de un daño real probablemente requiera de una simulación más compleja.
4. Los niveles de discretización aún pueden ser menores a los empleados por el MBG.

Los resultados muestran, por lo tanto, que el MBG trabaja adecuadamente para este problema, determinando de manera precisa la posición del daño. Una vez que el daño es ubicado, otras técnicas pueden ser usadas para determinar con más precisión el resto de los parámetros.

4.2 Estudios experimentales en la estructura H

4.2.1 Arreglo experimental

El arreglo experimental para simular el daño en la estructura tipo H fue muy similar al de la estructura tipo viga, donde éste se produjo agregando dos barras de aluminio en una de las secciones de la estructura, evitando dañarla permanentemente y tenerla disponible para pruebas futuras. Las barras de aluminio se pegaron con adhesivo epóxico a las caras laterales de la sección F de la estructura y, como estas barras tienen una sección transversal de 0,00762 m por 0,0127 m (0,3 in por 0,5 in), el incremento de espesor fue de 0,01524 m (0,6 in) respecto al valor original de la sección transversal. En la figura 4.16 se observa una fotografía de las barras de aluminio adheridas a la sección F, la cual es uno de los miembros verticales de la estructura y en la figura 4.17 se muestra un esquema de la estructura H dividida en 10 secciones con el daño colocado en la sección F.

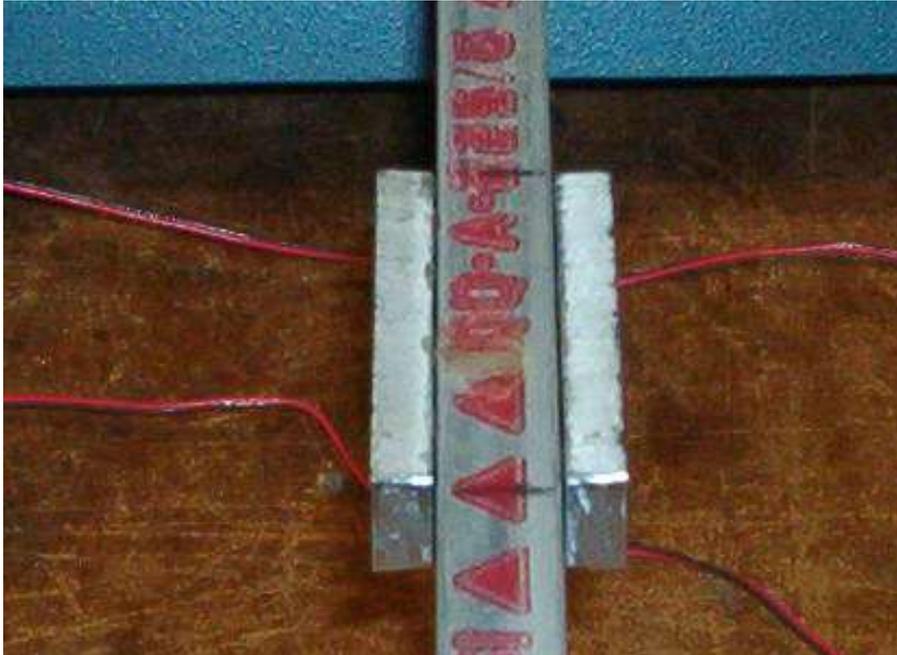


Figura 4.16 Barras de aluminio adheridas a la estructura H

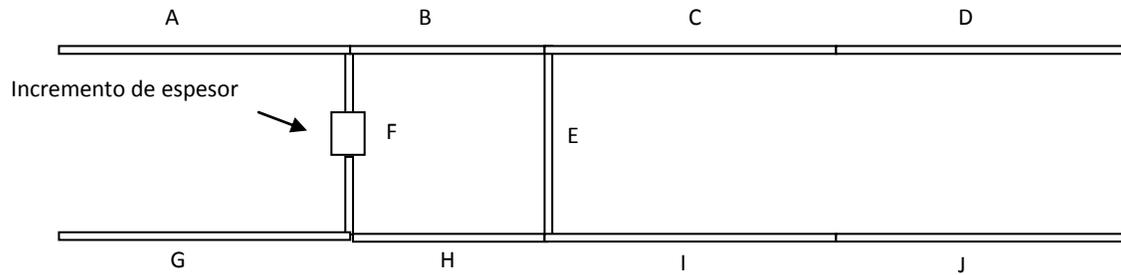


Figura 4.17 Secciones de la estructura H

Con el objetivo de tener mayor sensibilidad en las cuatro secciones del centro, B, F, E y H, los sensores de movimiento se colocaron cerca de éstas, en las secciones A, C, G e I, y el impacto para excitar la estructura fue la sección H. Este arreglo permitió tener información de las secciones A, B, C, F, E, G, H, I por la cercanía de los sensores y el lugar de impacto, mientras que las regiones J y D tenían poca sensibilidad por estar más alejadas de los sensores. En el esquema de la figura 4.18 se aprecian las posiciones de los sensores en la estructura, así como el lugar de excitación. La figura 4.19 presenta una fotografía tomada del arreglo experimental antes descrito.

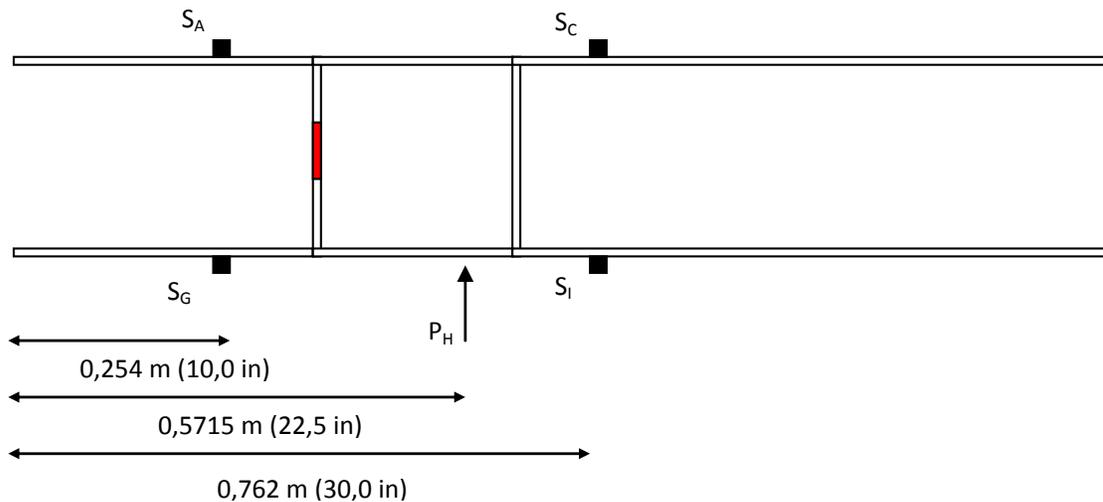


Figura 4.18 Ubicación de los sensores de la estructura H.



Figura 4.19 Fotografía del arreglo experimental

Los datos experimentales, al igual que para la viga, fueron adquiridos por el sistema de adquisición Dash-18, con una frecuencia de muestreo de 100 mil muestras por segundo para cada uno de los canales durante un periodo de tiempo de 2500 μ s. La sensibilidad de los acelerómetros y del transductor de fuerza utilizados durante la prueba se pueden consultar en el apéndice.

4.2.2 Parámetros de búsqueda en el MBG

Una vez detallado el arreglo experimental se fijaron los parámetros y ventanas de búsqueda que utilizó el MBG. En este problema, en particular, se analizaron tres parámetros, la ubicación, la extensión del daño y el cambio en el espesor original. Las ventanas de búsqueda que se establecieron para estos parámetros fueron: para la ubicación del elemento 1 al elemento 4132, con un nivel de discretización de búsqueda de cada 4 elementos, para la extensión del daño desde un elemento hasta 13 elementos dañados con un nivel de discretización de 4 y, finalmente, para el espesor desde 0.02286 m hasta 0,0381 m (0,9 in hasta 1,5 in) con una discretización de 0,00762 m (0,3 in).

Las respuestas dinámicas de la medición experimental con daño en dos sensores (G y C), comparadas con las correspondientes generadas por el modelo de elemento finito del modelo H, se aprecian en las figuras 4.20 y 4.21. De la información de los gráficos es evidente que la diferencia que existe entre las respuestas dinámicas se debe a la presencia del daño y, por tanto, el análisis de dicha diferencia puede aportar información sobre el daño mismo.

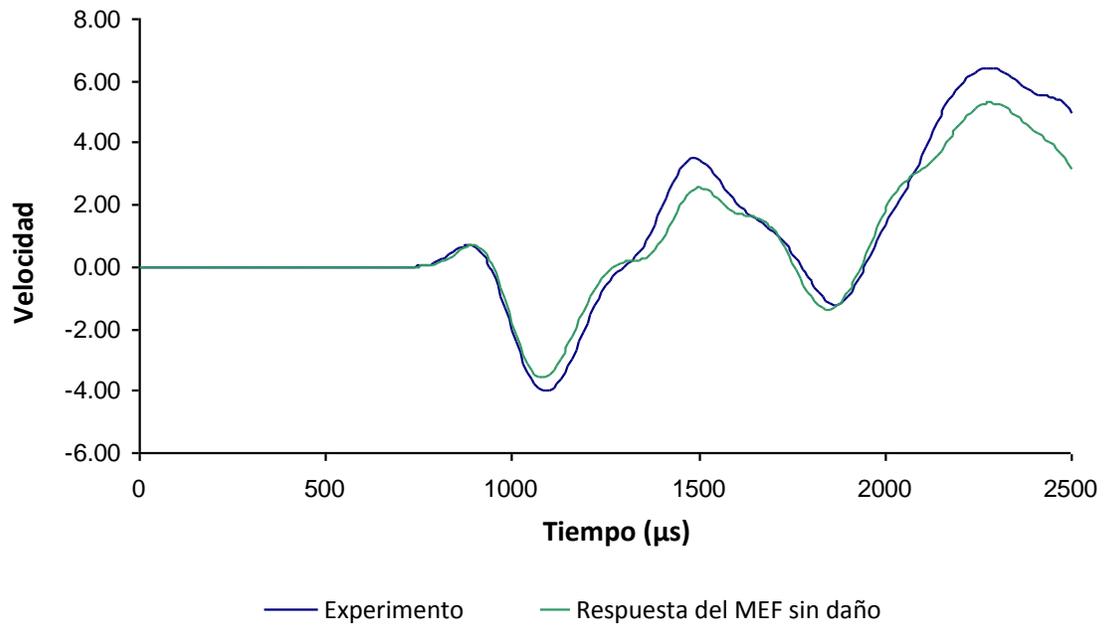


Figura 4.20 Respuesta dinámica experimental y del MEF sin daño en el sensor G

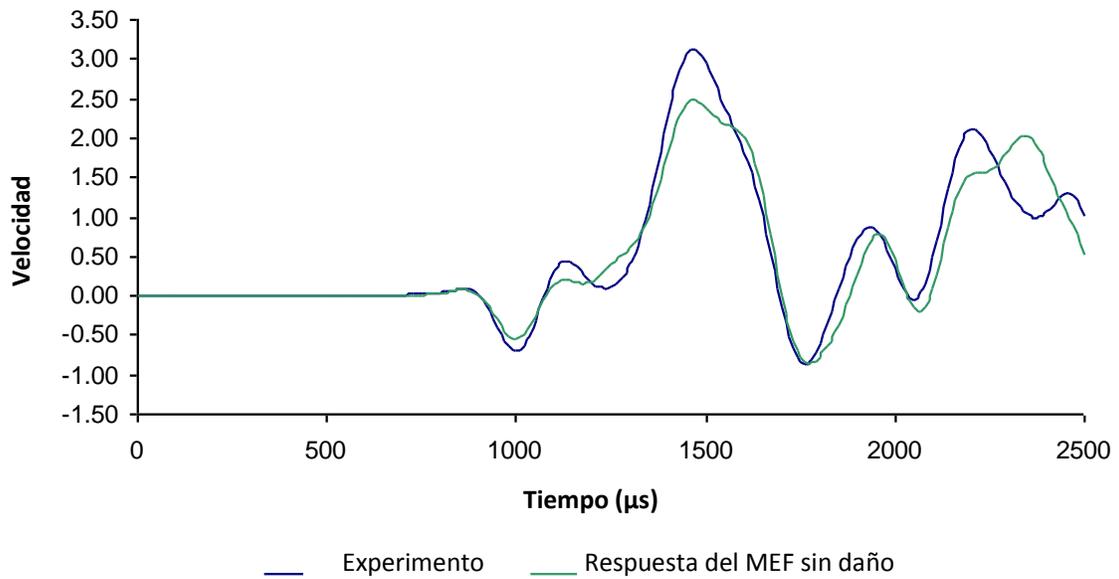


Figura 4.21 Respuesta dinámica experimental y del MEF sin daño en el sensor C

4.2.3 Delimitación de la zona con daño

Para determinar la posición del daño, la función de error se calculó inicialmente suponiendo un espesor de 0,0381 m (1,5 in). Los gráficos para estos resultados se pueden ver en la figura 4.22.

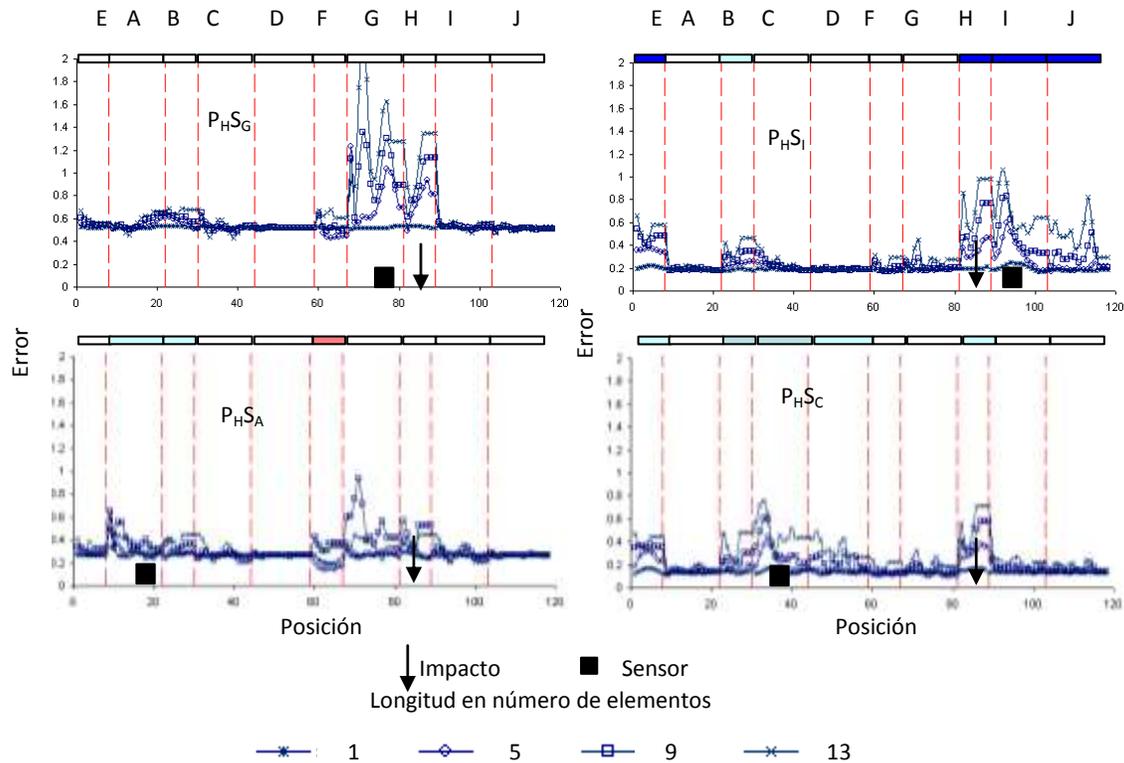


Figura 4.22 Gráficos de errores generados manteniendo un espesor constante de 0,0381 m

En la figura 4.22, es fácil apreciar la variación de los datos respecto a la línea de referencia, donde el valor más alto de la línea de referencia es el P_{HSG} debido a la cercanía que tiene con el lugar de impacto, el sensor y el daño. En la misma figura, también se distinguen las regiones que se encuentran libres de daño, respecto a las regiones donde es posible encontrarlo. En las figuras 4.23 y 4.24 se presentan las calificaciones de las secciones obtenidas por el procedimiento automático y el procedimiento manual-visual respectivamente.

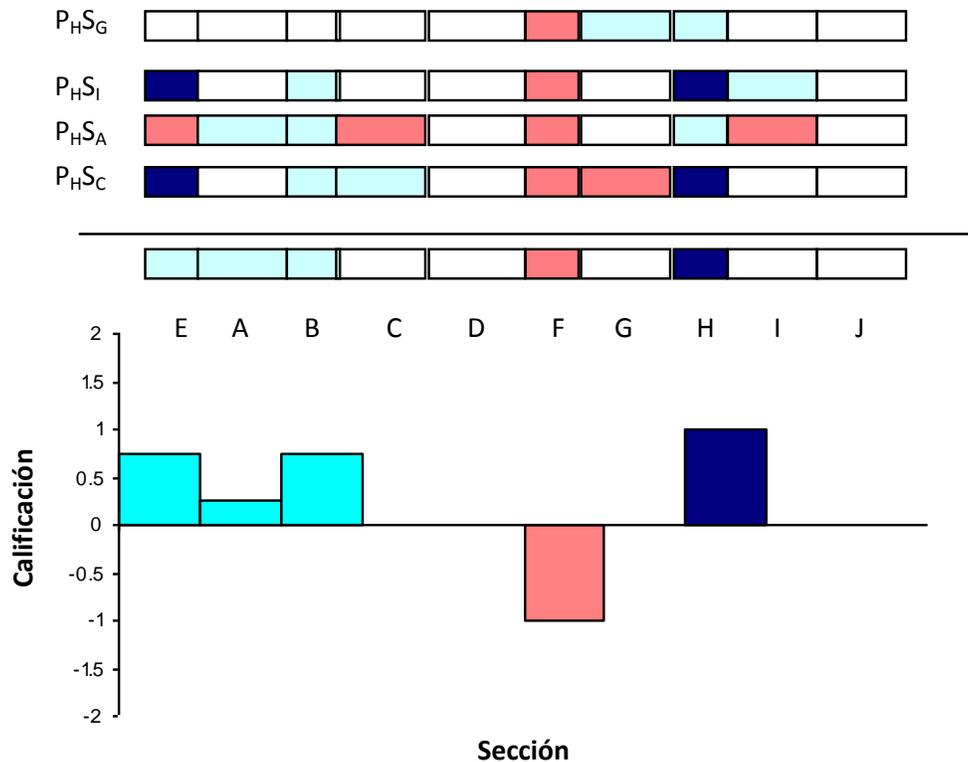


Figura 4.23 Calificaciones asignadas por el método automático a las secciones del modelo H

Ambos procedimientos de evaluación, el manual y el automático, concluyen que la región con mayor probabilidad de tener daño es la región F; adicionalmente, cuando se analiza con el método automático se observa que las regiones D y J no tienen información, como resultado de la distancia que hay entre la posición de impacto, el lugar de los sensores y la posición del daño. Con el método visual se pueden descartar las secciones D y J, debido a que se pueden ver datos por encima de la línea de referencia en los gráficos P_{HS_I} y P_{HS_C} . La región que tiene mayor sensibilidad es la región H, lo cual es normal debido a que fue en esta región donde se excitó la estructura.

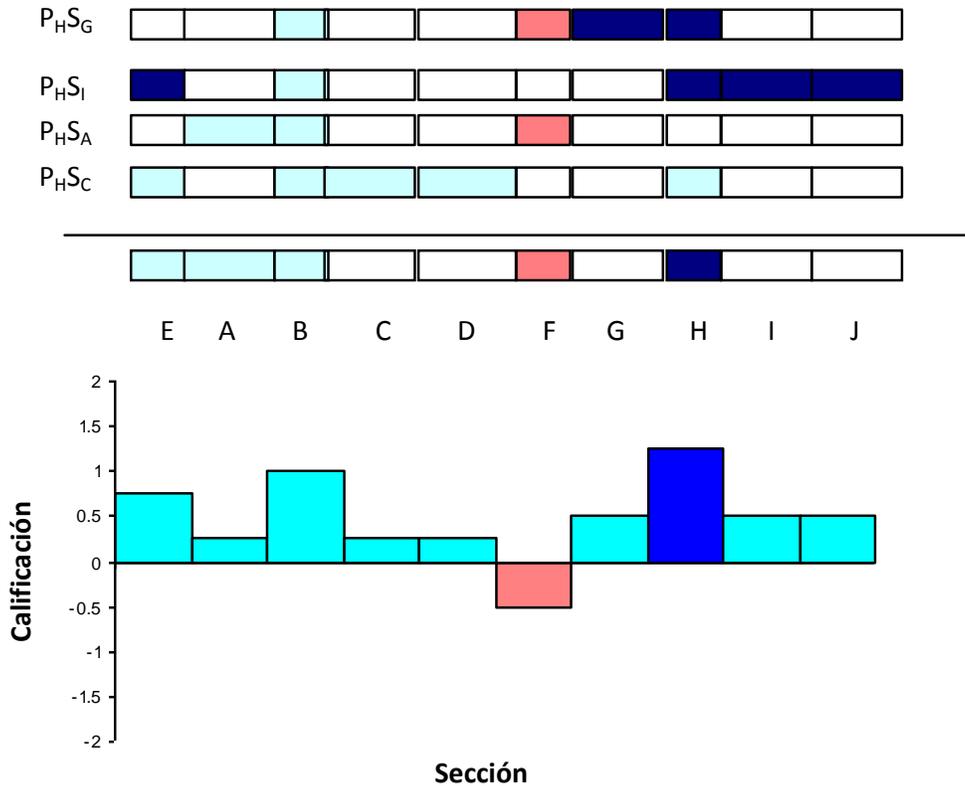


Figura 4.24 Calificaciones asignadas por el método manual-visual a las secciones del modelo H

Con el objetivo de extraer más información y analizar el comportamiento de los gráficos de errores utilizando datos experimentales, se realizó la evaluación de los gráficos utilizando un espesor de 0,02286 m (0,9 in), el resultado de la evaluación se puede ver en las figura 4.25 para el método automático y en la figura 4.26 para el método visual manual.

El método automático, figura 4.25, concluye que la región que presenta mayor probabilidad de daño es la sección F, en contraparte, el método visual no puede concluir categóricamente que el daño se encuentre en F; la evaluación por este último método indica que todas las secciones están libres de daño, a excepción de las regiones E y F que quedan indeterminadas. Lo anterior sugiere que es mejor calificar las secciones utilizando el método automático, en vez de analizar los gráficos de nueva cuenta con otro valor de espesor o realizar una nueva prueba excitando la estructura en E o en F para aumentar la sensibilidad de estas regiones. De los resultados del método automático (figura 4.25) y del cambio en el espesor (figuras 4.23 y 4.24), se puede concluir terminantemente que la región que tiene la mayor probabilidad de tener el daño es la región F.

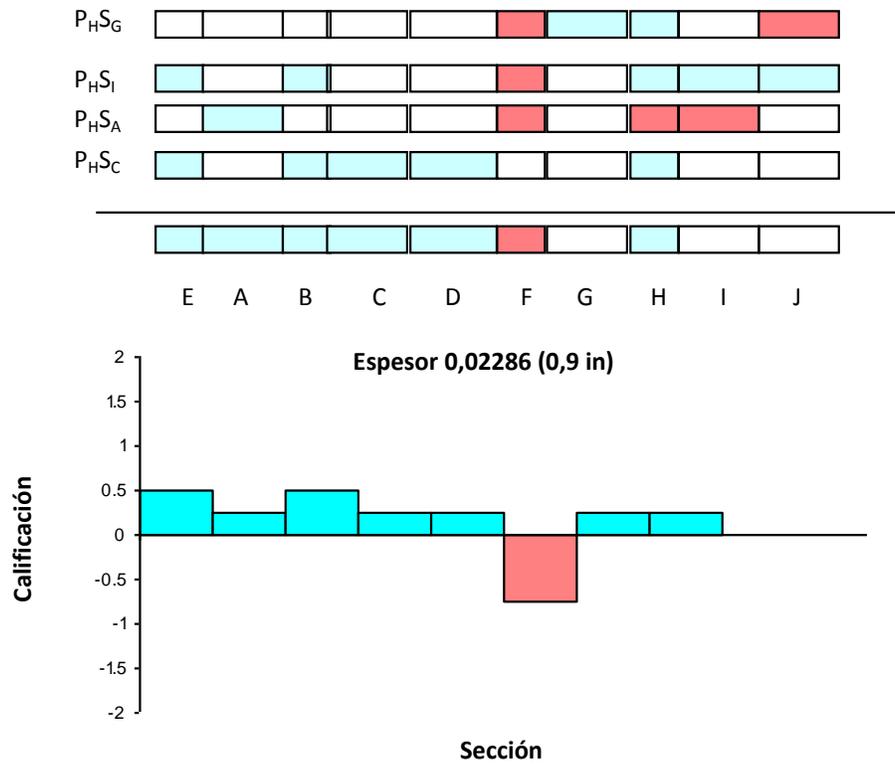


Figura 4.25 Calificaciones asignadas por el método automático a las secciones del modelo H utilizando un espesor de 0,002286 (0,9 in)

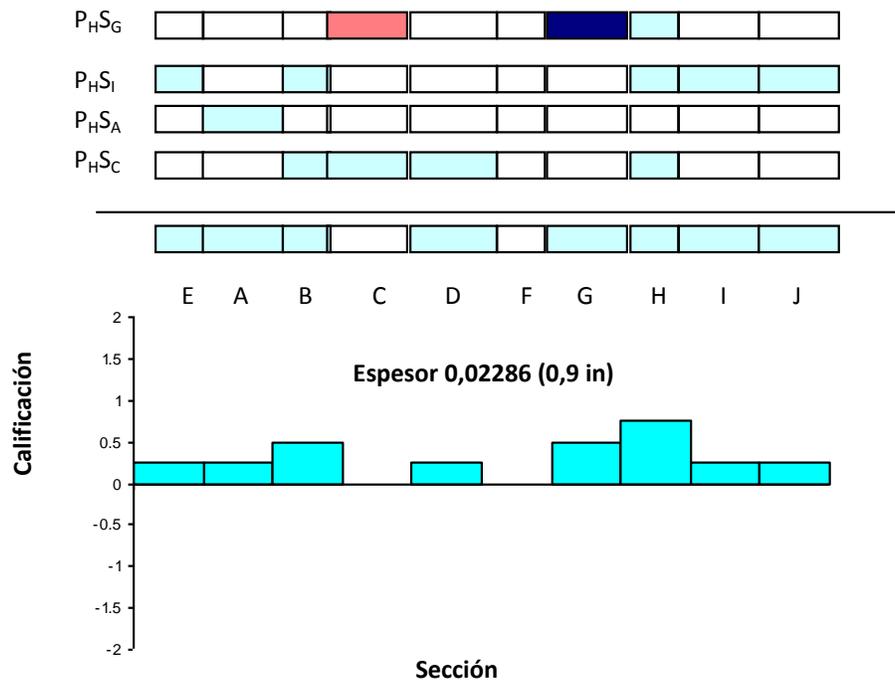


Figura 4.26 Calificaciones asignadas por el método manual a las secciones del modelo H utilizando un espesor de 0,002286 (0,9 in)

4.2.4 Evaluación de la sección con daño

El siguiente paso fue calificar cada uno de los elementos dentro de la sección F para identificar aquellos que presentaran la mayor probabilidad de tener el daño. En la figura 4.27 se muestra la calificación para los cuatro gráficos de errores para cada uno de los elementos de la sección F, usando un valor de espesor de 0,0381 m (1,5 in).

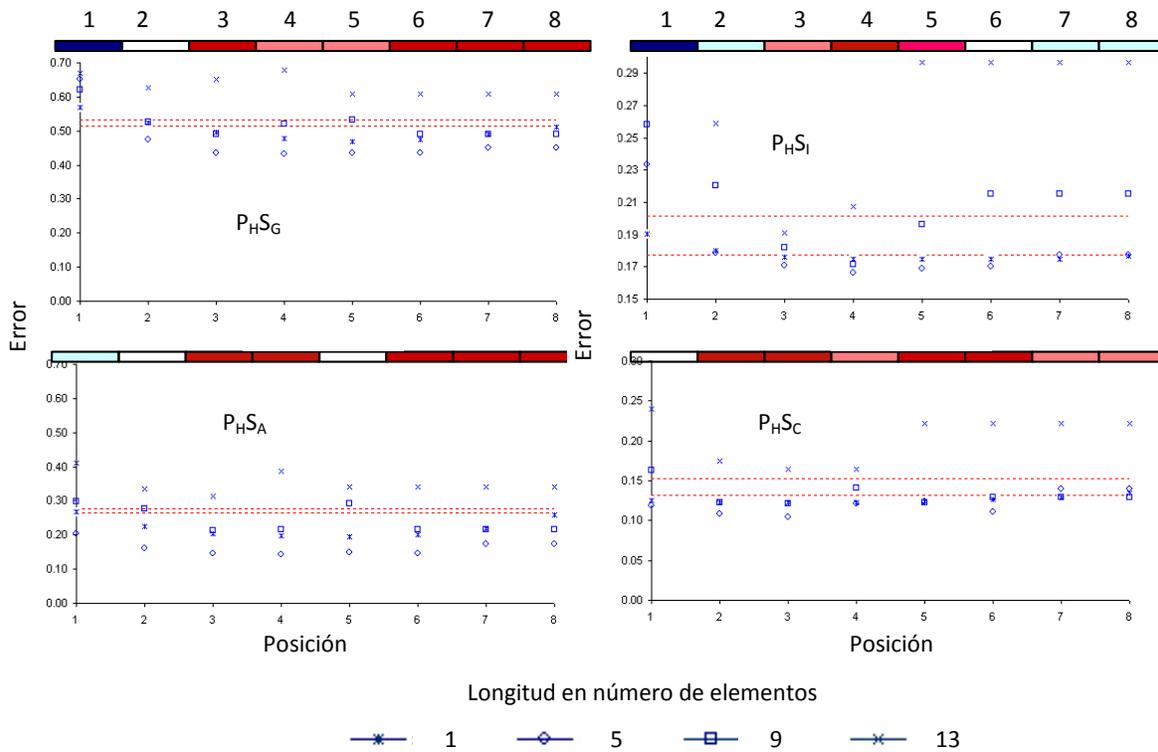


Figura 4.27 Gráficos de error para la sección F, usando un espesor constante de 0,0381 m (1,5 in)

Como se puede ver en la figura 4.27, se realizó un cambio en el valor máximo y mínimo de las escalas para evaluar las posiciones más fácilmente. Con el cambio efectuado es sencillo visualizar el valor del error para cada una de las magnitudes del daño y evaluar las posiciones, las cuales son mostradas en la figura 4.28. De esta última figura se observa que las posiciones con mayor probabilidad de daño son las que corresponden a las posiciones 3 y 4. La posición 3 se relaciona con el elemento 9, mientras que la 4 con el elemento 13. Las barras de aluminio fueron colocadas en el modelo H de tal forma que el daño comenzara en el elemento 12, por lo que se puede concluir que la aproximación del MBG es aceptable con respecto al valor real.

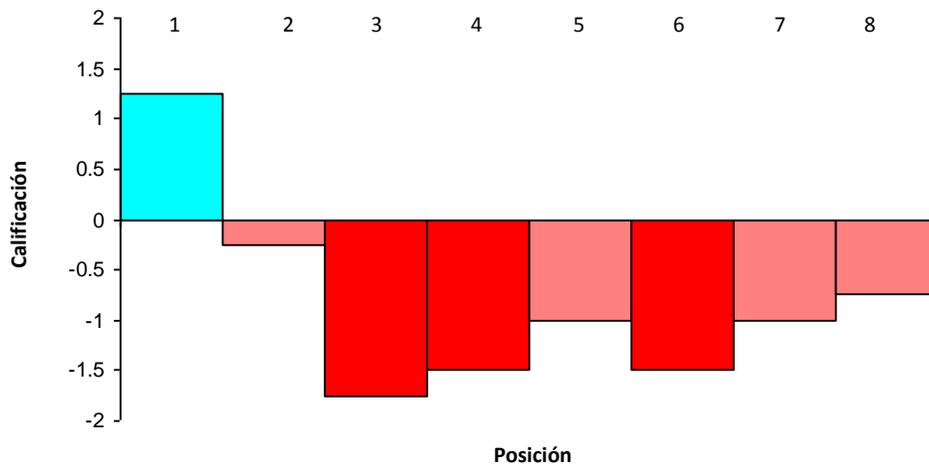


Figura 4.28 Evaluación de los elementos de la sección F, para un espesor de 0,0381 m (1,5 in)

Conociendo el elemento donde es posible que comience el daño, se graficaron los valores de la función de error para este elemento, dejando libres la magnitud, tamaño y el espesor, pérdida o ganancia en la sección transversal. En la figura 4.29 se puede ver los gráficos de errores y en la tabla 4.2 se pueden ver estos valores.

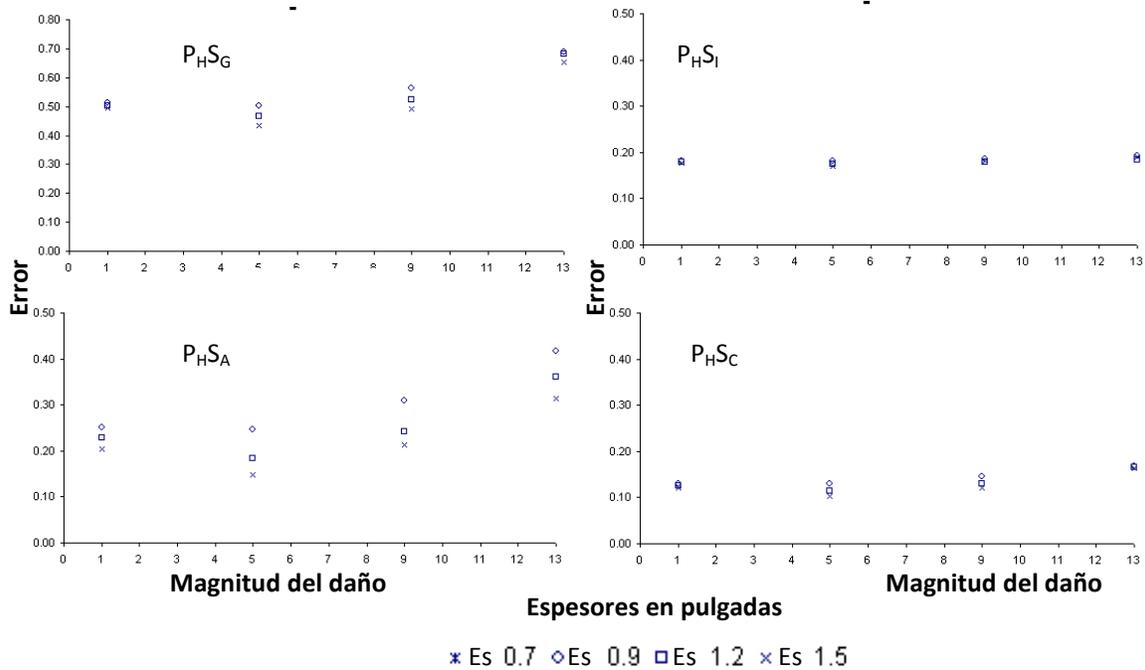


Figura 4.29 Valores de la función de error en la posición 3, para diferentes espesores y magnitudes de daño

Tabla 4.2 Espesores y magnitudes de daño asociados a el elemento 9 que minimizan la función de error

Elemento 9		
Prueba	Magnitud del daño (número de elementos dañados)	Espesor (m)
P _H S _G	5	0,0381 (1,5 in)
P _H S _I	5	0,0381 (1,5 in)
P _H S _A	5	0,0381 (1,5 in)
P _H S _C	5	0,0381 (1,5 in)

De la tabla 4.2 se puede concluir que los valores que minimizan la función de error son la magnitud de daño con 5 elementos, es decir 0,03175 m (1,25 in), y un espesor de 0,0381 (1,5 in), que representa un aumento de 0,0254 m (1,0 in) respecto al valor sin colocar las barras de aluminio.

4.2.5 Resultados finales

De acuerdo con el análisis realizado por el MBG, se determina que el daño comienza en la posición 9, con una extensión de 5 elementos y con un espesor de 0,0381 (1,5 in). Si se comparan estos resultados con los del daño real, que comienza en la posición 12, con una extensión de 8 elementos y un espesor de 0,02794 m (1,1 in), los datos obtenidos por el MBG representan una buena aproximación de los datos reales. Cabe recordar que el primer objetivo del MBG es localizar el daño en la estructura y, posteriormente, caracterizar el daño.

5 Conclusiones

De este estudio se concluye que el MBG es una herramienta que tiene el potencial para localizar e identificar el daño en estructuras, utilizando instrumentación restringida y con un mínimo de pruebas experimentales. La clave de la efectividad de este método es contar con un modelo de EF calibrado a un nivel que represente, en forma adecuada, el comportamiento dinámico real de la estructura y que pueda servir para comparar los resultados experimentales con la estructura real con el modelo de EF. En la medida en que el modelo de EF represente mejor a la estructural real, aumenta la sensibilidad del MBG para detectar los cambios en los parámetros estructurales. Por lo tanto, para lograr este objetivo es necesario calibrar y corroborar que el modelo de EF representa el sistema real antes de que el daño ocurra en la estructura.

Una ventaja del MBG es que puede aplicarse a toda una estructura de manera global o en secciones específicas en las cuales existe la sospecha de que hay la presencia de daño. Por la flexibilidad que se obtiene del MEF, el MBG puede aplicarse a cualquier tipo de estructura y materiales, no importando que el problema sea lineal o no lineal, siempre y cuando el modelo de elemento finito pueda simular y representar adecuadamente el comportamiento estructural dentro de las condiciones específicas de prueba, sobre todo en los problemas no lineales.

En esta investigación se encontró que es posible aplicar varios tipos de pruebas dinámicas en las estructuras, dentro de las cuales la mejor es la identificada como del tipo 1 por las ventajas que presenta en tiempo y procesamiento de datos; aunque las otras pruebas pueden implementarse ante la falta de instrumentación o cuando sea necesario verificar en forma local algunas de las secciones donde pueda existir duda de la presencia de daño.

El objetivo principal de esta investigación fue la localización de daño, ya que una vez determinado el lugar de éste, existen otros esquemas de detección que pueden emplearse para determinar de manera más precisa los parámetros de interés y, por lo tanto, tener una mejor evaluación del daño o deterioro en la estructura.

En lo que respecta a mejorar la eficiencia del MBG, se recomienda incorporar al programa la opción de almacenar las funciones de respuesta en el dominio de la frecuencia. Otra alternativa para optimizar su eficiencia es el uso de múltiples procesadores en paralelo manejados por un solo servidor, lo cual se realizó durante la investigación pero no de manera automática.

Como trabajo futuro se propone combinar el esquema de identificación de la fuerza, descrita en el capítulo 2, con el MBG y así evitar la necesidad de tener un

transductor de fuerza instrumentado en la estructura. Esto último, abre una amplia gama de nuevas pruebas en las cuales la estructura puede ser auto-excitada, como es el ejemplo de un puente ante el paso vehicular o de algún objeto que se impactara contra la estructura.

Bibliografía

Adams, R.A. and Doyle, J.F., *Force Identification in Complex Structures*, Recent Advances in Structural Dynamics, Southampton, pp. 225-236, 2000.

Adams, R.A. and Doyle, J.F., *Multiple Force Identification for Complex Structures*, Experimental Mechanics, 42(1), pp. 25-36, 2002.

Adams, R.A., *Force Identification in Complex Structures*, M.S. Thesis, Purdue University, 1999.

Aktan, A. E., and Grimmelsman, K.A., *The Role of NDE in Bridge Health Monitoring*, Proceedings of the SPIE Conference on Nondestructive Evaluation of Bridges and Highways II, SPIE 3587, Newport Beach, California, 1999.

Aktan, A. E., Helmicki, A.J., and Hunt, V.J., *Issues in Health Monitoring for Intelligent Infrastructure*, Journal of Smart Materials and Structures, 7(5), pp. 674-692, 1998.

Alifanov, O. M., *Methods of Solving Ill-Posed Inverse Problems*, Journal of Engineering Physics, 45(5), pp. 1237-1245, 1983.

Bathe, K.J., *Finite Element Procedures in Engineering Analysis*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1982, 2/E 1995.

Busby, H.R. and Trujillo, D.M., *Solutions of an Inverse Dynamic Problem using an Eigenvalue Reduction Technique*, Computer & Structures, 25(1), pp. 109-117, 1987.

Chandrupatla, T.R and Belegundu, A.D., *Introduction to Finite Elements in Engineering*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1991, 3/E 2002.

Cho, S-M., *Sub-Domain Inverse Method for Dynamic Crack Propagation Problems*, M.S. Thesis, Purdue University, December, 2000.

Cook, R.D., Malkus, D.S and Plesha, M.E., *Concepts and Applications of Finite Element Analysis*, 3/E, Wiley & Sons, New York, 1989.

Dally, J.W and Riley, W.F., *Experimental Stress Analysis*, E/3, McGraw-Hill, New York, 1991.

Danial, A.N. and Doyle, J.F., *A Massively Parallel Implementation of the Spectral Element Method for Impact Problems in Plate Structures*, Computing Systems in Engineering, 5, pp. 375-388, 1994.

Doyle, J.F., *A Wavelet Deconvolution Method for Impact Force Identification*, Experimental Mechanics, 37, pp. 404-408, 1997.

Doyle, J.F., *Force Identification from Dynamic responses of Bi-Material Beam*, Experimental Mechanics, 33, pp. 64-69, 1993.

Doyle, J.F., *Impact and Longitudinal Wave Propagation*, Experimental Techniques, 27, pp. 29-31, 1988.

Doyle, J.F., *Modern Experimental Stress Analysis*: Wiley and Sons, New York, 2004.

Doyle, J.F., *Nonlinear Analysis of Thin-walled Structures: Statics, Dynamics, and Stability*, Springer-Verlag, New York, 2001.

Doyle, J.F., *Static and Dynamic Analysis of Structures*, Kulwer, The Netherlands, 1991.

Doyle, J.F., *Wave Propagation in Structures*, 2/E. Springer-Verlag, New York, 1997.

Farrar, C.R., and Jauregui, D.A., *Comparative Study of Damage Identification Algorithms Applied to Bridge: I. Experiment*, Journal of Smart Materials and Structures, 7, pp. 708-719, 1998.

Farrar, C.R., and Jauregui, D.A., *Comparative Study of Damage Identification Algorithms Applied to Bridge: I. Experiment*, Journal of Smart Materials and Structures, 7, pp. 729-731, 1998.

Friswell, M.I. and Mottershead, J.E., *Finite Element Model Updating in Structural Dynamic*, Kluwer, The Netherlands, 1995.

Hollandsworth, P.E. and Busby, H.R. ., *Impact Force Identification using the General Inverse Technique*, International Journal of Impact Engineering, 8, pp. 315-322, 1996.

Kaouck, M. and Zimmerman, D.C., *Structural Damage Assessment Using a Generalized Minimum Rank Perturbation Theory*, AIAA Journal, 32(4), pp. 836-842, 1994.

Martin, M.T. and Doyle, J.F., *Impact Force Identification from Wave Propagation Responses*, International Journal of Impact Engineering, 18, pp. 65-77, 1989.

Pines, D.J. and Lovell, P.A., *Conceptual Framework of a Remote Wireless Health Monitoring System for Large Civil Structures*, Journal of Smart Materials and Structures, 7(5), pp. 627-636, 1998.

Rizzi, S.A. and Doyle, J.F., *A Spectral Approach to Wave Propagation in Layered Solids*, Ph.D. Thesis, Purdue University, 1989.

Stevens, K.K., *Force Identification Problems: An Overview*, Proceedings of SEM Spring Meeting, Houston, pp. 838-844, 1987

CIUDAD DE MÉXICO

Av. Nuevo León 210
Col. Hipódromo Condesa
CP 06100, México, D F
Tel +52 (55) 52 653600
Fax +52 (55) 52 653600

SAN FANDILA

Carretera Querétaro-Galindo km 12+000
CP 76700, Sanfandila
Pedro Escobedo, Querétaro, México
Tel +52 (442) 216 9777
Fax +52 (442) 216 9671



**INSTITUTO
MEXICANO DE
TRANSPORTE**



www.imt.mx
publicaciones@imt.mx