

Identificación del daño en vigas simplemente apoyadas usando datos dinámicos

Francisco Garcés, Carlos Genatios, Pedro García, Marianela Lafuente y Wiliam Ascanio

Instituto de Materiales y Modelos Estructurales (IMME)
Facultad de Ingeniería, Universidad Central (Venezuela), IMME-UCV
Apto Postal 50.361, Caracas 1050-A. Venezuela
Tel.: 58 212 605 31 44; Fax: 58 212 605 31 35
e-mail: francisco.garces@ucv.ve

Resumen

En este trabajo se propone una metodología de estimación del daño o cambio de la rigidez a flexión de vigas simplemente apoyadas, a partir de un modelo inicial y de un análisis dinámico experimental. Para aplicar la metodología se requiere la previa determinación de dos frecuencias modales, con sus respectivas formas modales y de la matriz de masa del sistema. En primer lugar, se presenta el desarrollo matemático de la metodología de estimación de la rigidez. Se realiza una simulación numérica de un puente real con el fin de estudiar la efectividad de la metodología de estimación del daño, bajo diferentes condiciones de ruido. Se realiza un ensayo dinámico experimental a una viga de acero, la cual sufre un daño progresivo en cada uno de sus tramos. Los resultados obtenidos de la aplicación de estas metodologías son satisfactorias para el caso experimental y numérico, lográndose identificar los cambios de rigidez con bastante precisión.

Palabras clave: *Análisis Modal, identificación del daño, puentes, ensayos dinámicos.*

DAMAGE ESTIMATION IN SIMPLY-SUPPORTED BEAMS USING VIBRATORY DATA

Summary

This article presents a method of estimating the location and severity of damage in simply supported beams, based on experimental measurements of their fundamental vibration modes. In this context, damage is defined as a change in the stiffness of a section. Before this methodology can be applied, it is necessary to determine two modal frequencies of the system along with their respective shapes. The mass matrix of the system must also be known. To study the accuracy of damage identification under noisy conditions, we conducted numerical simulations of a real bridge. A simply supported, wide-flanged steel beam is also tested under a sequence of progressively damaged conditions. The results obtained are satisfactory in both numerical and experimental tests; the method succeeds in precisely locating and quantifying stiffness changes in the system.

Keywords: *Modal analysis, damage identification, bridge, dynamic test.*

INTRODUCCIÓN

Toda estructura puede sufrir cambios en su rigidez inicial como resultado de las acciones de carácter permanente o eventual a la cual sea sometida la misma. Es conveniente poseer herramientas que permitan conocer la localización y magnitud de estos cambios, con el fin de establecer las condiciones de servicio de la estructura, o el estado de esta después de la ocurrencia de un sismo. Los daños en los elementos estructurales no son siempre visibles, ya sea por el grado del daño, o la dificultad del acceso a los elementos de la estructura, como en el caso de las vigas de los puentes. De ahí la necesidad de disponer de metodologías de evaluación estructural, que mediante la evaluación dinámica en algunos puntos de la estructura en conjunto con el modelaje estructural logre la estimación de la rigidez del sistema.

Los puentes son estructuras de vital importancia en la civilización moderna, el deterioro o eventual colapso de estas estructuras podría limitar de manera importante la actividad social y económica de una región o ciudad¹. Por ello el estudio de las condiciones de servicio, así como la vulnerabilidad de los puentes es un tema bastante tratado en la literatura científica². Durante sus años de servicio un puente puede sufrir daños por excesos en la carga vehicular³, impactos, corrosión, sismos moderados u otro tipo de daños. También habría que añadir que en la actualidad algunas de estas estructuras construidas hace algunas décadas se encuentran vulnerables a la vista de los nuevos códigos. Encontramos puentes con diversas tipologías, con pocos o muchos tramos. El caso de interés en este trabajo esta referido a los puentes que cuentan con tableros simplemente apoyados, bastante utilizados para el paso vehicular, peatonal y trenes^{4,5,6}. Una estadística del National Bridge Inventory (NBI) muestra que del total de puentes compuestos de vigas de acero, un tercio son simplemente apoyados⁷. En vista de lo anterior, este trabajo propone un método para la estimación de la rigidez a flexión de vigas simplemente apoyadas que pretende ser aplicado al estudio de puentes.

En el diagnóstico de la pérdida de rigidez se pueden diferenciar tres tipos de problemas: 1) establecer si hay daño o no, 2) localización de la zona dañada, 3) cuantificación de la magnitud del daño.

La ocurrencia de un daño produce cambios en los parámetros dinámicos de una estructura, ya sea en las frecuencias de vibración, formas modales, porcentaje de amortiguamiento crítico o energía elástica (strain energy) de la misma. La evaluación dinámica experimental y la obtención de las propiedades dinámicas de la estructura, permiten determinar si hay cambios en dichos parámetros dinámicos y a través de ésta si hay daño o no en la estructura^{8,9}. La evaluación de las frecuencias de vibración modal, así como el estudio de cambios en la curvatura de las formas modales¹⁰ y el establecimiento de índices de correlación de estas formas —como el índice MAC¹¹, COMAC¹², entre otros—, nos permiten también resolver esta primera etapa¹³.

Otras metodologías de estimación estructural utilizan las mediciones de frecuencias y modos de vibración en condiciones sin daño y luego con daño para establecer los cambios en la masa y rigidez de los sistemas en estudio. La inspección de los cambios en las matrices de flexibilidad construidas a partir de las formas modales, tratan de establecer si hubo o no cambio en la rigidez del sistema¹⁴. Otros métodos utilizan la optimización matricial no paramétrica^{15,16}, para determinar la matriz de rigidez a partir de los modos de vibración y frecuencias medidas. De igual manera se encuentran algoritmos que utilizando la optimización incorporan los parámetros de Markov, a fin de establecer el daño en los miembros estructurales¹⁷. Se cuentan con desarrollos probabilísticas¹⁸ que tomando en cuenta los cambios en las propiedades modales y aplicando funciones de densidad probabilística (probability density functions) estiman la pérdida de rigidez. Otros métodos de detección del daño, se basan en una previa modelización de la estructura mediante elementos finitos, jun-

to a la información modal proveniente del ensayo para estimar los cambios estructurales en cada elemento discretizado^{19,20,21}. En general estos métodos son aplicados a cualquier tipo de estructuras, pudiéndose detallar de manera local el daño en la estructura, no obstante se requiere de varias formas modales, las cuales han de incluir todas las coordenadas consideradas en el modelo de elementos finitos. Por lo que, la obtención de resultados confiables, implica la medición de frecuencias y modos de vibración rotacionales, en muchos casos de difícil obtención.

Por otro lado, se tienen algoritmos para la cuantificación y localización del daño para determinadas tipologías estructurales, cantilever, pórticos, entre otras²². El conocimiento de la tipología de la matriz de rigidez o flexibilidad permite reducir el número de formas modales y coordenadas necesarias para la estimación estructural y en general permite considerar menos puntos de medición en las estructuras. En este tipo de métodos se inscribe la metodología desarrollada en el presente trabajo, teniendo como objetivo proponer y demostrar la eficacia de un método que permite determinar la rigidez a flexión en vigas simplemente apoyadas, con la utilización de apenas dos formas modales y sus correspondientes frecuencias. La metodología aprovecha el conocimiento de la forma de las matrices características de las vigas simplemente apoyadas, simplificando el procedimiento de identificación.

El algoritmo presentado tiene la ventaja de requerir el conocimiento de solamente dos formas modales verticales con sus respectivas frecuencias, (prescindiendo de medición de coordenadas rotacionales, generalmente de difícil obtención). Lo anterior establece la metodología propuesta como una herramienta para la pronta decisión sobre el futuro de este tipo de estructuras de amplio uso con un mínimo de información experimental, reduciendo sustancialmente el costo de extensos y específicos ensayos. En lo siguiente se presenta el desarrollo matemático de la metodología de identificación, que luego es aplicada en la localización de los cambios de rigidez de un puente simulado numéricamente y una viga de acero de sección I, previamente estudiada a partir de ensayos de vibración libre. Los resultados obtenidos muestran que el daño fue adecuadamente identificado y localizado con la metodología propuesta, con una bastante precisión.

ESTIMACIÓN DE LA RIGIDEZ DE VIGAS SIMPLEMENTE APOYADAS

A continuación, se describen un algoritmo para la identificación de la rigidez de vigas simplemente apoyadas. Para la aplicación de este método, es necesario disponer de un análisis experimental previo del cual se conozca al menos dos frecuencias de vibración y sus respectivas formas modales, además de la matriz de masa del sistema. Se presenta brevemente la descripción del método así como las expresiones derivadas de su formulación.

Los parámetros dinámicos de la estructura de la Figura 1 podrían ser determinados a partir de la ecuación de equilibrio dinámico del sistema estructural²²:

$$(\lambda_i^{-1} - F.M)\phi_i = 0 \quad (1)$$

donde: F =matriz de flexibilidad del sistema, M = Matriz de masa, $\lambda_i = \omega_i^2$, ϕ_i = vector propio "i" y ω_i = frecuencia propia "i".

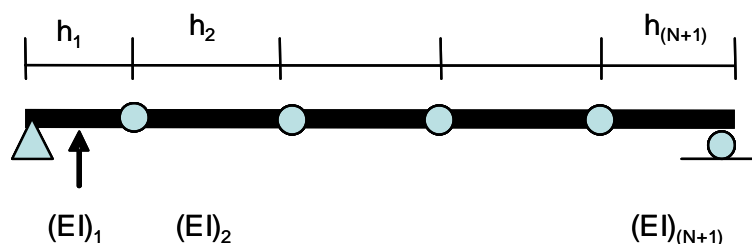


Figura 1. Viga simplemente apoyada

Sustituyendo las marices F y M en la ecuación (1) y desarrollando cada ecuación algebraicamente para las frecuencias de vibración ω_a y ω_b y los valores modales ϕ_a y ϕ_b , se obtiene el siguiente sistema:

$$\begin{aligned}
 (f_{11}m_{11} + \dots + f_{1N}m_{N1})\phi_a^1 + \dots + (f_{11}m_{1N} + \dots + f_{1N}m_{NN})\phi_a^N &= \phi_a^1/\omega_a^2 \\
 (f_{11}m_{11} + \dots + f_{1N}m_{N1})\phi_b^1 + \dots + (f_{11}m_{1N} + \dots + f_{1N}m_{NN})\phi_b^N &= \phi_b^1/\omega_b^2 \\
 &\vdots \\
 (f_{N1}m_{11} + \dots + f_{NN}m_{N1})\phi_a^1 + \dots + (f_{N1}m_{1N} + \dots + f_{NN}m_{NN})\phi_a^N &= \phi_a^N/\omega_a^2 \\
 (f_{N1}m_{11} + \dots + f_{NN}m_{N1})\phi_b^1 + \dots + (f_{N1}m_{1N} + \dots + f_{NN}m_{NN})\phi_b^N &= \phi_b^N/\omega_b^2
 \end{aligned} \tag{2}$$

Para la estructura de la Figura 1, puede obtenerse cada término de la matriz de flexibilidad según las siguientes expresiones:

$$F(i, j) = a(j)\tau_{ab}(i) - \tau_{bc}(i, j)$$

$$a(j) = \sum_{l=j+1}^{N+1} h_l / \sum_{l=1}^{N+1} h_l \quad j = 1, \dots, N \tag{3}$$

$$\begin{aligned}
 \tau_{ab}(i) &= \left[\sum_{l=1}^i \frac{h_l^2}{2(EI)_l} \frac{\sum_{k=i+1}^{N+1} h_k}{\sum_{k=1}^{N+1} h_k} \left(\frac{2h_l}{3} + \sum_{k=1}^{l-1} h_k \right) \right] + \left[\sum_{l=2}^i \frac{h_l}{(EI)_l} \frac{\sum_{k=i+1}^{N+1} h_k}{\sum_{k=1}^{N+1} h_k} \left(\sum_{k=1}^{l-1} h_k \right) \left(\frac{h_l}{2} + \sum_{k=1}^{l-1} h_k \right) \right] + \\
 &\quad \left[\sum_{l=i+1}^{N+1} \frac{h_l^2}{2(EI)_l} \frac{\sum_{k=1}^i h_k}{\sum_{k=1}^{N+1} h_k} \left(\frac{h_l}{3} + \sum_{k=1}^{l-1} h_k \right) \right] + \left[\sum_{l=i+1}^n \frac{h_l}{(EI)_l} \frac{\sum_{k=1}^i h_k}{\sum_{k=1}^{N+1} h_k} \left(\frac{h_l}{2} + \sum_{k=1}^{l-1} h_k \right) \left(\sum_{k=l+1}^{N+1} h_k \right) \right] \quad i = 1, \dots, N \\
 \tau_{bc}(i, j) &= \left[\sum_{l=j+1}^{n+1} \frac{h_l^2}{2(EI)_l} \frac{\sum_{k=1}^i h_k}{\sum_{k=1}^{N+1} h_k} \left(\sum_{k=j+1}^{l-1} h_k + \frac{h_k}{3} \right) \right] + \left[\sum_{l=j+1}^N \frac{h_l}{(EI)_l} \frac{\sum_{k=1}^i h_k}{\sum_{k=1}^{N+1} h_k} \left(\left(\sum_{k=j+1}^{l-1} h_k + \frac{h_l}{2} \right) \left(\sum_{k=l+1}^{N+1} h_k \right) \right) \right] \quad \begin{matrix} i = 1, \dots, N \\ j = 1, \dots, N \end{matrix}
 \end{aligned}$$

siendo, h_i : longitud del tramo de la viga, E_i : módulo de elasticidad del tramo i , I_i : inercia del tramo i , N : número de coordenadas de medición en la viga.

Se toman $(N + 1)$ ecuaciones del sistema 2 y se sustituyen en el los términos de la matriz de flexibilidad presentados en la expresión (3), luego se reescriben las ecuaciones en forma de un sistema lineal con cada (EI) como incógnita, llegando a la siguiente expresión:

$$A = \begin{bmatrix} a_{1,1}^a & a_{1,2}^a & \dots & \dots & a_{1,N+1}^a \\ \vdots & \vdots & \dots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \dots & \dots & \vdots \\ a_{N,1}^a & a_{N,2}^a & \dots & \dots & a_{N,N+1}^a \\ a_{N+1,1}^b & a_{N+1,2}^b & \dots & \dots & a_{N+1,N+1}^b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{(EI)_1} \\ \vdots \\ \frac{1}{(EI)_N} \\ \frac{1}{(EI)_{N+1}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\omega_a^2} \phi_a^1 \\ \vdots \\ \frac{1}{\omega_a^2} \phi_a^N \\ \frac{1}{\omega_b^2} \phi_b^1 \\ \vdots \\ \frac{1}{\omega_b^2} \phi_b^N \end{bmatrix} \tag{4}$$

La ecuación anterior permite establecer un sistema de $(N + 1)$ ecuaciones con $(N + 1)$ incógnitas, debido a que existen $(N + 1)$ coeficientes de rigidez desconocidos (EI) . Se deben disponer de dos formas modales, de manera de obtener $(N + 1)$ ecuaciones. La siguiente notación es usada para los vectores modales:

$$\phi_a = \{ \phi_a^1 \quad \dots \quad \phi_a^i \quad \dots \quad \phi_a^N \}^t \text{ y } \phi_b = \{ \phi_b^1 \quad \dots \quad \phi_b^i \quad \dots \quad \phi_b^N \}^t \tag{5}$$

Los coeficientes del sistema (4) son los siguientes:

$$\begin{aligned}
 A_1(i, j) &= \frac{h_j}{L_t} \left(\sum_{l=i+1}^{N+1} h_l \right) \left\{ \left[\left(\sum_{k=1}^{j-1} h_k \right) \left(\left(\frac{h_j}{2} + \sum_{k=1}^{j-1} h_k \right) \gamma \right) - \left(\sum_{k=1}^{j-1} \left(\frac{h_j}{2} + \sum_{k=l+1}^{j-1} h_k \right) \alpha \right) \right] - \left(\sum_{k=1}^{j-1} \left(\frac{2h_j}{3} + \sum_{k=l+1}^{j-1} h_k \right) \alpha \right) \right\} \\
 i &= 2.., N \quad j = 2.., i \\
 \\
 A_2(i, j) &= \frac{h_j}{L_t} \left(\sum_{l=1}^i h_l \right) \left(\sum_{l=j+1}^{N+1} h_l \right) \left\{ \left(\left(\frac{h_j}{2} + \sum_{k=1}^{j-1} h_k \right) \gamma \right) - \left(\sum_{k=1}^{j-1} \left(\frac{h_j}{2} + \sum_{k=l+1}^{j-1} h_k \right) \alpha \right) \right\} \\
 i &= 1.., N-1 \quad j = i+1.., N \\
 \\
 A_3(i, j) &= \frac{h_j^2}{2L_t} \left(\sum_{l=1}^i h_l \right) \left[\left(\frac{h_j}{3} + \sum_{k=1}^{j-1} h_k \right) \gamma - \sum_{l=1}^{j-1} \left(\frac{h_j}{3} + \sum_{k=l+1}^{j-1} h_k \right) \alpha \right] \\
 i &= 1.., N \quad j = i+1.., N+1 \\
 \\
 A_4(i, j) &= \left(\frac{h_j^2}{2L_t} \left(\sum_{l=i+1}^{N+1} h_l \right) \right) \left(\frac{2h_j}{3} + \sum_{k=1}^{j-1} h_k \right) \gamma \\
 i &= 1.., N \quad j = 1.., i \\
 \\
 \alpha &= \sum_{k=1}^N m_{lk} \phi_a^k \quad \gamma = \sum_{l=1}^N \sum_{k=1}^N \left(\sum_{u=k+1}^{N+1} h_u / L_t \right) m_{lk} \phi_a^k \quad L_t = \sum_{l=1}^{N+1} h_l
 \end{aligned} \tag{6}$$

Siendo la matriz A ,

$$A(i, j) = A_1(i, j) + A_2(i, j) + A_3(i, j) + A_4(i, j)$$

Donde l_i : longitud del tramo i , m_{lk} : término lk de la matriz de masa, ϕ_a^k : coordenada k del modo a , y ω_a : frecuencia a del sistema.

En definitiva se tiene un sistema de la forma

$$[A](x) = (c) \tag{7}$$

Para la ecuación anterior x es el vector que contiene los valores incógnitas EI_i . La resolución del sistema, dará como resultado los valores EI de cada tramo de la viga.

ESTUDIO NUMÉRICO

A fin de evaluar la influencia que tienen los errores e incertidumbres experimentales en la calidad de la identificación del daño en vigas simplemente apoyadas, se realizó un estudio numérico al caso de un puente real presentado en la referencia⁷. Se identifica el cambio de rigidez en distintas secciones del puente, con diferentes niveles de ruido en los datos modales.

Modelo numérico

En la Figura 2 se presenta las características geométricas del puente utilizado para este estudio. El puente posee tres tramos simplemente apoyados; los dos extremos de 12.2 m y el central de 24.4 m., siendo la longitud total del mismo de 48.8 m. La sección transversal del puente esta constituida por 8 vigas de acero que soportan la calzada de la vía, el ancho total de la sección es de 15 m (Figura 2).

La simulación del tablero del puente fue hecha utilizando el programa SAP2000²³, el cual suministra los parámetros dinámicos del modelo. Se considera un comportamiento lineal de la sección del tablero del puente, asumiendo una sección transversal equivalente con un

módulo de elasticidad de 200 Gpa⁷. Las propiedades equivalente de la sección transversal del tablero del puente se presentan en la Tabla I⁷.

La sección transversal del cada tramo fue dividida en 8 partes, con lo cual se obtienen 7 coordenadas modales para cada modo de vibración (Figura 3).

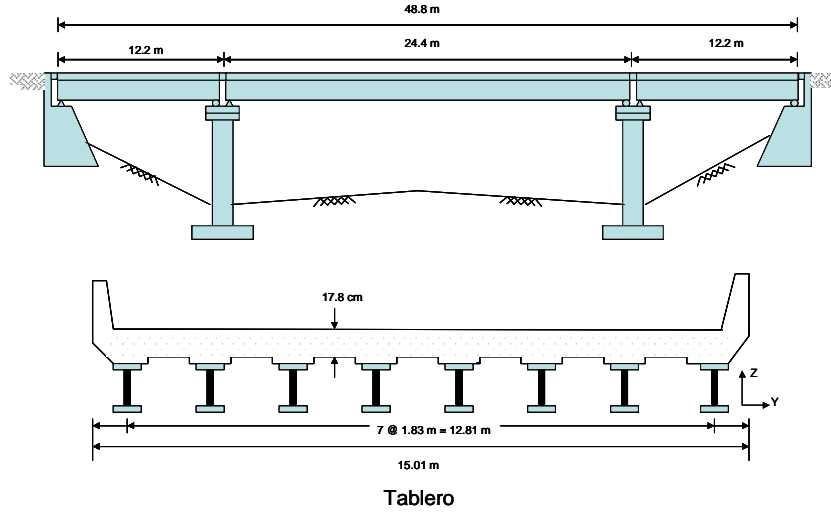


Figura 2. Dimensiones del puente⁷

Tramo	A (m ²)	I _z (m ⁴)	I _y (m ⁴)	Peso (kN/m)
Extremos	0.51	0.03	9.78	39.00
Central	0.68	0.11	13.00	52.00

Tabla I. Propiedades de la sección del tablero⁷. (A=área , I_z=momento de inercia respecto al eje Z, I_y=momento de inercia respecto al eje Y, P= Peso)

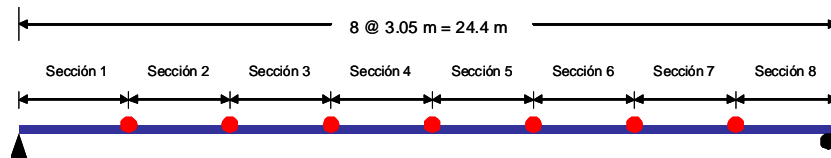


Figura 3. Discretización de la viga del tramo central

Casos de estudio

Se limitó el estudio numérico al tramo central del puente antes descrito. Para ello se consideraron dos casos de análisis; a) sin daño, b) con daño o reducción en la rigidez de la sección de la viga en 4 partes, según lo presentado en la Tabla II. Para cada caso se obtuvieron los dos primeros modos de vibración verticales del tramo central del puente.

Sección	1	2	3	4	5	6	7	8
El _f /El ₀	0.90	1.0	0.70	0.70	0.80	1.0	1.0	1.0

Tabla II. Rigideces para el caso de estudio b. (El₀= coeficiente EI inicial (sin daño), El_f= coeficiente EI final (con daño))

Efecto del ruido en la identificación del daño

Para estudiar el efecto de los errores de medición y procesamiento de la data experimental en la identificación del daño, los modos de vibración obtenidos numéricamente en los casos a) y b) fueron corrompidos mediante la adición de ruido, siguiendo el algoritmo de Sohn y Law²⁴:

$$\phi_c(n) = \phi \left(1 + \frac{p}{100} R \right) \quad (8)$$

Donde $\phi_c(n)$ es el vector corrompido, ϕ el vector inalterado proveniente de la simulación numérica, p el porcentaje de nivel de ruido, y R es una distribución numérica aleatoria de promedio cero y variancia igual a 1.0. Este proceso fue realizado suponiendo un grupo de 10 ensayos los cuales fueron promediados posteriormente. Se utilizó la distribución numérica aleatoria ya programada en Matlab²⁵.

Se realizó la identificación del daño para 6 niveles de ruido diferentes 0%, 0.1%, 0.5%, 1%, 2% y 5%.

Resultados

En la Tabla III se presenta la estimación de la relación EI_f/EI_0 y el error relativo de la aproximación, en cada uno de los 8 tramos del puente y para cada nivel de ruido impuesto.

Sección	Nivel ruido					
	0%	0.1%	0.5%	1%	2%	5%
	Elo/Eif (Error relativo)					
1	0.90	0.93 (-3.3%)	0.91 (-1.1%)	0.96 (-6.7%)	0.88 (-2.3%)	0.61 (32.2%)
2	1.00	0.98 (2.0%)	0.99 (1.0%)	0.96 (4.0%)	1.04 (2.2%)	1.13 (-13.0%)
3	0.70	0.71 (-1.4%)	0.71 (-1.4%)	0.72 (-2.9%)	0.67 (-4.0%)	0.76 (-8.6%)
4	0.70	0.69 (1.4%)	0.69 (1.4%)	0.69 (1.4%)	0.72 (4.3%)	0.65 (7.1%)
5	0.80	0.82(-2.5%)	0.82 (-2.5%)	0.81 (-1.3%)	0.81 (-2.9%)	0.77 (3.3%)
6	1.00	0.97 (3.1%)	0.96 (4.4%)	1.01 (-1.2%)	0.98 (-1.3%)	1.09 (-9.0%)
7	1.00	1.05 (-5.0%)	1.05 (-5.0%)	1.00 (0.0%)	1.11 (2.2%)	1.04 (-4.0%)
8	1.00	0.93 (7.45%)	0.92 (7.9%)	0.96 (4.4%)	0.76 (-11.0%)	0.86 (14.0%)

Tabla III. Resultados de la estimación del daño para diferentes condiciones de ruido

De dicha tabla se desprende lo siguiente:

1. En cada uno de los casos se logra identificar de manera adecuada el tramo dañado, así como la disminución de rigidez impuesta.
2. Para niveles de ruido comprendido entre 0 y 2%, los errores relativos son relativamente bajos, siendo el error máximo de 11% (tramo 1, nivel de ruido 2%).
3. Sólo para el caso de un nivel de ruido de 5% se encuentran algunos errores relativos de importancia (32.2% tramo 1).

Se evidencia que la metodología logra identificar adecuadamente el cambio de rigidez impuesto aún para condiciones de ruido importante. Sin embargo, es claro que la presencia de imprecisiones en los valores modales afecta la calidad de la identificación. En este sentido, se recomienda tomar en cuenta los niveles de ruido e incertidumbres en los ensayos experimentales a fin de reducirlos lo máximo posible.

DESARROLLO EXPERIMENTAL

Para demostrar la efectividad del método de identificación propuesto, se realizó un estudio dinámico experimental a una viga simplemente apoyada. Se introducen variaciones en la rigidez inicial de la viga, a fin de establecer los cambios de rigidez de la misma utilizando la metodología propuesta en la sección 2.

Modelo ensayado

El modelo ensayado consiste en una viga de acero de sección I (IPN 80), de alma 8 cm y alas de 4.2 cm. La viga tiene 4 metros de longitud entre los apoyos y un total de 4.10 metros, fue dividida en 5 tramos de 80 cm, y colocada sobre dos apoyos elastoméricos en sus extremos (Figura 4). La viga fue apoyada sobre alas, esto con el fin de obtener valores menores de las frecuencias de vibración y facilitar la obtención de un mayor número de modos con los equipos disponibles. Las características mecánicas y geométricas del modelo se resumen en la Tabla IV. El modelo fue construido de manera tal que los tres modos principales de vibración estén dentro del rango de percepción de los acelerómetros (Kinematics FBA-11).

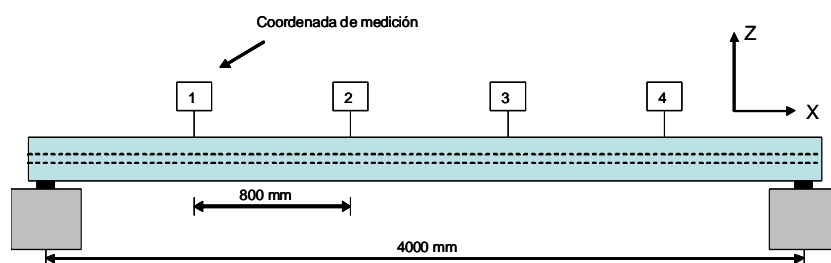


Figura 4. Modelo ensayado

Longitud total	4.05 m
Longitud de cada sección	0.80 m
$I_{xx}=5.69 \text{ cm}^4$, $I_{yy}=74.9 \text{ cm}^4$, $A= 7.66 \text{ cm}^2$	
Masa Total (modelo y acelerómetros)	22.84 kg
Modulo elasticidad	209.5 GPa

Tabla IV. Características geométricas y mecánicas del modelo ensayado

Procedimiento de ensayo y obtención de las propiedades dinámicas

La viga fue colocada sobre dos apoyos elastoméricos en cada uno de sus extremos y sometida a ensayos de vibración libre mediante el desplazamiento o la aplicación de cargas impulsivas iniciales en alguna de las cuatro coordenadas escogidas. Esta excitación fue aplicada en la dirección vertical del modelo, obteniéndose la respuesta en el plano Z (Figura 4). La vibración de la estructura fue registrada con acelerómetros unidireccionales Kinematics FBA-11, y un equipo Kinematics Altus K2, colocados en cuatro puntos equidistantes escogidos como las coordenadas modales del modelo, un total de cuatro acelerómetros. Las características del equipo de medición permiten un registro de frecuencias entre 0 y 50 Hz, con lo cual se pudo obtener tres de las 4 frecuencias principales del modelo (Figuras 5 y 6). El intervalo de muestreo escogido fue de 50 Hz y 8192 puntos fueron registrados por cada canal. En la Figuras 5 y 6 se muestran los registros de frecuencia del modelo para un ensayo con desplazamiento inicial y velocidad inicial respectivamente (excitados en la misma coordenada 4° punto). En el ensayo con velocidad inicial se pudo identificar un mayor número de frecuencias propias de vibración, en comparación con las registradas en el

ensayo con desplazamiento inicial. Esta ventaja en la excitación con velocidad inicial facilita la construcción de mayor número de modos de vibración. Las propiedades dinámicas de la estructura fueron determinadas mediante la utilización del Programa SADEX²⁶.

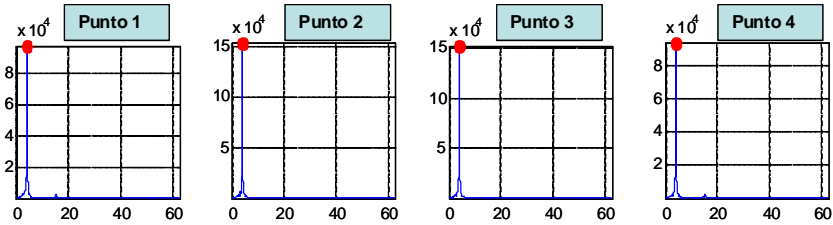


Figura 5. Registros con desplazamiento inicial

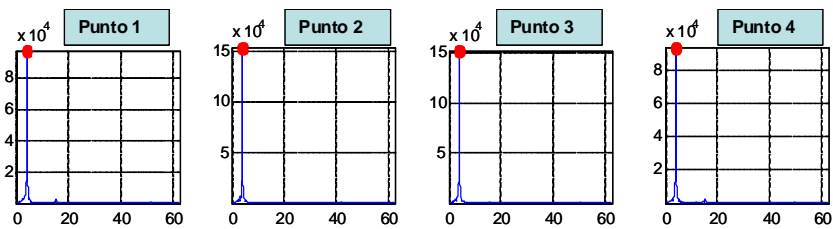


Figura 6. Registros con velocidad inicial

Casos de estudio y resultados de la estimación

Se introdujeron daños consecutivos en la viga de la Figura 4, con el fin de evaluar la metodología propuesta. Para ello, se hicieron cortes en las alas de la viga. Estas grietas se localizaron en la mitad del tramo escogido. Se establecieron cuatro casos de estudio:

- Caso a: Viga inicial sin daño (referencia para la evaluación de cambios de rigidez)
- Caso b: Viga con daño en las alas del tramo 2
- Caso c: Viga con daño en las alas del tramo 2 y 3
- Caso d: Viga con daño en las alas del tramo 2, 3 y 4

Para cada uno de los casos definidos, se efectuaron diferentes ensayos de vibración libre, con excitación en distintas coordenadas, a fin de obtener los registros correspondientes y escoger los de mayor calidad y riqueza de información. Con ellos se obtuvieron las propiedades dinámicas para cada caso: frecuencias de vibración y respectivas formas modales (Figura 7). Estimada la masa de la viga, y analizada la información experimental, se formo

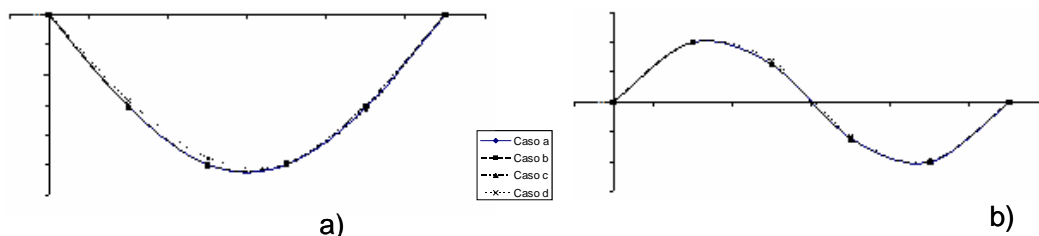


Figura 7. Modos de vibración de la viga simplemente apoyada. a) Primer modo, b) segundo modo

el sistema lineal (4) con las expresiones descritas en (6). Resuelto el sistema (4) se obtuvieron para cada caso los cambios de rigidez de cada caso con relación a la estructura inicial (Caso a).

	ω_1 (rad/s)	ω_2 (rad/s)	ω_3 (rad/s)
Caso a	25.50	97.60	—
Caso b	25.12	95.87	—
Caso c	24.93	95.68	219.55
Caso d	23.01	87.63	196.93

Tabla V. Frecuencias experimentales

	Caso b daño en 2	Caso c daño en 2 y 3	Caso d daño en 2, 3 y 4
Tramo	EI_f/EI_o	EI_f/EI_o	EI_f/EI_o
1	0.99	1.01	1.02
2	0.92	0.93	0.93
3	0.99	0.89	0.90
4	0.99	0.99	0.63
5	0.99	0.99	1.00

Tabla VI. Estimación del cambio de rigidez

La Tabla VI presenta los resultados de la estimación del daño en los Casos b, c, y d definidos anteriormente. La relación EI_f/EI_o , es el resultado del cociente entre el valor de EI final (caso de daño en estudio) y el valor de EI inicial (Caso de referencia a). En General se observa lo siguiente:

1. Se observa que la metodología permite identificar con buena precisión, en los tres casos estudiados, tanto la localización del tramo dañado como la variación de rigidez con respecto a los valores de referencia del caso a.
2. Para el caso de los tramos no dañados el error máximo de estimación es de apenas 2% (Caso d, tramo 1).
3. En el caso de la cuantificación del cociente EI_f/EI_o , para los tramos 2 y 3, el valor de daño obtenido para el tramo 2 no difiere del 1%.

CONCLUSIONES

Se propuso una metodología para la identificación, y cuantificación de la rigidez a flexión de vigas simplemente apoyadas, partiendo del conocimiento de la matriz de masa y dos frecuencias de vibración con sus respectivas formas modales.

La metodología de estimación de rigidez propuesta en este trabajo fue aplicada de manera numérica a un puente real y experimentalmente a una viga de sección I. En el primer caso se logró certificar la posibilidad de estimar el daño en vigas simplemente apoyadas con data corrompida por ruido. En el estudio experimental se propusieron tres casos de estudio, mediante la introducción progresiva de daño en secciones de la viga. En los tres casos, el método de estimación logró identificar con buena precisión tanto el cambio de rigidez introducido, como su localización.

La metodología presentada tiene una aplicación directa al caso de a vigas simplemente apoyadas, los procedimientos asociados a ella tienen la ventaja de utilizar un limitado número de coordenadas y solamente dos modos (el segundo requiere solo una coordenada). Esto representa una ventaja frente a otros métodos, que si bien son de aplicación más extensa requieren un ensayo experimental mas complejo, con mayor número coordenadas de medición, siendo algunas de compleja obtención como el caso de las rotacionales; además del apoyo de modelos bastante refinados en elementos finitos.

REFERENCIAS

- 1 L.H. Sheng, "Seismic performance of bridges in California during the January 17, 1994, Northridge earthquake", *Urban Disaster Mitigation: The Role of Engineering and Technology*, F.Y. Cheng and M.S. Sheu (Eds.), pp. 157-166, Elsevier (1995).
- 2 M. Cheung, W. Li, "Probabilistic fatigue and fracture analyses of steel bridges", *Structural Safety*, Vol. **23**, pp. 245-262, (2003).
- 3 R. Gaspar, G. Massami, I. de Lima, F. Rebouças, "Análise estrutural de pontes utilizadas por veículos de cargas especiais", *XXXII Jornadas suramericanas de Ingeniería Estructural*, Campinas, Sao Paulo, Brasil, pp. 22-26, May (2006).
- 4 H. Xia, N. Zhang, "Dynamic analysis of railway bridge under high-speed trains", *Computers & Structures*, Vol. **83**, pp. 1891-1901. (2005).
- 5 M-K. Song, H-C. Nohn, Ch-K. Choi, "A new three-dimensional finite element analysis model of high-speed train-bridge interactions", *Engineering Structures*, Vol. **25**, pp. 1611-1626,(2003).
- 6 M. Cheung, W. Li, "Probabilistic fatigue and fracture analyses of steel bridges", *Structural Safety*, Vol. **23**, pp. 245-262, (2003).
- 7 Nielson, R. DesRoches, "Influence of model assumptions o the seismic response of multi-span simply supported steel girder bridges in moderate seismic zones, *Engineering Structures*", Vol. **28**, pp. 1083-1092, (2006).
- 8 C. Genatios, G. Cascante, M. Lafuente, P. Bellan, M. Lorrain, "Evaluation expérimentale des caractéristiques modales et ajustement du modèle dynamique d'un bâtiment de portiques", *Materials and Structures*, RILEM Paris, Vol. **32**, pp. 117-124, (1999).
- 9 R. Goel, A. Chopra, "Vibration Proprieties of Buildings Determined From Record Earthquake Motions", Earthquake Engineering Research Center, Report UBC/EERC-97/14, University of California, Berkeley, CA., (1997).
- 10 A. Brasileiro, G.N. Doz, J.L.V. de Brito, "Damage identification in continuous beams and framed structures using the residual error method in the movement equation", *Nuclear Engineering and Design*, Vol. **227**, pp. 1-17, (2004).
- 11 R. Allemang, D. Brown, "A correlation coefficient for modal vector analysis", *Proc. 1st Int. Modal Analysis Conference*, Vol. **1**, pp. 110-116, (1982).
- 12 N. Lieven, D. Ewins, "Spatial correlation of mode shapes coordinate modal assurance criterion (COMAC)", *Proc. 6th Int. Modal Analysis Conference*, Vol. **1**, pp. 690-695, (1988).
- 13 M. Maia, M. Silva, M. Almas, "Damage detection in structures: from mode shape to frequency response function methods", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. **17**, N° 3, pp. 489-498, (2003).
- 14 AA.K. Pandey, M. Biswas, "Experimental verification of flexibility difference method for locating damage in structures", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. **184**, N° 2, pp. 311-328, (1995).
- 15 M. Baruch, "Optimization Procedure to Correct Stiffness and Flexibility Matrices Using Vibrations Test", *AIAA Journal*, Vol. **16**, N° 11, pp. 1208-1210, (1978).

- 16 F. Garcés, C. Genatios, P. Bellan, "Ajuste matricial directo no paramétrico en dinámica experimental de estructuras: Parte 2. Identificación de la matriz de rigidez", *Boletín Técnico del IMME*, UCV Caracas, Vol. **37**, N° 3, (1999).
- 17 S. Hassiotis, "Identification of damage using natural frequencies and Markov parameters", *Computers and Structures*, Vol. **74**, pp. 365-373, (2000).
- 18 L. Papadopoulos, E. García, "Structural damage identification: a probabilistic approach", *AIAA Journal*, Vol. **36**, N° 11, pp. 2137-2145, (1998).
- 19 J.V. Araujo Dos Santos, C. M. Mota Soares, C.A. Mota Soares, N.M.M. Maia, "Structural damage identification: influence of model incompleteness and errors", *Composite Structures*, Vol. **62**, pp. 303-313, (2003).
- 20 M. Ge, E. Lui, "Structural damage identification using system dynamics properties", *Computers and Structures*, Vol. **83**, pp. 2185-2196, (2005).
- 21 A. Teughles, J. Maeck, G. De Roeck, "Damage assessment by FE model updating using damage functions", *Computers and Structures*, Vol. **80**, pp. 1869-1879, (2002).
- 22 F. Garcés, C. Genatios, M. Lafuente, A. Mebarki, "Identificación de la rigidez residual de sistemas de muros", *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, , ESPE Ed., Ecuador, Vol. **9**, N° 1, pp. 31-44, (2004).
- 23 "SAP2000. Analysis Reference Manual", Version 8.0, *Computers and Structures*, Inc. Berkeley, California, USA, July (2002).
- 24 H. Sohn, K. Law, "Application of load-dependent Ritz vectors to Bayesian probabilistic damage detection", *Probabilistic Engineering Mechanics*, Vol. **15**, pp. 139-153, (2000).
- 25 "*MATLAB The Language of Technical Computing*", The Math Works, Inc. November (2000).
- 26 P. García, Genatios, F. Garcés, M. Lafuente, "SADEX: Sistema computacional para la simulación e identificación de estructuras", *Boletín Técnico del IMME*, Vol. **44**, N ° 2, pp. 21-32, (2006).