

**CURVATURAS DE FORMAS MODALES APLICADAS A LA DETECCIÓN DE DAÑO EN
UN PÓRTICO EN EL ESPACIO BIDIMENSIONAL**

ANDRÉS DAVID FORERO CUBILLOS

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2016

**CURVATURAS DE FORMAS MODALES APLICADAS A LA DETECCIÓN DE DAÑO EN
UN PÓRTICO EN EL ESPACIO BIDIMENSIONAL**

ANDRÉS DAVID FORERO CUBILLOS

**Trabajo de Grado para optar por el título de
Ingeniero Civil**

Director

**OSCAR JAVIER BEGAMBRE CARILLO
Ingeniero Civil Ph.D.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
2016**

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darme la vida, la salud y la posibilidad de estudiar esta carrera. A mis padres Álvaro Forero Díaz y Marina Cubillos Rojas por apoyarme en cada momento y enseñarme otras formas de ver la vida. De la misma forma, a la Universidad Industrial de Santander y a la Escuela de Ingeniería Civil, que en cabeza de mi profesor Oscar Javier Begambre me han dado la posibilidad de crecer profesionalmente. Finalmente, agradezco al ingeniero Fredy Sotelo por permitirme contar con su apoyo y experiencia en el desarrollo de este proyecto.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	12
1. METODOLOGÍA.....	14
2. SIMULACIÓN Y RESULTADOS	17
3. CONCLUSIÓN.....	29
BIBLIOGRAFÍA	30
ANEXOS	32

LISTA DE FIGURAS.

	Página
• Figura 1. (a) Pórtico Bidimensional. (b) Seccional Transversal	17
• Figura 2. (a) Modelo de pórtico bidimensional con 15 elementos.....	18
• Figura 3. (a) Modo de vibración fundamental. (b) Modo de vibración 2. (c) Modo de vibración 3. – 15 elementos finitos.....	20
• Figura 4. Diferencia absoluta de las curvaturas de las formas modales. (a) Daño 1. (b) Daño 2. (c) Daño 3 (d) Daño 4. – 15 elementos finitos – Proporciones de daños mayores al 10%	21
• Figura 5. Elementos finitos pórtico bidimensional, n=50.....	22
• Figura 6. (a) Modo de vibración fundamental. (b) Modo de vibración 2. (c) Modo de vibración 3. – 50 elementos finitos.....	23
• Figura 7. Diferencia absoluta de las curvaturas de las formas modales. (a) Daño 1. (b) Daño 2. (c) Daño 3 (d) Daño 4. – 50 elementos finitos – Proporciones de daños mayores al 10%	25
• Figura 8. Diferencia absoluta de las curvaturas de las formas modales. (a) Daño 1. (b) Daño 2. (c) Daño 3 (d) Daño 4. – 50 elementos finitos – Proporciones de daños menores al 10%.....	27
• Figura 9. Diferencia absoluta de las curvaturas de formas modales. Daño 1 – 50 elementos finitos – Proporciones de daños menores al 10%.	32
• Figura 10. Diferencia absoluta de las curvaturas de formas modales. Daño 2 – 50 elementos finitos – Proporciones de daños menores al 10%.	33
• Figura 11. Diferencia absoluta de las curvaturas de formas modales. Daño 3 – 50 elementos finitos – Proporciones de daños menores al 10%.	33
• Figura 12. Diferencia absoluta de las curvaturas de formas modales. Daño 4 – 50 elementos finitos – Proporciones de daños menores al 10%.	34

LISTA DE TABLAS

	Página
• Tabla 1. Propiedades Sección HEB 220.....	17
• Tabla 2. Porcentajes de daño.....	18
• Tabla 3. Porcentaje de variación en frecuencias naturales para los tres primeros modos con proporciones de daño mayores al 10% entre el pórtico con daño y el intacto. Modelo con 15 elementos.....	19
• Tabla 4. Porcentajes de daño mayores al 10% - Pórtico 50 elementos	23
• Tabla 5. Porcentaje de variación en frecuencias naturales para los tres primeros modos de vibración con proporciones de daño mayores al 10% entre el pórtico con daño y el intacto. Modelo con 50 elementos.	24
• Tabla 6. Porcentajes de daño menores o igual al 10%	26
• Tabla 7. Porcentaje de variación en frecuencias naturales para los tres primeros modos con proporciones de daño menores al 10% entre el pórtico con daño y el intacto. Modelo con 50 elementos.....	28

LISTA DE ANEXOS

	Página
Anexo A.....	32

RESUMEN

TITULO: CURVATURAS DE FORMAS MODALES APLICADAS A LA DETECCIÓN DE DAÑO EN UN PÓRTICO EN EL ESPACIO BIDIMENSIONAL.*

AUTOR: ANDRÉS DAVID FORERO CUBILLOS.**

PALABRAS CLAVE: CURVATURAS DE FORMAS MODALES, DAÑO, DETECCIÓN DE DAÑO, FORMAS MODALES, FRECUENCIAS NATURALES.

DESCRIPCIÓN:

La detección de daños en estructuras puede llegar a ser un trabajo lento, arduo y costoso si no se usan las técnicas de localización adecuadas. Las curvaturas de las formas modales de una estructura son un mecanismo dinámico, fácil, presto, oportuno y no intrusivo para detectar el daño en el sistema en una forma global o puntual. El objetivo de esta investigación es observar y detectar gráficamente, mediante las diferencias absolutas de las curvaturas de las formas modales de vibración, las variaciones que se presentan entre un pórtico bidimensional en acero con sección transversal HEB 220 intacto y un pórtico de las mismas especificaciones con un porcentaje de daño inducido en los coeficientes que definen el sistema dinámico; usando un modelo de elementos finitos con daño escalar para cuatro situaciones distintas de deterioro a las que se somete la estructura. Se evalúan las frecuencias de vibración, las formas modales y también las diferencias absolutas entre las curvaturas de las formas modales de vibración del pórtico intacto con el afectado como señal de existencia de daños. Finalmente, se concluye que las frecuencias naturales son sensibles al inducir un daño o deterioro en cualquier elemento que las compone. Una mayor discretización de la estructura y un manejo adecuado en la escala de las gráficas, facilita la localización del daño.

*Trabajo de grado

** Facultad de ingenierías físico-mecánicas. Escuela de ingeniería civil. Director: Oscar Javier Begambre Carillo. Ph.D.

ABSTRACT

TITLE: CURVATURES OF MODE SHAPES APPLIED TO DETECT DAMAGE ON A FRAME IN THE TWO-DIMENSIONAL SPACE*.
AUTHOR: ANDRÉS DAVID FORERO CUBILLOS **.
KEYWORDS: CURVATURE MODE SHAPES, DAMAGE, DAMAGE DETECTION, MODE SHAPES, NATURAL FREQUENCIES.

DESCRIPTION:

The detection of damage to structures can become a work slow, arduous, and expensive if proper localization techniques are not used. The curvatures of the modal forms of a structure are a mechanism appropriate, presto, easy, dynamic and non-intrusive to detect damage in the system in a global or punctual way. The objective of this research is to observe and detect graphically, using the absolute differences of curvatures of the modal forms of vibration, the variations that occur between a two-dimensional cross-section HEB intact 220 steel frame and a frame of the same specifications with a percentage of damage induced in the coefficients that define the dynamic system; using a model of finite elements with damage scale to four different situations of deterioration that undergoes the structure. Assesses the vibration frequencies, modal shapes and also absolute differences between the curvatures of the modal forms of vibration of the intact portico with the affected as a sign of damage. Finally, it is concluded that the natural frequencies are sensitive to induce damage or deterioration in any element that composed them. A further discretization of the structure and a management right on the scale of the graphs, facilitates the location of the damage.

* Bachelor Thesis

** Facultad de ingenierías físico-mecánicas. Escuela de ingeniería civil. Director: Oscar Javier Begambre Carillo. Ph.D.

INTRODUCCIÓN

Debido a las condiciones a las que se encuentran expuestas las estructuras a través del tiempo, estas son susceptibles al deterioro; El cual modifica las propiedades físicas o mecánicas de los materiales y pueden producir daños (que se manifiestan a través de la aparición de pequeñas fisuras).

La identificación de daño juega un papel muy importante en la rama de la patología estructural en los diferentes campos de la ingeniería, sobre todo en el control para la detección temprana de fallas, debido a que un buen control de los mecanismos de falla en la industria puede generar grandes ahorros en su construcción, mantenimiento y reparación, generando así, mayores utilidades. Un área pionera en la detección de daños es la ingeniería aeronáutica, que debido a las fuertes condiciones a las que debe resistir una aeronave, obtiene una gran ventaja monitoreando el sistema estructural de la aeronave, ayudando a reducir el deterioro de los materiales y/o evitar los posibles fallos en su uso.

La detección de daños se puede realizar mediante técnicas destructivas (TD) y no destructivas (TND). Actualmente, debido a las limitaciones que presentan las técnicas destructivas (TD) al evaluar el daño estructural, la investigación se ha dirigido a metodologías de análisis más funcionales, fiables, y no intrusivas; que en los últimos años consiguen identificar daños locales y globales. Mediante las propiedades dinámicas, es decir, los modos de vibración y frecuencias naturales, entre otros. Se ha encontrado un camino atractivo para explotar el gran potencial de los procedimientos analíticos basados en el comportamiento dinámico de la estructura y, de esta forma, determinar si un cambio en la rigidez del sistema puede ser identificado y si este cambio indica la presencia de daños.

El principio de los algoritmos utilizados en la detección de daño se basa en el hecho de que la ocurrencia de daños o pérdida de la integridad de un sistema estructural, da lugar a cambios en las propiedades dinámicas de la estructura (Maeck et al.

2000), ya que la detección de daños es consecuencia de la unión de las técnicas de ajuste de modelos con las técnicas experimentales. (Atienza Pascual 2004). Concepto que ha sido aplicado implícitamente en investigaciones como la detección de daños en el pretensado del puente Z24 que se encuentra cruzando la autopista A1 entre Zúrich y Berna, Suiza (Abdel Wahab & De Roeck 1999) o la identificación de daño que se realizó para puentes ferroviarios basado en respuestas inducidas por tren-puente (Zhan et al. 2011), como también en los trabajos de Adams y Cawley (1979), donde simularon mediante elementos finitos el daño en algunos elementos de una losa, asumiendo el módulo de elasticidad nulo y posteriormente localizar el daño por medio de un análisis sensitivo, logrando mostrar que los resultados eran conformes con los resultados experimentales (Cawley & Adams 1979). Es así como poco a poco el campo de la patología estructural va adquiriendo fuerza en la investigación y en el desarrollo de mejores productos en nuestra sociedad para facilitar y mejorar la calidad de vida de los seres humanos.

El desarrollo del método de detección de daño mediante la variación de las curvaturas de las formas modales hace parte de los métodos de las llamadas técnicas de detección de daño no destructivas (DDND) (Begambre Carrillo & Elias Laier 2004) y su proceder es de sencilla aplicación, pudiendo llevar un control en tiempo real de estructuras civiles en su funcionamiento o construcción mediante sensores especializados para obtener las propiedades dinámicas características, pues puede mostrar gráficamente donde se presentan alteraciones en el sistema y así optimizar procesos de funcionamiento y reparación.

En este trabajo se introducen daños estructurales a un pórtico bidimensional empleando un modelo de daño escalar. Se evaluarán las curvaturas de las formas modales y las frecuencias naturales como posibles indicadores de presencia de daños en la estructura.

1. METODOLOGÍA

En esta sección se presenta de forma resumida el procedimiento para detectar el daño en un pórtico. Inicialmente se calculan las frecuencias y formas modales. A partir de estas últimas se determinan las curvaturas modales y con la ayuda de las diferencias absolutas se localiza el daño en la estructura.

En la obtención de los datos es crucial realizar un análisis dinámico en el pórtico, asumiendo un movimiento en vibración libre no amortiguada o movimiento armónico simple para la obtención de las principales propiedades dinámicas que describen el comportamiento de la estructura ante ausencia de cargas externas, obteniendo así, valores escalares de frecuencias naturales y formas modales o de vibración del pórtico. Se asume que el sistema presenta un comportamiento de la forma que se muestra en la ecuación (1)

$$[M]\{\ddot{U}\} + [K]\{U\} = 0 \quad (1)$$

Donde [M] y [K] son las matrices de masa y rigidez del sistema respectivamente. La ecuación (2) representa la solución de ecuaciones diferenciales simultáneas del sistema anterior.

$$\{U\} = \{a\} \text{sen}(\omega t - \alpha) \quad (2)$$

Que al reemplazar en la ecuación (1) a (2), se elimina el factor $\text{sen}(\omega t - \alpha)$, obteniendo la ecuación (3)

$$[[K] - \omega^2[M]] \{a\} = 0 \quad (3)$$

Siendo el vector de amplitudes $\{a\}$ y las frecuencias naturales ω^2 incógnitas del sistema por determinar. La solución matemática del problema es conocida como *problema característico*, que requiere que el determinante de la matriz del factor $\{a\}$ sea igual a cero para que el sistema de ecuaciones simultáneas homogéneo (ecuación 3) tenga una solución no trivial (Maldonado Rondón & Chio Chio 2004),

es decir que no todos los valores a_i sean nulos, por lo tanto es necesario que el determinante de la matriz del factor $\{a\}$ sea igual a cero.

$$\det|[K] - \omega^2[M]| = 0 \quad (4)$$

La ecuación 4 es conocida como *la ecuación característica del sistema* que tiene como incógnita la frecuencia ω^2 . Es una ecuación algebraica de grado n donde todos los valores ω^2 que la satisfacen, solucionan la ecuación 3 para el vector $\{a\}$, es decir, para cada valor de todas las n raíces de ω^2 , conocidas como *frecuencias naturales o valores propios o eigenvalores*, existirá un vector característico $\{a\}$ conocido como *eigenvector o modo de vibración o amplitudes de vibración*.(Paz n.d.)(Maldonado Rondón & Chio Chio 2004)

Con los datos característicos de la estructura, la simulación de las curvaturas de las formas modales se puede realizar de una forma rápida y sencilla utilizando la aproximación de diferencias centrales que se muestra en la ecuación 5, donde v'' es la curvatura de la forma modal, h es la distancia entre dos elementos de medida sucesivos y v es el respectivo valor de la forma modal, de acuerdo a la posición del elemento a evaluar.

$$v'' = \frac{(v_{i+1} - 2v_i + v_{i-1}))}{h^2} \quad (5)$$

Begambre define los daños como cambios introducidos en un sistema que afectan negativamente su desempeño actual o futuro (Begambre Carrillo 2007). Es decir, que una pequeña fisura o grieta localizada genera en la estructura una pérdida de rigidez pero un pequeño aumento en el amortiguamiento y variación en la frecuencia y modos de vibración (Pandey et al. 1991). Por lo tanto, la simulación del daño se genera aplicando una reducción en la matriz de rigidez, donde $\mu E I$ son los factores que generan o construyen la matriz, siendo μ el factor de reducción que se aplica y modifica los coeficientes propios del material y a la sección de la estructura, que en un escenario práctico representa una pérdida en la inercia del elemento con daño, debido a que la masa y las propiedades del material se mantienen constantes.

De esta forma el daño se puede representar mediante la ecuación 6. Donde $[K]_{d_{elemento}}$ es la matriz de rigidez del elemento deteriorado

$$[K]_{d_{elemento}} = \mu[K]_{elemento} \quad (6)$$

Por otro lado, la diferencia absoluta D.A de las curvaturas de las formas modales del pórtico intacto v''_{i-sd} y la del pórtico con daños v''_{i-cd} (Ecuación 7), proporciona la región donde se encuentra el deterioro inducido, revelando los cambios bruscos o suaves en la gráfica de la función. Es así como mediante las frecuencias y la D.A de curvaturas de las formas modales es posibles detectar y localizar presencia de daños en las estructuras.

$$DA = |v''_{i-sd} - v''_{i-cd}| \quad (7)$$

2. SIMULACIÓN Y RESULTADOS

La estructura en estudio es un pórtico biempotrado que cuenta con dos columnas de diferentes medidas, una de menor longitud que se encuentra al costado izquierdo con un desarrollo de 1.5m, mientras que la columna derecha abarca una longitud de 2.0m y mantienen una luz entre ellas de 1.50m que describe la longitud total de la viga que las une (Figura 1-a). Todos los elementos cuentan con un perfil HEB 220 en su sección transversal (Figura 1-b) y cuentan con las propiedades que se enuncian en la tabla 1. (Sotelo Monroy & Acevedo Gutierrez 2009)

Figura 1. (a) Pórtico Bidimensional. (b) Seccional Transversal

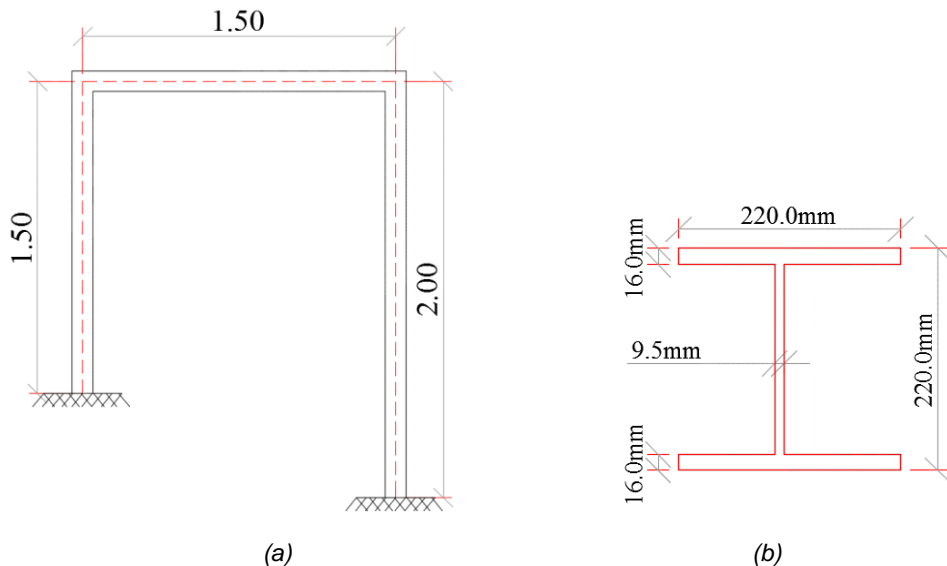


Tabla 1. Propiedades Sección HEB 220

PROPIEDADES	
Área (A)	$9.1 \times 10^{-3} \text{ [m}^2\text{]}$
Inercia (I)	$8.09 \times 10^{-5} \text{ [m}^4\text{]}$
Densidad (ρ)	$7857.14 \text{ [kg/m}^3\text{]}$
Módulo de Elasticidad (E)	$2 \times 10^{11} \text{ [N/m}^2\text{]}$

El método para detectar daños requiere de un análisis matricial o por elementos finitos de dos modelos de estados en el que se encuentra el pórtico. Un estado inicial con el pórtico intacto que se compara con un pórtico con daños o en mal estado estructural, inducido mediante una reducción en los factores EI en ciertos

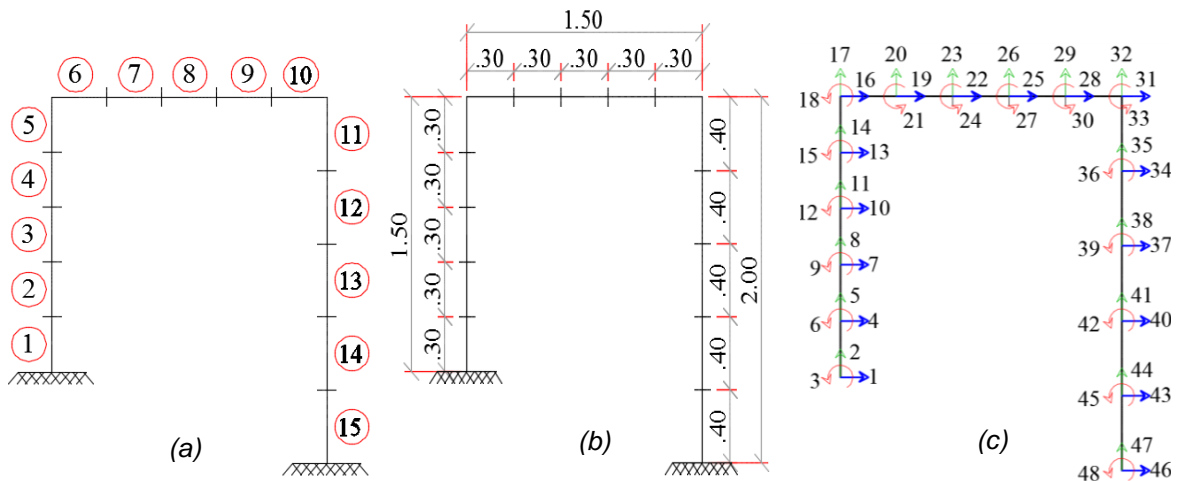
elementos. En esta investigación se generaron cuatro estados de daños con diferentes porcentajes de reducción aleatoriamente en las propiedades de la estructura μEI , mientras que la estructura sin defectos mantiene constantes los coeficientes EI para todos los elementos.

Tabla 2. Porcentajes de daño

<i>Dañó 1</i>		<i>Dañó 2</i>		<i>Dañó 3</i>		<i>Dañó 4</i>	
<i>Elemento</i>	<i>Porcentaje de Daño</i>	<i>Elemento</i>	<i>Porcentaje de Daño</i>	<i>Elemento</i>	<i>Porcentaje de Daño</i>	<i>Elemento</i>	<i>Porcentaje de Daño</i>
1	15%	13	36%	8	50%	11	20%

Inicialmente, la simulación del pórtico cuenta con 15 elementos finitos (Figura 2-a) de diferentes longitudes según el elemento estructural (Figura 2-b) y con tres grados de libertad por nodo (Figura 2-c), a los cuales se inducen cuatro porcentajes de daño en diferentes elementos y generando así cuatro estados de daño. El primer caso cuenta con una reducción del $\mu=15\%$ al factor EI en el elemento 1. Un segundo daño se localiza en el elemento número 13 con un porcentaje de decremento del 36%, mientras que el elemento número 8 del pórtico cuenta con el 50% de reducción en EI , generando el tercer estado de daño. Para concluir, el ultimo deterioro es del 20% y se encuentra en el elemento finito número 12. Cabe resaltar que para cada estado del pórtico intacto y de daño se extraen las propiedades dinámicas de frecuencias y modos de vibración. Todos los daños se resumen en la tabla 2.

Figura 2. (a) Modelo de pórtico bidimensional con 15 elementos. (b) Dimensionamiento elementos. (c) Distribución de los grados de libertad.



Las frecuencias naturales del pórtico intacto y los casos de los pórticos con daño para los tres primeros modos se sintetizan en la tabla 3. Los resultados indican presencia de daño de acuerdo con el porcentaje de cambio, pero con la restricción de que no es posible localizar el segmento deteriorado porque esto nos sugiere un cambio a nivel global de la estructura.

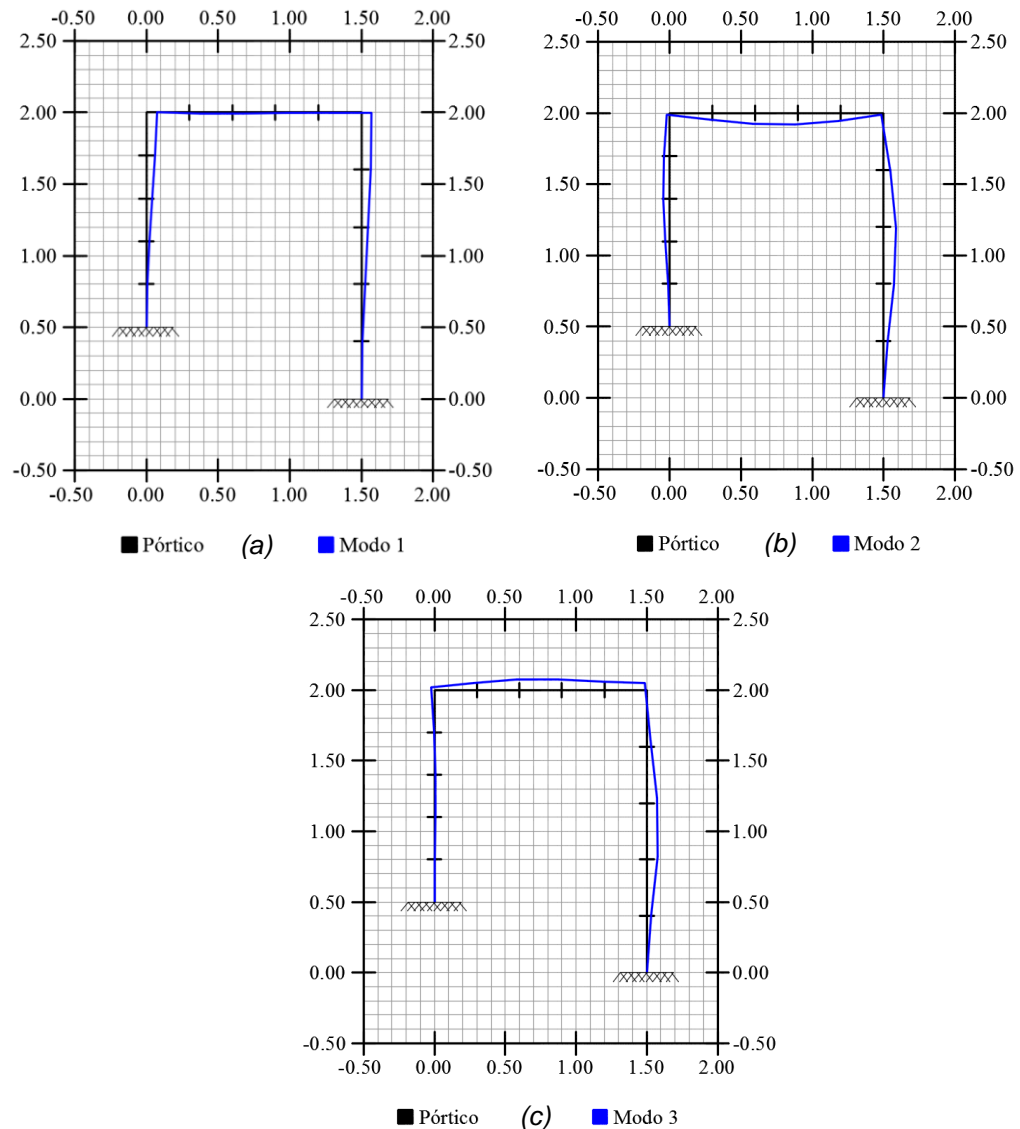
Tabla 3. Porcentaje de variación en frecuencias naturales para los tres primeros modos con proporciones de daño mayores al 10% entre el pórtico con daño y el intacto. Modelo con 15 elementos.

		Frecuencia [Hz]								
		<i>Pórtico sin daño</i>	<i>Daño 1</i>	<i>Porcentaje de cambio</i>	<i>Daño 2</i>	<i>Porcentaje de cambio</i>	<i>Daño 3</i>	<i>Porcentaje de cambio</i>	<i>Daño 4</i>	<i>Porcentaje de cambio</i>
<i>Número de Modo</i>	1	86.69	84.82	2.15%	86.56	0.14%	86.47	0.25%	85.88	0.93%
	2	325.72	324.27	0.44%	313.65	3.70%	311.12	4.48%	324.94	0.24%
	3	427.24	426.83	0.10%	408.34	4.42%	419.74	1.75%	421.40	1.37%

La figura 3 muestra los tres primeros modos de vibración del pórtico sin daño para 15 elementos, con una frecuencia fundamental para el modo 1 de 86.69Hz, los modos 2 y 3 cuentan con una frecuencia de 325.72Hz y 427.24Hz respectivamente. Estas frecuencias del pórtico intacto son ante ausencia de cargas externas y adicionalmente son el punto de comparación con las frecuencias de los cuatro estados de daños inducidos al pórtico con la misma cantidad de los elementos que lo componen.

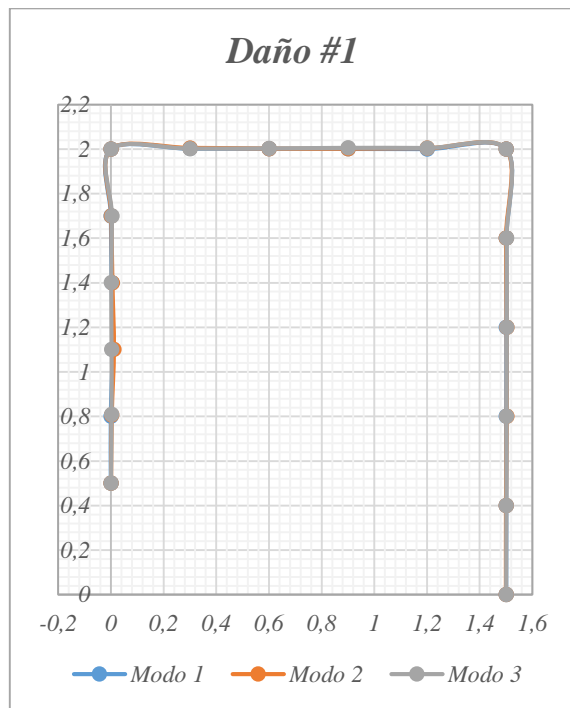
Cabe resaltar que se escogieron las tres primeras formas modales, debido a que más de 90% de la participación de masa modal se encontraba distribuido en estos modos de vibración.

Figura 3. (a) Modo de vibración fundamental. (b) Modo de vibración 2. (c) Modo de vibración 3. – 15 elementos finitos.

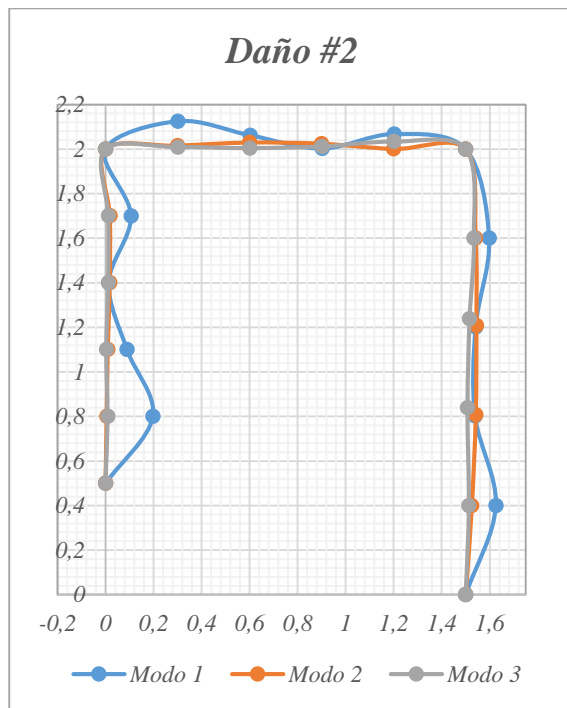


Teniendo en cuenta que la ecuación 5, se aplica únicamente para funciones continuas y observando la *Figura 3* (modos), se concluye que en los extremos donde se une la viga con las columnas o en el cambio de dirección de la forma modal, se presentan discontinuidades y por lo tanto en esos puntos no se realiza el cálculo de la curvatura modal y en consecuencia, la diferencia absoluta de las curvaturas de las formas modales.

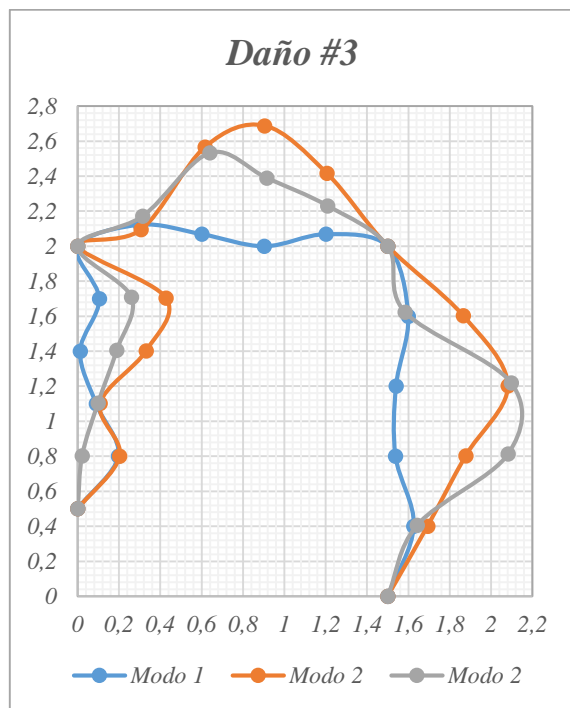
Figura 4. Diferencia absoluta de las curvaturas de las formas modales. (a) Daño 1. (b) Daño 2. (c) Daño 3 (d) Daño 4. – 15 elementos finitos – Proporciones de daños mayores al 10%



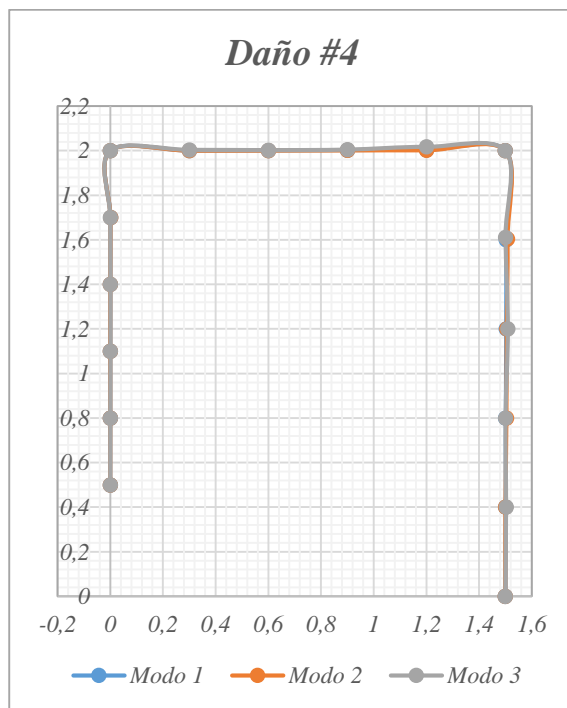
(a)



(b)



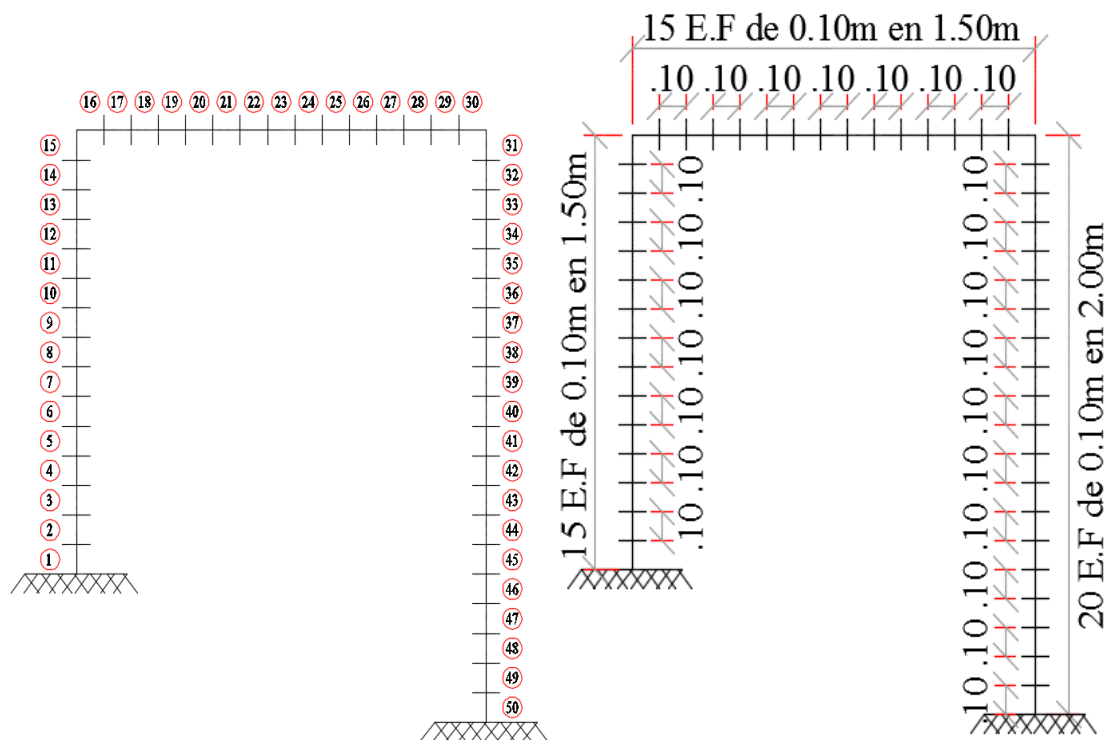
(c)



(d)

Observando las DA de las curvaturas del pórtico con 15 elementos finitos (*Figura 4*) es complejo determinar donde se encuentra el daño, debido a que las dimensiones de los E.F son considerables y posibilita los cambios de los elementos cercanos no deteriorados perceptibles en la figura 4-b y 4-c. Un fácil camino para mejorar la precisión de las curvaturas modales es un utilizar un mesh o malla más refinada. La *figura 5-a*, muestra el modelo del pórtico más fino, con una malla de 50 elementos con dimensiones de 0.10m en las columnas y la viga (*figura 5-b*). Cabe aclarar que se conservan los mismos tres grados de libertad por nodo en la estructura.

Figura 5. Elementos finitos pórtico bidimensional, n=50



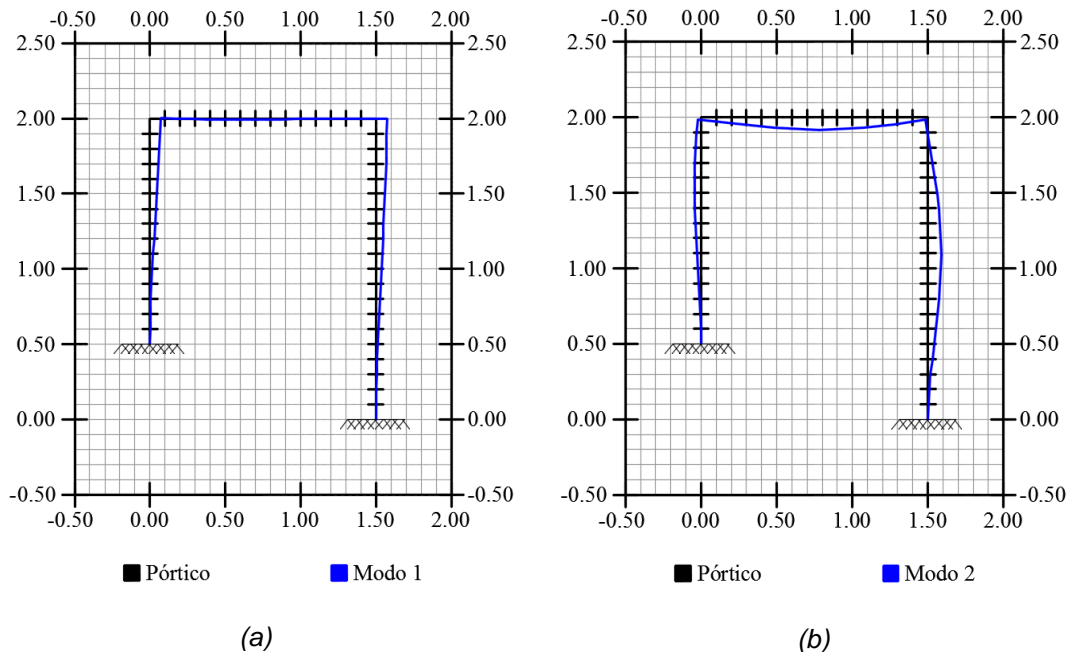
El pórtico con 50 elementos mantiene el mismo porcentaje de daño, con la diferencia que se inducen en más elementos, debido a que la dimensión de cada elemento es tres o cuatro veces menor dependiendo del elemento estructural comparado con el pórtico anterior, Los porcentajes de daños se resumen en la *tabla 4* para los cuatros estados de la estructura con deterioro.

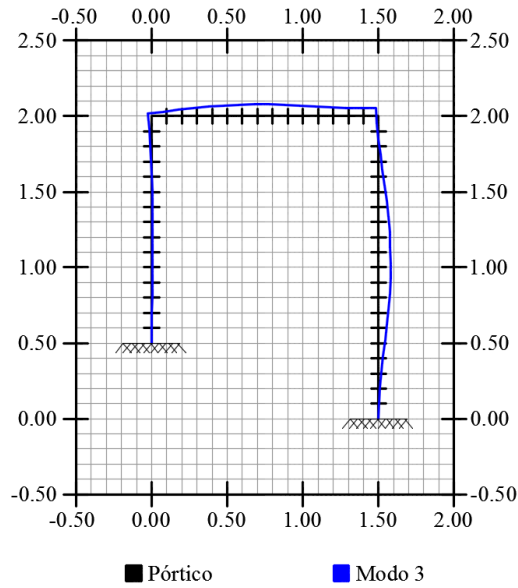
Tabla 4. Porcentajes de daño mayores al 10% - Pórtico 50 elementos

<i>Daño 1</i>		<i>Daño 2</i>		<i>Daño 3</i>		<i>Daño 4</i>	
<i>Elemento</i>	<i>Porcentaje de Daño</i>	<i>Elemento</i>	<i>Porcentaje de Daño</i>	<i>Elemento</i>	<i>Porcentaje de Daño</i>	<i>Elemento</i>	<i>Porcentaje de Daño</i>
1	15%	39	36%	22	50%	31	20%
2	15%	40	36%	23	50%	32	20%
3	15%	41	36%	24	50%	33	20%
		42	36%			34	20%

Las frecuencias naturales del pórtico intacto con el pórtico con daño para los tres primeros modos que se enuncian en la *tabla 5*, evidencian un resultado de porcentaje de cambio similar al del pórtico con 15 elementos en los primeros modos y un porcentaje de daño un poco mayor pero cercano al obtenido en el modelo anterior. Igualmente no es posible localizar el segmento deteriorado pero si un cambio en la estructura. En cuanto a los modos de vibración o formas modales de este modelo, mantienen la misma forma pero un poco más fina y suave que en la simulación anterior, como se observa en la *Figura 6*.

Figura 6. (a) Modo de vibración fundamental. (b) Modo de vibración 2. (c) Modo de vibración 3. – 50 elementos finitos



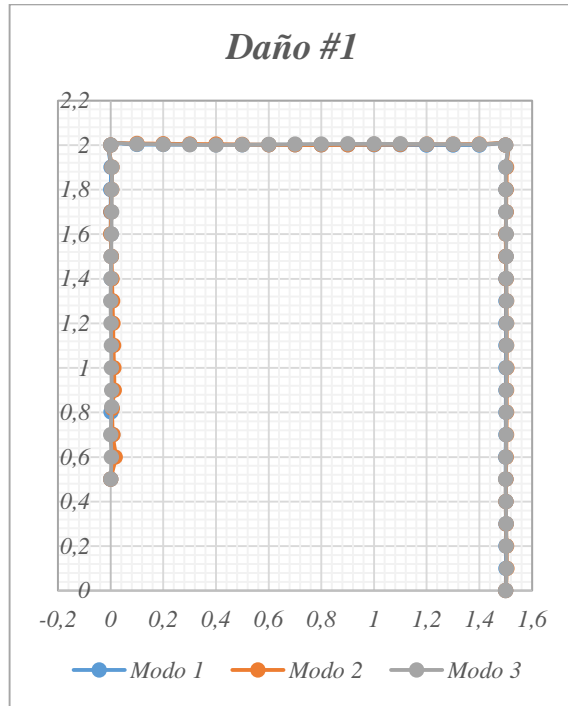


(c)

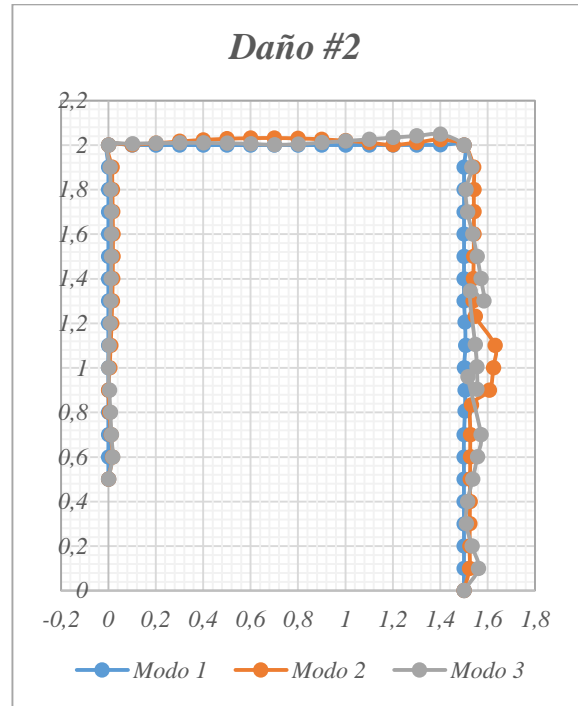
Tabla 5. Porcentaje de variación en frecuencias naturales para los tres primeros modos de vibración con proporciones de daño mayores al 10% entre el pórtico con daño y el intacto. Modelo con 50 elementos.

		Frecuencia [Hz]								
		<i>Pórtico sin daño</i>	<i>Daño 1</i>	<i>Porcentaje de cambio</i>	<i>Daño 2</i>	<i>Porcentaje de cambio</i>	<i>Daño 3</i>	<i>Porcentaje de cambio</i>	<i>Daño 4</i>	<i>Porcentaje de cambio</i>
<i>Número de Modo</i>	1	86.69	84.82	2.16%	86.56	0.15%	86.47	0.25%	85.88	0.93%
	2	325.72	324.20	0.47%	313.56	3.73%	311.05	4.50%	324.87	0.26%
	3	427.24	426.57	0.16%	408.07	4.49%	419.49	1.81%	421.14	1.43%

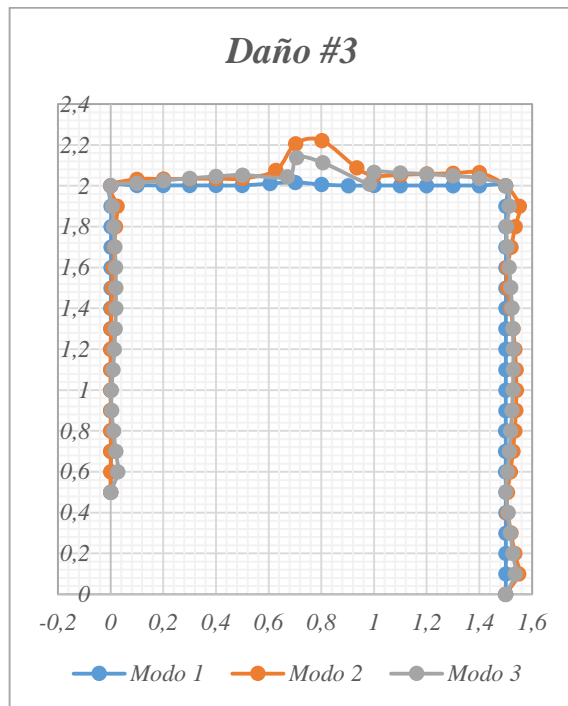
Figura 7. Diferencia absoluta de las curvaturas de las formas modales. (a) Daño 1. (b) Daño 2. (c) Daño 3 (d) Daño 4. – 50 elementos finitos – Proporciones de daños mayores al 10%



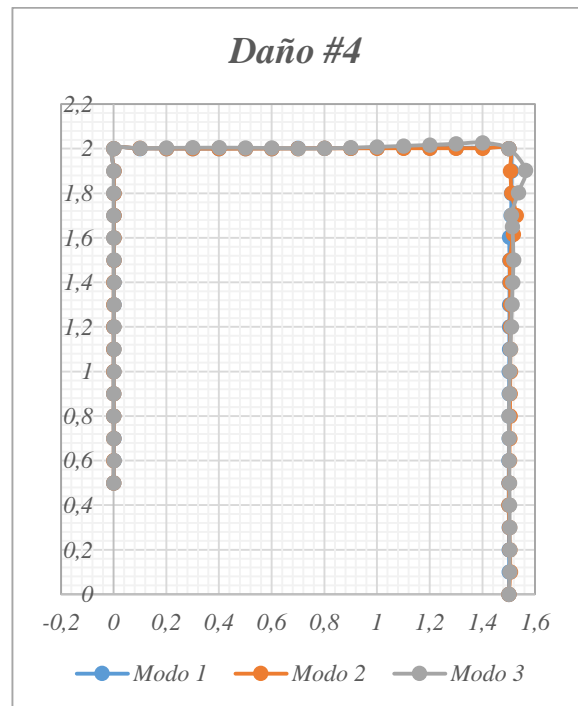
(a)



(b)



(c)



(d)

Las D.A de las curvaturas de los modos de vibración son más suave en un pórtico con un mesh fino, lo que permite que la localización del daño en la estructura se perciba mejor. La figura 7 muestra los cuatro estados de daños a los que se somete la estructura con las tres formas modales. Es fácil detectar que el daño se encuentra donde la D.A de la curvatura sufre un cambio brusco como sucede en daño 2,3 y 4 en la Figura 7-b, 7-c y 7-d, que se consideró un porcentaje de daño considerablemente grande. Mientras que en el daño 1 es difícil percibir esa variación en los modos 1 y 3 debido a ser un daño de menor magnitud y la escala a la que se encuentra la Figura 7-a es muy grande

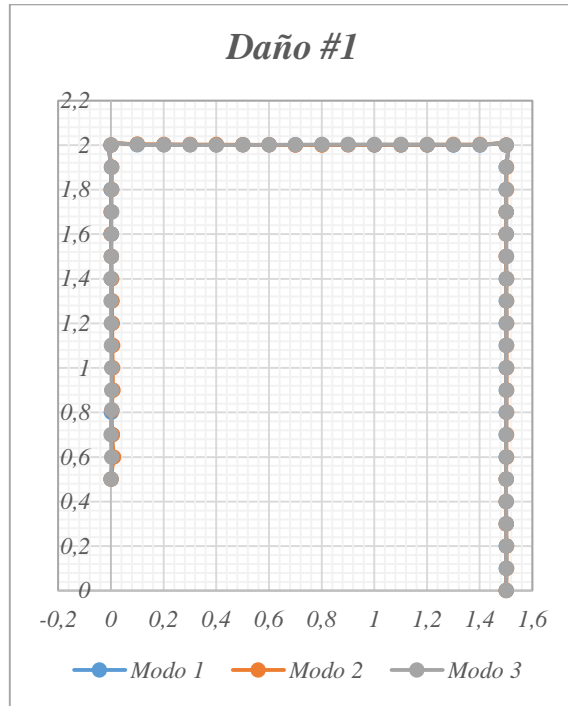
Debido a que los porcentajes utilizados anteriormente eran mayores del 10%, se evaluó la eficacia del algoritmo para detección de daño con pequeñas magnitudes de μ en los mismos elementos simulados del pórtico con 50 elementos finitos. La tabla 6 y 7 resumen los porcentajes de daños inducidos y los porcentajes de variación en las frecuencias naturales respectivamente.

Tabla 6. Porcentajes de daño menores o igual al 10%

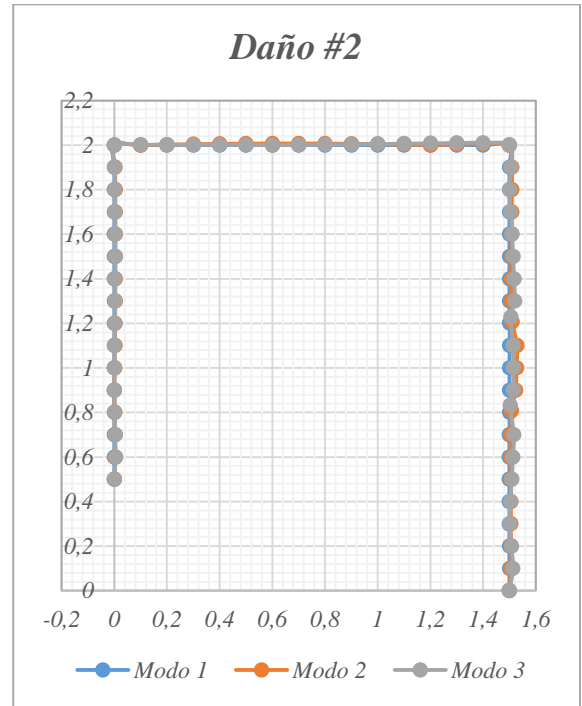
<i>Daño 1</i>		<i>Daño 2</i>		<i>Daño 3</i>		<i>Daño 4</i>	
<i>Elemento</i>	<i>Porcentaje de Daño</i>	<i>Elemento</i>	<i>Porcentaje de Daño</i>	<i>Elemento</i>	<i>Porcentaje de Daño</i>	<i>Elemento</i>	<i>Porcentaje de Daño</i>
1	8%	39	10%	22	5%	31	3%
2	8%	40	10%	23	5%	32	3%
3	8%	41	10%	24	5%	33	3%
		42	10%			34	3%

La figura 8 muestra los D.A de las curvaturas de los modos de vibración del pórtico para porcentajes de menor daño en el pórtico con 50 elementos y no permite observar el deterioro si no se maneja una adecuada escala en la gráfica. En el anexo A se muestran los elementos con deterioro, según los estados de daño inducidos, en una escala menor, demostrando que el algoritmo funciona ante cualquier cambio en las propiedades dinámicas de la estructura por muy pequeñas que sean.

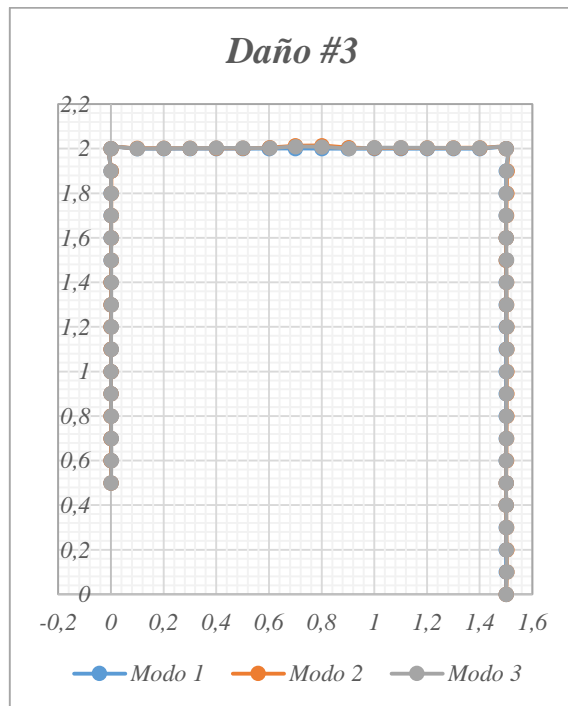
Figura 8. Diferencia absoluta de las curvaturas de las formas modales. (a) Daño 1. (b) Daño 2. (c) Daño 3 (d) Daño 4. – 50 elementos finitos – Proporciones de daños menores al 10%



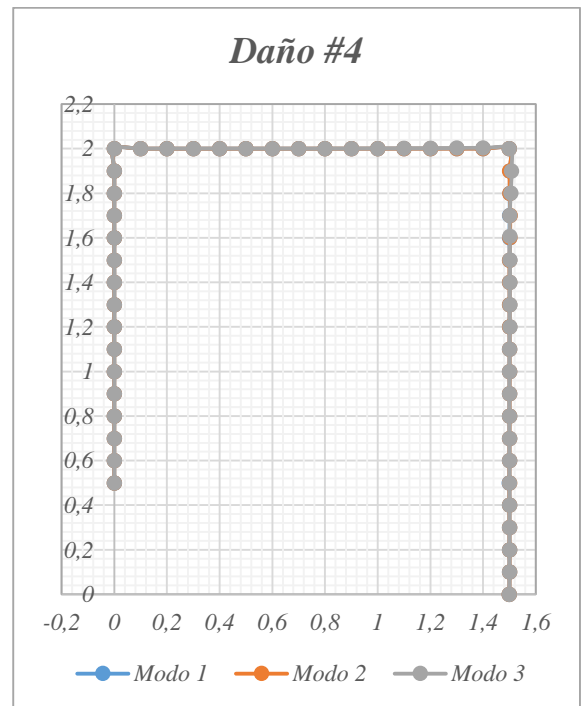
(a)



(b)



(c)



(d)

Tabla 7. Porcentaje de variación en frecuencias naturales para los tres primeros modos con proporciones de daño menores al 10% entre el pórtico con daño y el intacto. Modelo con 50 elementos.

		<i>Frecuencia [Hz]</i>								
		<i>Pórtico sin daño</i>	<i>Daño 1</i>	<i>Porcentaje de cambio</i>	<i>Daño 2</i>	<i>Porcentaje de cambio</i>	<i>Daño 3</i>	<i>Porcentaje de cambio</i>	<i>Daño 4</i>	<i>Porcentaje de cambio</i>
<i>Número de Modo</i>	1	86.69	85.73	1.11%	86.66	0.03%	86.68	0.01%	86.58	0.12%
	2	325.72	324.94	0.24%	323.13	0.80%	324.85	0.27%	325.61	0.03%
	3	427.24	426.91	0.16%	422.98	4.49%	426.73	1.81%	426.44	1.43%

3. CONCLUSIÓN

La diferencia absoluta de las curvaturas de las formas modales es un mecanismo que detecta y localiza fácilmente el daño siempre y cuando haya una correcta discretización de los elementos, debido a que si la longitud del elemento es considerada de gran tamaño puede causar unos cambios bruscos en la curvatura de los elementos cercanos y puede generar confusión al momento de concluir donde se encuentra el daño. Adicionalmente en los modos altos, las curvaturas varían un poco más haciendo visibles cambios que son difíciles de notar en los modos bajos y que podrían generar las mismas dudas de cuando se utiliza una discretización poco fina. También, se evidencia que la D.A de las curvaturas modales son más sensibles en las zonas medias de los vanos de los elementos estructurales, realizando cambios más bruscos. Finalmente, las frecuencias naturales demuestran que la estructura con variaciones en las propiedades de los materiales son sensibles al inducir un daño en cualquier elemento que las compone.

BIBLIOGRAFÍA

- ABDEL WAHAB, M.M. & DE ROECK, G., 1999. Damage detection in bridges using modal curvatures: application to a real damage scenario. *Journal of Sound and Vibration*, 226(2), pp.217–235. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022460X99922952>.
- ATIENZA PASCUAL, R., 2004. Técnicas de actualización aplicadas a la detección de daños.
- BEGAMBRE CARRILLO, O.J., 2007. Algoritmo Híbrido para Avaliação da Integridade Estrutural: uma Abordagem. *Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo*, p.162.
- BEGAMBRE CARRILLO, O.J. & ELIAS LAIER, J., 2004. Detecção de dano a partir da resposta dinâmica da estrutura: Estudo analítico com aplicação a estruturas do tipo viga. , p.112.
- CAWLEY, P. & ADAMS, R., 1979. The location of defects in structures from measurements of natural frequencies. *Journal of Strain Analysis*, 14(2), pp.49–57.
- MAECK, J. et al., 2000. Damage identification in reinforced concrete structures by dynamic stiffness determination. *Engineering Structures*, 22(10), pp.1339–1349. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029699000747>.
- MALDONADO RONDÓN, E. & CHIO CHIO, G., 2004. Análisis Sísmico De Edificaciones. In Bucaramanga, Colombia: División Editorial y de Publicaciones Uis, p. 298.
- PANDEY, A., BISWAS, M. & SAMMAN, M., 1991. Damage detection from mode changes in curvature. *Journal of Sound and Vibration*, 145(2), pp.321–332.
- PAZ, M., *Dinámica Estructural. Teoría Y Cálculo* M. Paz, ed., Editorial Reverté S.A.

- SOTELO MONROY, F.S. & ACEVEDO GUTIERREZ, J.E., 2009. Identificación de daño en pórticos 2D empleando información modal y el método Particle Swarm Optimization (PSO). *Universidad Industrial de Santander*, p.145.
- ZHAN, J.W. et al., 2011. Structural damage identification for railway bridges based on train-induced bridge responses and sensitivity analysis. *Journal of Sound and Vibration*, 330(4), pp.757–770. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022460X10005584>.

ANEXOS

Anexo A

En este apartado se sintetizan los cuatro estados de daño con un porcentaje menor o igual al 10%, generando las gráficas donde se encuentra el daño con una escala menor que permite apreciar la variación en las D.A de las curvaturas modales.

Figura 9. Diferencia absoluta de las curvaturas de formas modales. Daño 1 – 50 elementos finitos – Proporciones de daños menores al 10%.

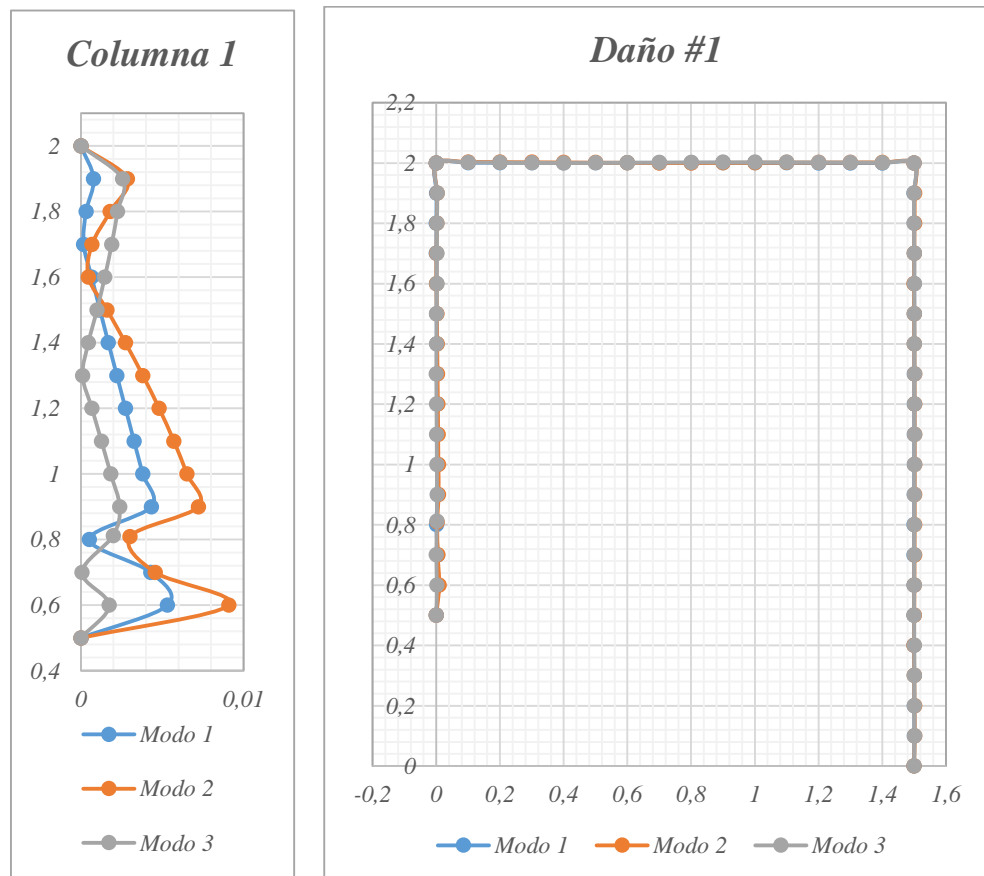


Figura 10. Diferencia absoluta de las curvaturas de formas modales. Daño 2 – 50 elementos finitos – Proporciones de daños menores al 10%.

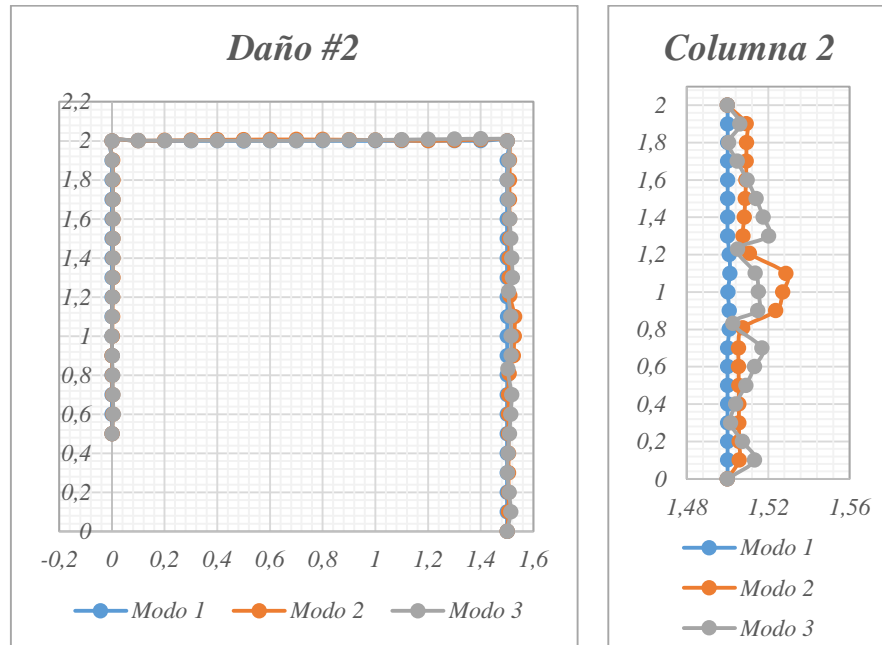


Figura 11. Diferencia absoluta de las curvaturas de formas modales. Daño 3 – 50 elementos finitos – Proporciones de daños menores al 10%.

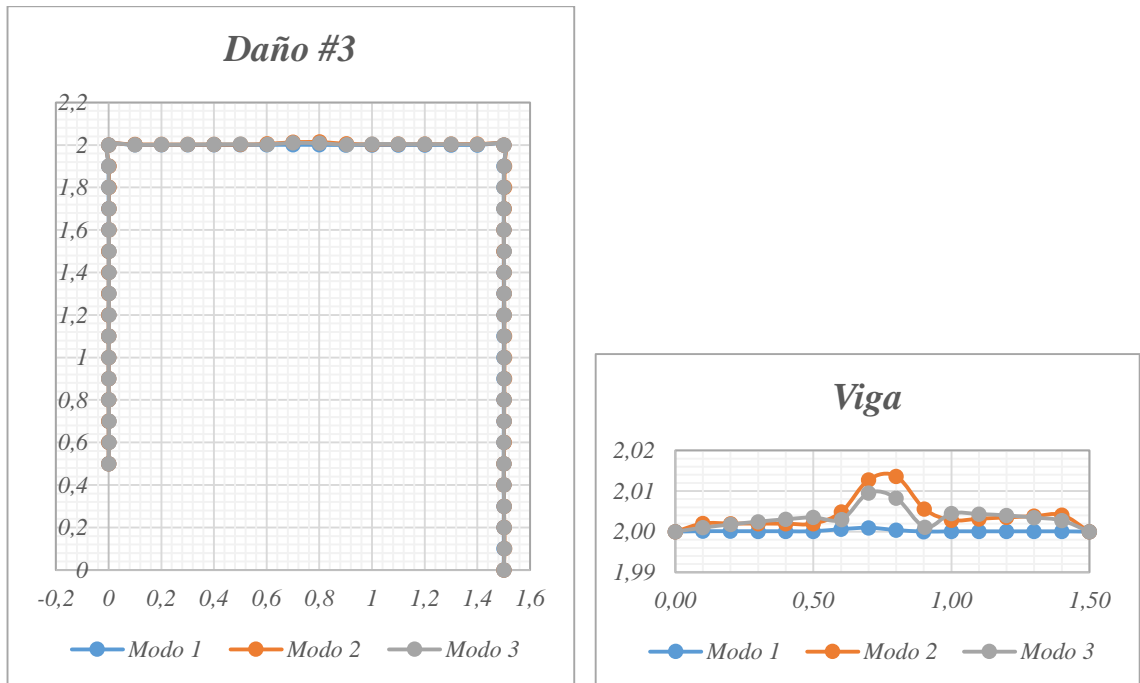
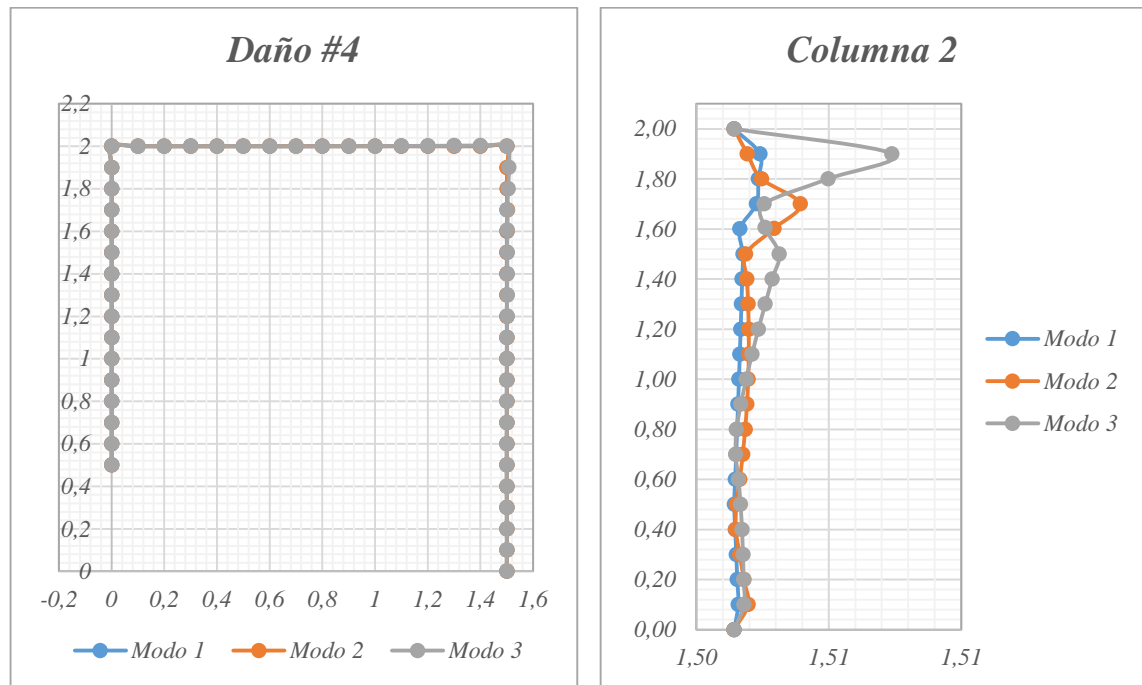


Figura 12. Diferencia absoluta de las curvaturas de formas modales. Daño 4 – 50 elementos finitos – Proporciones de daños menores al 10%.



Es evidente que si no maneja un escala adecuada puede llegar a ser muy complejo determinar las variaciones de las D.A de las curvaturas modales, lo en otras palabras seria, no detectar el daño.