



Universidad Autónoma Metropolitana  
Azcapotzalco

---

División de Ciencias Básicas e Ingeniería  
Posgrado en Ingeniería Estructural

**DETECCIÓN DE DAÑO EXPERIMENTAL  
EN MARCOS PLANOS A CORTANTE**

**TESIS**

Para obtener el grado de:

**MAESTRO EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL**

Presenta:

Ing. Roberto Moreno De la Torre

Director de tesis: Dr. Manuel E. Ruiz Sandoval Hernández

México D. F.

Julio 2011

A mis hermanas

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios por regalarme el precioso don de la vida, a mis padres Sr. Ruperto Moreno y Esperanza De la Torre por enseñarme valores y educación, a mis hermanas Marce y Coco por su amor, apoyo y comprensión.

A mi familia y amigos por su confianza y apoyo.

A la Universidad Autónoma Metropolitana por la formación que me brindó durante mi estancia en esta gran casa de estudios, a mis maestros, en especial al Dr. Manuel Ruiz Sandoval por su profesionalismo y enseñanzas para la realización de esta tesis.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por apoyar todos estos proyectos.

A todos ustedes, muchas gracias.

## ÍNDICE

**FIGURAS**.....iii

**TABLAS**.....vii

### **CAPÍTULO 1**

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1.- Descripción general del problema.....	2
1.2.- Métodos actuales para la detección de daño.....	3
1.3.- Aportaciones de esta tesis.....	5
1.4.- Objetivo.....	5

### **CAPÍTULO 2**

2.- MÉTODOS DE DETECCIÓN DE DAÑO.....	7
2.1 Inspección visual.....	7
2.2 Análisis de señal acústica.....	8
2.3 Análisis modal.....	9
2.4 Obtención de la matriz de rigidez dinámica.....	10
2.5 Método basado en la descomposición de propiedades ortogonales.....	10
2.6 Modificación del método basado en la descomposición de propiedades ortogonales. ....	11

### **CAPÍTULO 3**

3.- MODELO EXPERIMENTAL Y ANALÍTICO.....	14
3.1.- Descripción de materiales.....	14
3.2.- Consideraciones para la detección de daño.....	16
3.3.- Modelos analíticos.....	19

### **CAPÍTULO 4**

4.- METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	22
4.1 Equipo a utilizar: sensores, sistema de adquisición de datos.....	22
4.2 Pruebas realizadas.....	25

## **CAPÍTULO 5**

5.- ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN.....	30
5.1 Resultados analíticos Marco 1.....	30
5.2 Resultados experimentales Marco 1.....	36
5.3 Resultados analíticos Marco 2.....	38
5.4 Resultados experimentales Marco 2.....	41

## **CAPÍTULO 6**

6.- CONCLUSIONES.....	45
-----------------------	----

## **REFERENCIAS**

## FIGURAS

Figura 1.1. Regionalización sísmica de la República Mexicana.....	1
Figura 1.2. Zonificación del Valle de México.....	1
Figura 1.3. Estructura dañada por el huracán Karl en 2011.....	2
Figura 1.4. Inundación en Veracruz por el huracán Karl en 2011.....	2
Figura 2.1. Inspección visual.....	7
Figura 2.2. Vibrómetro monoaxial.....	8
Figura 2.3. Analizador Sinus Soundbook (analizador de vibraciones).....	9
Figura 3.1. Viga.....	14
Figura 3.2. Columna.....	15
Figura 3.3. Marco 1.....	15
Figura 3.4. Marco 2.....	15
Figura 3.5. Marco real con simulación de daño en la columna inferior derecha.....	16
Figura 3.6. Marco real con simulación de daño en la columna superior derecha.....	16
Figura 3.7. Marco con simulación de daño en la columna exterior izquierda del primer nivel.....	16
Figura 3.8. Marco con simulación de daño en la columna exterior izquierda del segundo nivel.....	16
Figura 3.9. Marco con simulación de daño en la columna exterior izquierda del tercer nivel.....	17
Figura 3.10. Marco con simulación de daño en la columna interior del primer nivel.....	17
Figura 3.11. Marco con simulación de daño en la columna interior del segundo nivel.....	17

Figura 3.12. Marco con simulación de daño en la columna interior del tercer nivel.....	17
Figura 3.13. Probeta real con 10% del área reducida.....	18
Figura 3.14. Probeta real con 20% del área reducida.....	18
Figura 3.15. Probeta real con 30% del área reducida.....	18
Figura 3.16. Probeta real con 40% del área reducida.....	18
Figura 3.17. Marco analítico con simulación de daño en la columna inferior derecha.....	19
Figura 3.18. Marco analítico con simulación de daño en la columna superior derecha.....	19
Figura 3.19. Marco analítico con simulación de daño en la columna exterior izquierda del primer nivel.....	20
Figura 3.20. Marco analítico con simulación de daño en la columna exterior izquierda del segundo nivel.....	20
Figura 3.21. Marco analítico con simulación de daño en la columna exterior izquierda del tercer nivel.....	20
Figura 3.22. Marco analítico con simulación de daño en la columna central del primer nivel.....	20
Figura 3.23. Marco analítico con simulación de daño en la columna central del segundo nivel.....	21
Figura 3.24. Marco analítico con simulación de daño en la columna central del tercer nivel.....	21
Figura 4.1. Acondicionador de señales.....	24
Figura 4.2. Sistema de adquisición de datos SigLab.....	24

Figura 4.3. Acelerómetro sísmico piezoeléctrico.....	24
Figura 4.4. Colocación de sensores en el marco 1 según Argueta.....	25
Figura 4.5. Primer arreglo de sensores en el marco 1.....	26
Figura 4.6. Segundo arreglo de sensores en el marco 1.....	26
Figura 4.7. Tercer arreglo de sensores en el marco 1.....	26
Figura 4.8. Simulación de daño en columna inferior del marco 1.....	26
Figura 4.9. Simulación de daño en columna superior del marco 1.....	26
Figura 4.10. Colocación de sensores en el marco 2 según Argueta.....	27
Figura 4.11. Primer arreglo para el marco 2.....	27
Figura 4.12. Segundo arreglo para el marco 2.....	27
Figura 4.13. Tercer arreglo de sensores para el marco 2.....	27
Figura 4.14. Cuarto arreglo de sensores para el marco 2.....	27
Figura 4.15. Quinto arreglo de sensores para el marco 2.....	27
Figura 4.16. Sexto arreglo de sensores para el marco 2.....	27
Figura 4.17. Séptimo arreglo de sensores para el marco 2.....	27
Figura 4.18. Octavo arreglo de sensores para el marco 2.....	27
Figura 4.19. Procesamiento de la información del marco 1.....	28
Figura 4.20. Procesamiento de la información del marco 2.....	29
Figura 4.21. Colocación de sensores.....	29
Figura 5.1. Ruido blanco.....	30
Figura 5.2. Registro de aceleraciones del marco 1.....	31

Figura 5.3. Registro de aceleraciones del marco 2.....	32
Figura 5.4. Proceso de envío de información de los sensores al nodo líder.....	34
Figura 5.5. Nodos líder.....	34

## TABLAS

Tabla 5.1. Matriz de desplazamientos horizontales del marco real 1 sin daño.....	33
Tabla 5.2. Matriz R del nodo 1 sin daño.....	34
Tabla 5.3. Matriz R del nodo 1 con 30% de simulación de daño.....	34
Tabla 5.4. Relación de las matrices R en el marco analítico sin daño y con simulación de daño en la columna superior derecha.....	35
Tabla 5.5. Relación de las matrices R en el marco analítico sin daño y con simulación de daño en la columna inferior derecha.....	36
Tabla 5.6. Relación de las matrices R en el marco real sin daño y con simulación de daño en la columna superior derecha.....	36
Tabla 5.7. Relación de las matrices R en el marco real sin daño y con simulación de daño en la columna inferior derecha.....	37
Tablas 5.8. Resumen del marco 1 analítico y real.....	37
Tabla 5.9. Relación de las matrices R en el marco analítico sin daño y con simulación de daño en la columna central de planta baja.....	38
Tabla 5.10. Relación de las matrices R en el marco analítico sin daño y con simulación de daño en la columna exterior izquierda de planta baja.....	38
Tabla 5.11. Relación de las matrices R en el marco analítico sin daño y con simulación de daño en la columna central del primer nivel.....	39
Tabla 5.12. Relación de las matrices R en el marco analítico sin daño y con simulación de daño en la columna exterior izquierda del primer nivel.....	39
Tabla 5.13. Relación de las matrices R en el marco analítico sin daño y con simulación de daño en la columna central del segundo nivel.....	40
Tabla 5.14. Relación de las matrices R en el marco analítico sin daño y con simulación de daño en la columna central del segundo nivel.....	40

Tabla 5.15. Relación de las matrices R en el marco real sin daño y con simulación de daño en la columna central de planta baja.....	41
Tabla 5.16. Relación de las matrices R en el marco real sin daño y con simulación de daño en la columna exterior izquierda de planta baja.....	41
Tabla 5.17. Relación de las matrices R en el marco real sin daño y con simulación de daño en la columna central del primer nivel.....	42
Tabla 5.18. Relación de las matrices R en el marco real sin daño y con simulación de daño en la columna exterior izquierda del primer nivel.....	42
Tabla 5.19. Relación de las matrices R en el marco real sin daño y con simulación de daño en la columna exterior izquierda del primer nivel.....	43
Tabla 5.20. Relación de las matrices R en el marco real sin daño y con simulación de daño en la columna exterior izquierda del segundo nivel.....	43
Tablas 5.21. Resumen del marco 2 analítico y real.....	44

# Capítulo 1

## 1.- Introducción

La geología de la República Mexicana ha sido producto de muchos procesos tectónicos que la han modificado a través del tiempo. En la actualidad la configuración geográfica de México es consecuencia de la interacción del bloque continental con las regiones oceánicas que lo rodean. El movimiento relativo entre estas placas ocasiona uno de los peligros sísmicos y volcánicos más altos del mundo. Este tiene mayor ocurrencia en las costas del Pacífico entre las ciudades de Puerto Vallarta y Tapachula (figura 1.1). En estas regiones no sólo se producen sismos con mayor frecuencia, sino también los de mayor magnitud registrada en el país. Por su cercanía a las costas no sólo representan un grave peligro para estas zonas ya que también afectan a la Ciudad de México, como se ha constatado durante los grandes sismos de 1911, 1957, 1979 y 1985. La influencia de los sismos costeros sobre la ciudad se debe a las condiciones del suelo locales (figura 1.2).



Figura 1.1. Regionalización sísmica de la República Mexicana  
[http://www.ssn.unam.mx/website/jsp/region\\_sismica\\_mx.jsp](http://www.ssn.unam.mx/website/jsp/region_sismica_mx.jsp)

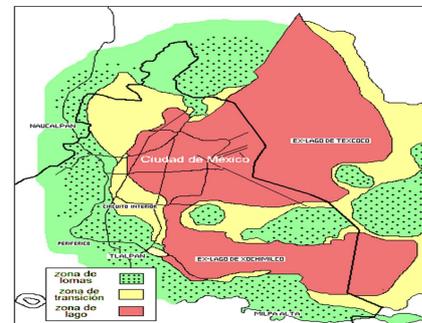


Figura 1.2. Zonificación del Valle de México  
[http://www.ssn.unam.mx/website/jsp/region\\_sismica\\_mx.jsp](http://www.ssn.unam.mx/website/jsp/region_sismica_mx.jsp)

Debido a la vulnerabilidad del territorio Mexicano frente a la actividad sísmica, y otro tipo de fenómenos naturales, es indispensable contar con una infraestructura adecuada. La interrupción o pérdida de ésta llevaría a un gran déficit económico dentro del país o región. Al enfocarse específicamente a obras públicas es deseable que, después de un evento sísmico, los hospitales deban mantenerse en operación ante cualquier emergencia, así como aeropuertos, autopistas, etc.

## 1.1 Descripción general del problema

Todas las estructuras sufren algún tipo de daño durante su vida útil. La actividad sísmica en México representa uno de los mayores peligros para gran parte del territorio. También, existen otro tipo de fenómenos naturales que pueden afectar seriamente los servicios e infraestructura de cualquier lugar como son: huracanes (figura 1.3), lluvia e inundaciones (figura 1.4).



Figura 1.3. Estructura dañada por el huracán Karl en 2011  
<http://www.jornadaveracruz.com.mx/Noticia.aspx?ID=110222>



Figura 1.4. Inundación en Veracruz por el huracán Karl en 2011  
<http://www.google.com/imgres?imgurl=http://bocadelrio.com>

La detección oportuna del daño es un aspecto muy importante desde el punto de vista de la funcionalidad y seguridad de estas estructuras. La inspección y mantenimiento en ciertos periodos de tiempo puede ser muy conveniente, ya que aumenta la seguridad como la confiabilidad de las estructuras, al mismo tiempo se obtiene el conocimiento necesario para prolongar su vida útil y mejorar los intervalos de servicio. También, con el seguimiento del comportamiento estructural, se mejora el conocimiento teórico para poder compararlo con la realidad.

Si el daño en una estructura puede ser localizado se puede observar su progreso, su historia de su ocurrencia, gravedad y extensión. Con esto se podría permitir que los elementos puedan ser reparados o reemplazados antes de que alcancen un estado peligroso o una falla futura más costosa poniendo en riesgo vidas humanas y en general el alto costo que conlleva.

Para poder realizar una adecuada detección de daño se debe tener información instrumental de las estructuras.

La importancia de la instrumentación de edificios permite evaluar cuantitativamente las excitaciones que han ejercido los sismos sobre las estructuras, y por consiguiente la respuesta de las mismas. Este tema ha cobrado mucho interés en las últimas décadas y las investigaciones realizadas en otros países son de gran utilidad, sin embargo, es necesario instrumentar edificios en nuestro medio debido a las particularidades del suelo del Valle de México.

Con el propósito de determinar el comportamiento sísmico o dinámico de una estructura, se colocan diferentes tipos de sensores dependiendo de la magnitud física que se quiera registrar, ya sea aceleración, velocidad o desplazamiento. Por lo general, la aceleración es la magnitud que más se utiliza para determinar el comportamiento sísmico o dinámico de dichas estructuras.

Así, un sistema de registro de aceleraciones está formado por una red de sensores que se colocan en diversos puntos de la estructura, los cuales envían la información a una central de registro.

## 1.2 Métodos actuales de detección de daño

El interés en dar seguimiento al estado físico de una estructura y poder detectar el daño en un estado prematuro, es un tema que ha tomado mucha importancia en las últimas décadas. Si el daño no es ubicado y corregido, se pone en peligro la seguridad de la estructura y por ende la de sus habitantes. Algunos métodos de detección de daño son simplemente visuales y otros experimentales, tales como: métodos acústicos, métodos con base en campos magnéticos, métodos radiográficos y térmicos. Cada uno de ellos tiene sus ventajas y desventajas, haciendo que no exista una técnica en particular que sea mejor que otra.

Entre los métodos más comunes utilizados en la actualidad se encuentran los siguientes:

- a) Inspección visual
- b) Análisis de señal acústica
- c) Análisis modal
- d) Obtención de la matriz de rigidez dinámica.
- e) POD (Proper Orthogonal Decomposition)

Los métodos anteriores, (en particular el inciso a y b) cuentan con la ventaja de ser técnicas no destructivas; sin embargo, se requiere que la parte dañada de la estructura se encuentre en una zona accesible, o por lo menos visible. Debido a que esto no es común, se tiene la necesidad de desarrollar técnicas de detección de daño que se puedan aplicar a estructuras que registren cambios en sus propiedades dinámicas.

La condición principal de los métodos de detección de daño, que utilizan cambios en las propiedades dinámicas, es que los parámetros modales (frecuencias fundamentales, modos de vibrar y amortiguamiento modal), son función de las propiedades físicas de la estructura como: rigidez, masa y amortiguamiento.

Así, los cambios en las propiedades físicas de la estructura, como la rigidez, provocarán cambios en las propiedades modales.

Franco (2006) menciona que estudios aplicados a puentes hechos por: Salane *et al*, Kato y Shimada, Turner y Pretlove, Spyrakos *et al*, han mostrado que los valores de las frecuencias y amortiguamientos no son parámetros muy sensibles para bajos niveles de daño; sin embargo, cambios en los modos de vibrar que fueron determinados experimentalmente reflejan ser indicadores más sensibles para la detección de daño. Estos estudios también han demostrado que los cambios en las propiedades dinámicas pueden ocurrir debido a la presencia de ruido en la señal durante las pruebas de vibración ambiental, y pueden ser tan importantes como los que han sido producidos por el daño. Estas incertidumbres pueden ser por ejemplo: temperatura y/o viento, y que deben tomarse en cuenta para que se pueda determinar si un cambio en cierto parámetro es lo suficientemente revelador para detectar daño o es atribuido a variaciones naturales en las mediciones.

Debido a que, en la aplicación de detección de daño en estructuras se encuentra implícito el proceso de calibrar un modelo analítico de la estructura real, en el presente trabajo se emplean modelos hechos en MatLab® 2007a para ajustar los modelos a escala de marcos planos a cortante con el fin de que represente la respuesta de las estructuras reales.

### 1.3.- Aportaciones de esta tesis

En este trabajo se estudian métodos para detección de daño que utilizan los registros obtenidos de pruebas de vibración ambiental. Lo que se busca es detectar

daño en las columnas de modelos a escala de marcos planos a cortante mediante la correlación entre los registros obtenidos de un modo de vibrar en particular. Cada uno de estos vectores representa la energía capturada de cada modo de vibrar de en un estado con o sin daño.

Se seleccionó el Método Proper Orthogonal Decomposition (POD) ya que, mediante los criterios que se describirán posteriormente, se tiene la posibilidad de detectar cambios en las propiedades dinámicas de las estructuras estudiadas. Este cambio representa variaciones en las propiedades físicas (rigidez), lo que se puede interpretar como daño estructural.

Para lograr lo anterior, en el presente trabajo se realiza lo siguiente:

- Investigación de métodos de detección de daño.
- Investigación de trabajos previos.
- Descripción de los modelos empleados
- Descripción del daño estructural inducido en los modelos
- Evaluar un criterio de calibración de modelos analíticos de las estructuras
- Emplear estos modelos en la detección de daño
- Presentación de resultados, conclusiones y recomendaciones derivadas del estudio realizado.

Las consideraciones anteriores permiten establecer como objetivos de la tesis:

## 1.4 Objetivo de la tesis

### **Objetivo general:**

Detectar experimentalmente el daño inducido a columnas en marcos planos a cortante.

### **Objetivos específicos:**

Detectar el daño experimentalmente por medio de registros de aceleraciones en las estructuras.

Comparar el daño de los resultados experimentales con el método analítico.

Esta tesis está organizada de la siguiente manera:

En el capítulo 1, se plantea la descripción general del problema y la importancia de la detección de daño estructural en una infraestructura.

En el capítulo 2, se describen algunos de los métodos más comunes para la detección de daño en estructuras.

En el capítulo 3, se especifican los materiales utilizados en los modelos de marcos a escala. Se plantean los modelos experimentales y analíticos así como las consideraciones para la detección de daño.

En el capítulo 4, se explica la metodología experimental, especificaciones del sistema de adquisición de datos y sensores, así como las pruebas realizadas en los marcos para la detección de daño.

En el capítulo 5, se aplica la metodología modificada del POD a los modelos a escala, y se presentan resultados de la de la misma.

En el capítulo 6, se presentan las conclusiones y recomendaciones derivadas de la aplicación de la metodología modificada para la detección experimental de marcos planos. También se presentan recomendaciones para trabajos futuros.

## Capítulo 2

### 2.-Métodos para la detección de daño

Como se mencionó en el capítulo 1, existen diferentes métodos de detección de daño. Estos se describirán brevemente en las siguientes secciones.

#### 2.1 Inspección visual

La inspección visual es un procedimiento somero que consiste en una revisión ocular (figura 2.1) de toda la estructura para lograr identificar los daños existentes (Iglesias *et al* 1985).

Las principales ventajas de la inspección visual y óptica son:

- Casi todo puede ser inspeccionado (en cierto grado).
- Puede ser de muy bajo costo.
- Normalmente se necesita equipo relativamente simple.
- Se requiere un mínimo de entrenamiento.

Las principales limitaciones de la inspección visual son:

- Solamente pueden ser evaluadas las condiciones superficiales.
- Se requiere una fuente efectiva de iluminación.
- Es necesario el acceso a la superficie que requiere ser inspeccionada.



Figura 2.1. Inspección visual  
<http://www.google.comsearchum=inspeccion+ocula>

## 2.2 Análisis de señal acústica

Los análisis de señal acústica están basados en la generación de ondas acústicas (esfuerzo elástico o de presión) por el proceso de la rápida propagación de una microfalla u otro tipo de fuentes de energía mecánica. Se colocan sensores piezoeléctricos, altamente sensibles, que detectan la señal emitida desde el punto inicial por movimiento superficial dinámico y la convierten en una señal eléctrica (figura 2.2). La técnica de emisión acústica es una medida del tiempo real y de evaluación en línea. Básicamente proporciona información tal como: "cuándo" (tiempo, parámetro de carga externa), "cuánto" (proporción), "intensidad" (amplitud, energía) y "dónde" (localización de las fuentes de emisión acústica).

Si existe un desarrollo del defecto o falla en el cuerpo estudiado, la emisión acústica revelará su existencia durante su crecimiento. Si alguna falla sucede o se propaga, la tecnología de emisión acústica evalúa la posibilidad del desarrollo de grietas al detectar las ondas elásticas que son generadas en el material, daños que no son audibles ni visibles al ser humano. En los últimos años la demanda del empleo de la tecnología de emisión acústica ha aumentado para su aplicación en materiales compuestos, sin embargo, debido a la heterogeneidad de los materiales compuestos, los procesos de fractura son extremadamente complejos. La emisión acústica ha probado ser un excelente método de caracterización no destructiva para el control del daño y la inspección periódica en servicio de materiales basados en matrices plásticas. Sus ventajas lo han llevado al establecimiento de diversos procedimientos estándares para evaluar la importancia de los defectos identificando los sitios de inicio, la propagación y el desarrollo de las fallas hasta la fractura (Cauch-Cupul 2007).



Figura 2.2. Vibrometro monoaxial  
<http://www.google.com/search?um=analisis+de+se%C3%B1a+l+acustica+en+un+edificio&aq=f&aqi=&aql=&oq=>

## 2.3 Análisis modal

En un Análisis modal el objetivo es determinar las formas modales naturales y frecuencias de una estructura en vibración libre (figura 2.3). Es común usar el Método de los Elementos Finitos (MEF) para desempeñar el análisis porque la estructura que se analiza puede tener formas arbitrarias y los resultados de los cálculos pueden ser aceptables. Los tipos de ecuaciones que surgen del análisis modal son vistas en sistemas propios. Los valores y vectores propios, se obtienen de resolver los sistemas y representan las frecuencias y formas modales correspondientes. A veces, las únicas modalidades deseadas son las de menores frecuencias porque pueden ser las modalidades más prominentes a las cuales la estructura vibra.

Esto es también posible para probar una estructura real, y así determinar sus frecuencias naturales y las formas modales. A esto se denomina análisis modal experimental. Los resultados de las pruebas físicas pueden usarse para calibrar un modelo de elemento finito, para determinar si las hipótesis hechas fueron correctas.



Figura 2.3. Analizador Sinus Soundbook (analizador de vibraciones)  
<http://www.google.com/search?q=analisis+modal&aq=f&aql=&aqi=&aql=&aqi=&aql=>

## 2.4 Obtención de la matriz de rigideces dinámicas

Para caracterizar una estructura dinámicamente se necesita ante todo definir sus modos propios, los cuales son independientes de las cargas aplicadas y únicamente definidos por las rigideces (por lo tanto, también por las condiciones de contorno) y la distribución másica.

Los modos propios se determinan solucionando un problema de autovalores y autovectores, donde la matriz asociada al sistema es la matriz de rigidez “dinámica” del sistema. Cada frecuencia propia de la estructura (eigenvalores) está asociada a una forma modal (eigenvector) definida al menos por una constante de proporcionalidad (FEMCAE, 2010).

## 2.5 Método POD (Proper Orthogonal Decomposition)

El método Proper Orthogonal Decomposition (POD) llamado también Karhunen-Loève fue desarrollado por Galvanetto y Violaris (2007). Este método identifica la respuesta oscilante de sistemas dinámicos con la ayuda de sensores de desplazamiento. Para desarrollar el método, se utilizó una viga en voladizo discretizada en elementos pequeños simulando el daño con la disminución de rigidez y masa de la estructura.

La aplicación del POD requiere de la adquisición experimental de desplazamientos o aceleraciones de  $N$  localizaciones de una sistema dinámico donde los valores recolectados de los desplazamientos en cada tiempo  $t$  son llamados  $d_1(t)$ ,  $d_2(t)$ ,  $d_3(t)$ ...  $d_n(t)$ . Si los desplazamientos son muestreados por el tiempo  $M$ , un arreglo de la historia de desplazamientos en un punto localizado  $i$  es  $d_i(t) = [d_i(t_1), d_i(t_2), \dots, d_i(t_n)]^T$  para  $i = 1, 2, 3, \dots, N$ . En el método POD la historia de desplazamientos son normalizados restándole el valor medio  $\bar{d}_i$ , donde los vectores  $a_i$  son formados por la ecuación 2.1:

$$a_i = d_i - \bar{d}_i \quad (2.1)$$

donde  $\mathbf{1}$  es un vector de dimensión  $M$  con todos sus componentes iguales a la unidad. Los vectores  $a_i$  se usan para obtener la matriz  $A$  de dimensión  $M \times N$  (ecuación 2.2).

$$A = \begin{pmatrix} a_1(t_1) & a_2(t_1) & \dots & a_N(t_1) \\ a_1(t_2) & a_2(t_2) & \dots & a_N(t_2) \\ \cdot & \cdot & & \cdot \\ \cdot & \cdot & & \cdot \\ \cdot & \cdot & & \cdot \\ a_1(t_M) & a_2(t_M) & \dots & a_N(t_M) \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

Con la matriz  $A$  se puede construir una matriz de correlación  $R$ :

$$R = (1/M) A^T A \quad (2.3)$$

La matriz  $R$  es real y simétrica de orden  $N \times N$  por lo tanto los eigenvectores forman una base ortogonal que son los proper orthogonal modes (POMs), esta base capturan la energía de cada modo de vibrar y los proper orthogonal values (POVs) que son un índice de participación de cada modo. La diferencia entre los proper orthogonal modes (POMs) de la estructura sin y con daño determina la ubicación del daño en el elemento.

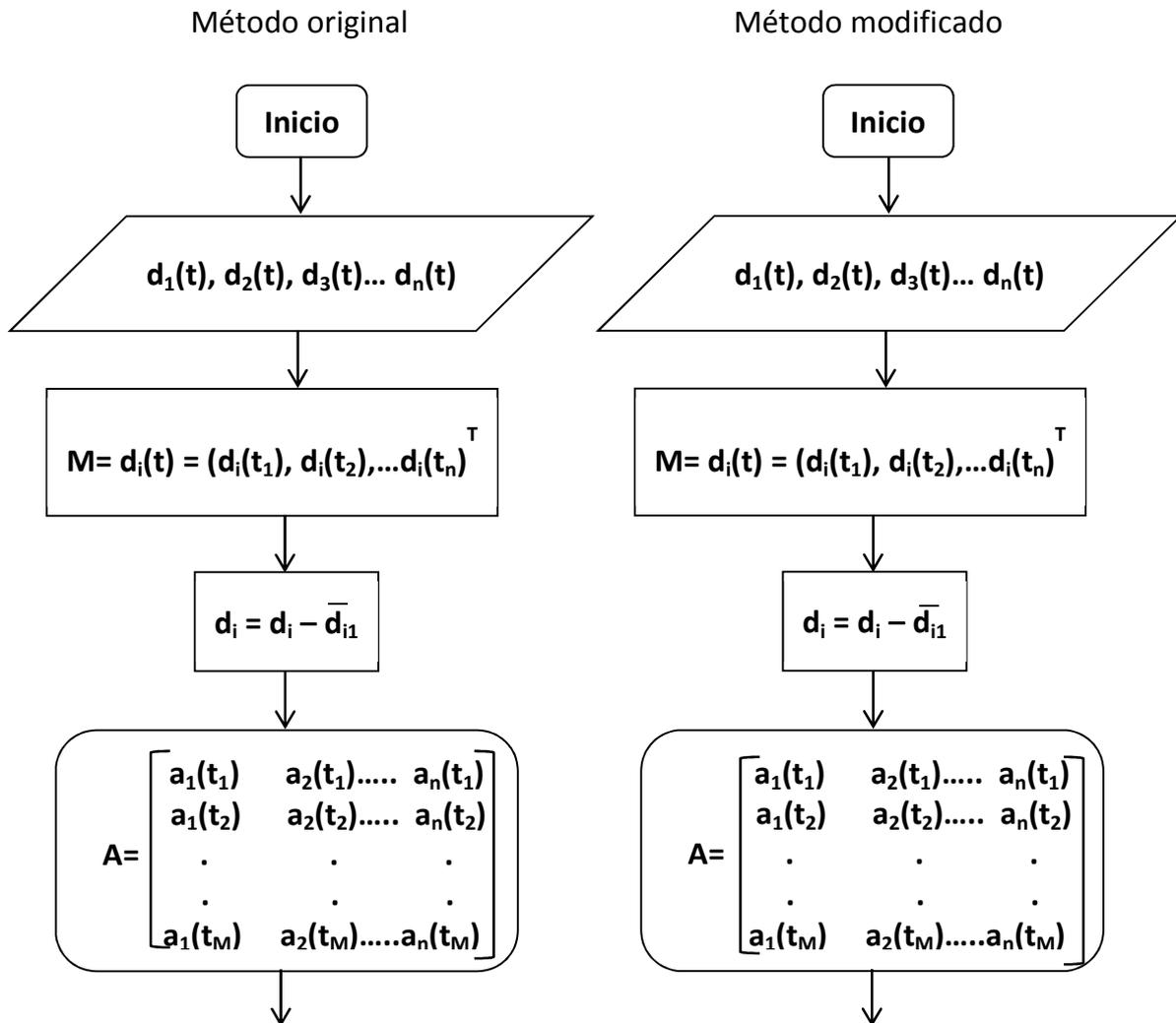
## 2.6 Modificación del método Proper Orthogonal Decomposition (POD)

Carpio (2009) realizó diversos análisis para comprobar la eficacia de algunos métodos. En particular para el método POD obtuvo los proper orthogonal modes (POMs) y los proper orthogonal values (POVs). Al aplicarlo a marcos planos a cortante obtuvo algunos resultados no positivos en la localización del daño estructural. Carpio realizó adecuaciones a dicho método. Con estas modificaciones se pudo localizar el daño en columnas de marcos planos a cortante.

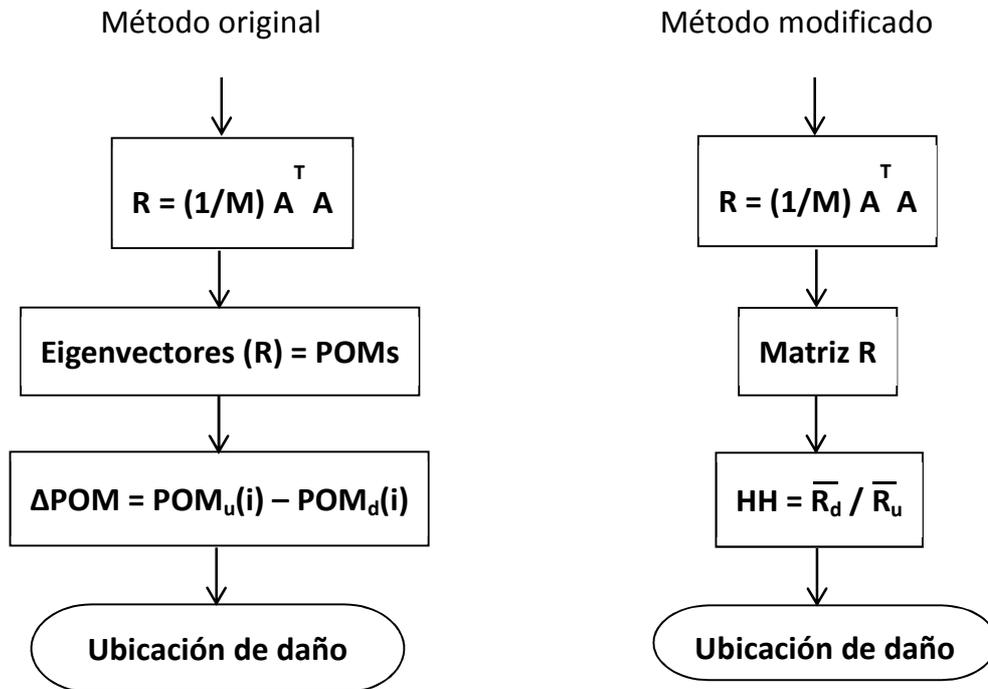
El método POD propuesto en esta tesis es idéntico al método original hasta la obtención de la matriz de correlación (matriz  $R$ ). En el caso del método modificado por Carpio, la matriz  $R$  se obtiene multiplicando la matriz  $A$  por su transpuesta. Esto de igual manera, es la base que captura la energía de cada modo de vibrar. Se

calculan los valores de R con y sin daño de las estructuras, aunado a los criterios usados por Carpio, se puede determinar la ubicación del daño en la estructura.

Los siguientes diagramas de flujo resumen el procedimiento que determina la ubicación de daño en la estructura. El diagrama de la izquierda sintetiza el método original, y el de la derecha el modificado por Carpio. Los subíndices u y d en la matriz de correlación R significan sin daño (undamage) y dañado (damage) respectivamente.



Continuación de los diagramas de flujo:



En este capítulo se presentaron algunos de los métodos utilizados para la obtención de daño. En el siguiente capítulo se presentará la descripción de los modelos experimentales que serán utilizados en este estudio.

## Capítulo 3

### 3. MODELO EXPERIMENTAL Y ANALÍTICO

#### 3.1 Descripción de materiales

Para la realización de este estudio se utilizaron dos marcos a cortante. Los dos marcos son a escala. El primero de ellos consta de una crujía y dos niveles. El segundo tiene dos crujías y tres niveles. Se define un marco de cortante como una estructura en la que no existe rotación de ninguna sección horizontal al nivel de las losas de entrepiso. Para poder considerar un marco de cortante se hacen las siguientes suposiciones:

- ✓ La masa se concentra a la altura de las losas de entrepiso.
- ✓ Las trabes son infinitamente rígidas en flexión en comparación con las columnas.
- ✓ La deformación de la estructura es independiente de las fuerzas axiales en las columnas.

Los marcos se construyeron de tal manera que cumplieran estas condiciones. Las vigas y columnas son de acero inoxidable, las primeras son placas de 1/2" de espesor, esto como ya se mencionó, con el fin de darle la característica de elemento infinitamente rígido en comparación de las columnas. La dimensiones se muestran a continuación (figura 3.1)

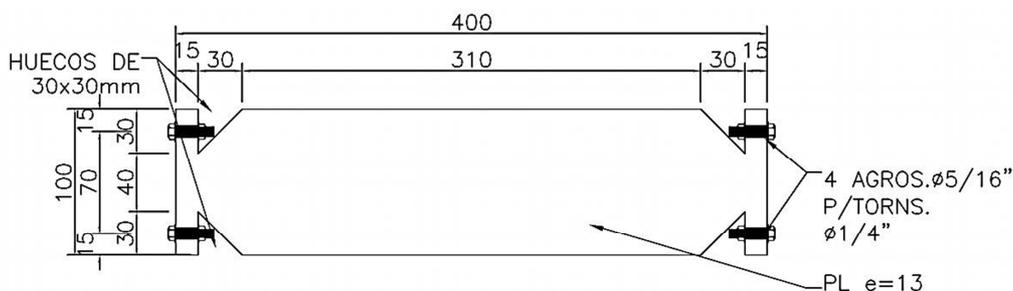


Figura 3.1. Viga

Para los elementos columnas se eligió un acero calibre 16 llamado “spring steel”. Este material puede flexionarse con mucha facilidad sin salir de su rango elástico. Se trazaron las dimensiones de los orificios con tal de cubrir perfectamente la distancia de entrepiso y dejando siempre una distancia adecuada al borde para evitar su falla. El detalle de este elemento se da a continuación (figura 3.2).

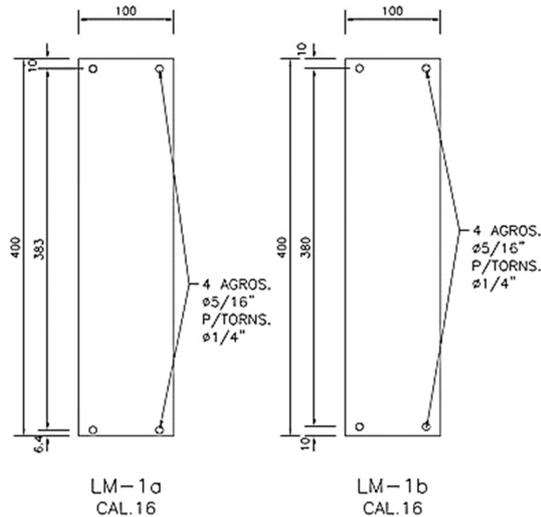


Figura 3.2. Columna

Los modelos ya ensamblados son como los que se muestran a continuación (figuras 3.3 y 3.4)



Figura 3.3. Marco 1



Figura 3.4. Marco 2

## 3.2 Consideraciones para la detección de daño

La principal consideración para la detección de daño en los marcos es el cambio en el área de las columnas. Esto produce un cambio en su rigidez. En las figuras 3.5 y 3.6 se muestra el marco 1 con las columnas con el cambio de dimensiones.

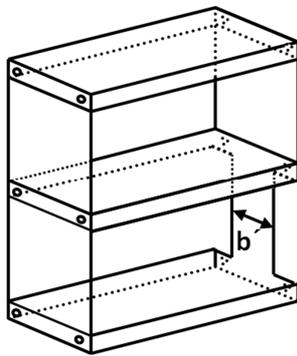


Figura 3.5. Marco real con simulación de daño en la columna inferior derecha.

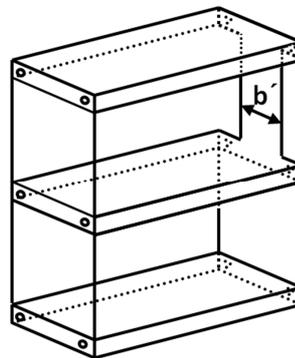


Figura 3.6. Marco real con simulación de daño en la columna superior derecha.

De igual forma para el marco 2 se reduce el área de sus columnas como se muestra en las figuras 3.7 a 3.12.

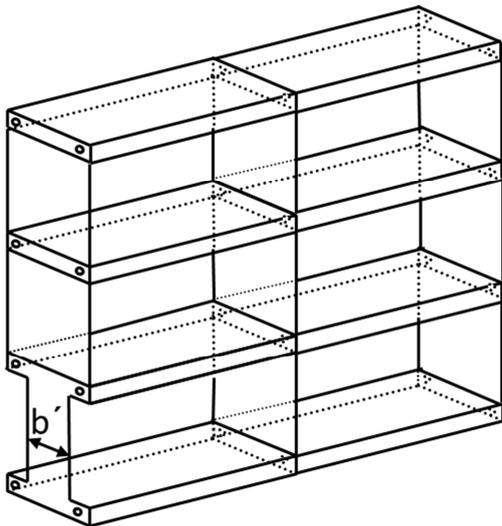


Figura 3.7. Marco con simulación de daño en la columna exterior izquierda del primer nivel.

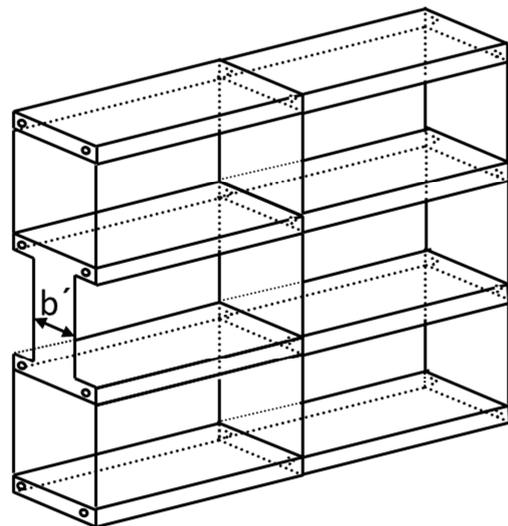


Figura 3.8. Marco con simulación de daño en la columna exterior izquierda del segundo nivel.

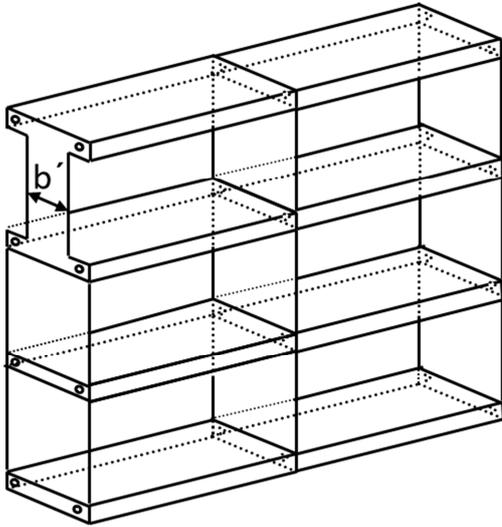


Figura 3.9. Marco con simulación de daño en la columna exterior izquierda del tercer nivel.

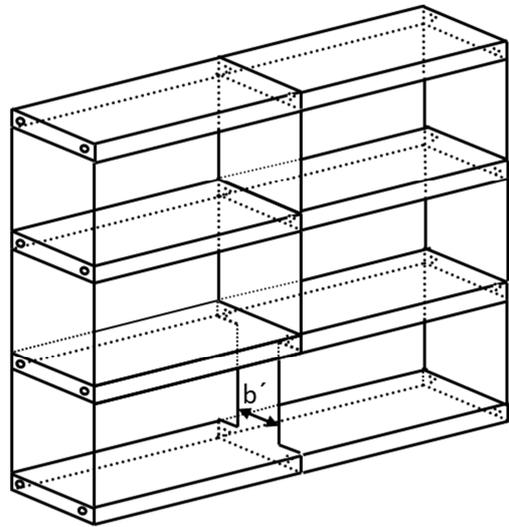


Figura 3.10. Marco con simulación de daño en la columna interior del primer nivel.

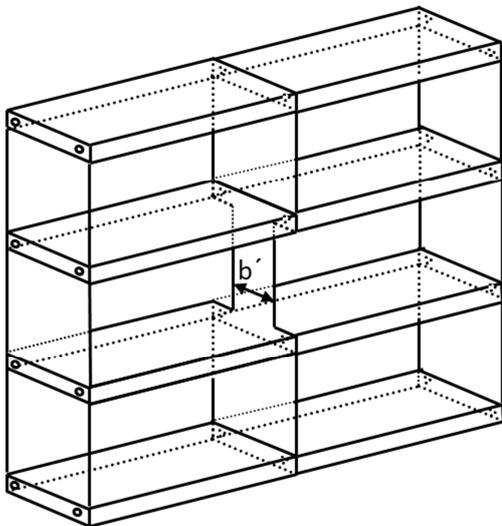


Figura 3.11. Marco con simulación de daño en la columna interior del segundo nivel.

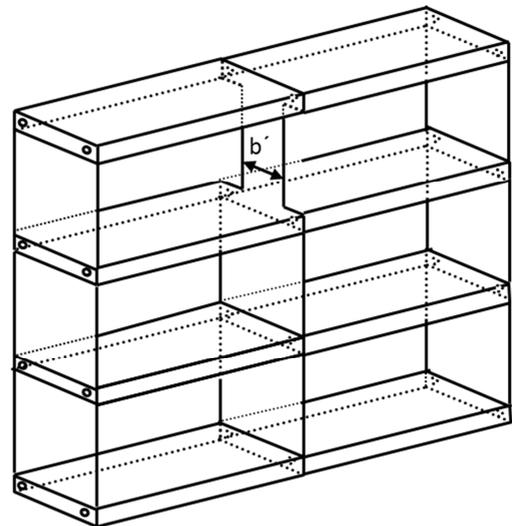


Figura 3.12. Marco con simulación de daño en la columna interior del tercer nivel.

Las probetas utilizadas en los experimentos tienen una disminución del área de 10%, 20%, 30% y 40% de la original. Las siguientes imágenes muestran las probetas reales con sus respectivas áreas disminuidas (figuras 3.13 a 3.16).



Figura 3.13. Probeta real con 10% del área reducida.



Figura 3.14. Probeta real con 20% del área reducida.



Figura 3.15. Probeta real con 30% del área reducida.



Figura 3.16. Probeta real con 40% del área reducida.

### 3.3 Modelos analíticos

Se realizó un programa, en el lenguaje de MatLab®2007a que simula matemáticamente a las estructuras en estudio. Se realizó usando elementos barra con rigidez axial y rotacional. El programa ensambla la matriz de rigideces, así como de masa.

De acuerdo con Argueta (2009), se recomienda usar una instrumentación a mitad de altura, y de cada viga.

Se realizó la solución de la estructura por el método de Newmark para obtener sus desplazamientos, velocidades y aceleraciones en cierto grado de libertad.

Para obtener las respuestas en cada uno de esos puntos se simuló una excitación de ruido blanco en su base.

En las figuras 3.17 a 3.24 se presentan los modelos matemáticos de cada una de las simulaciones. Se aprecian los números de nodo, así como número de elementos. Los colores de cada barra representan diferentes materiales. Todas la vigas tienen el mismo material; sin embargo, en las columnas, una tendrá un material diferente de las demás. En esta se busca representar el daño con una disminución de área. El listado del programa se presenta en el anexo 1 de esta tesis.

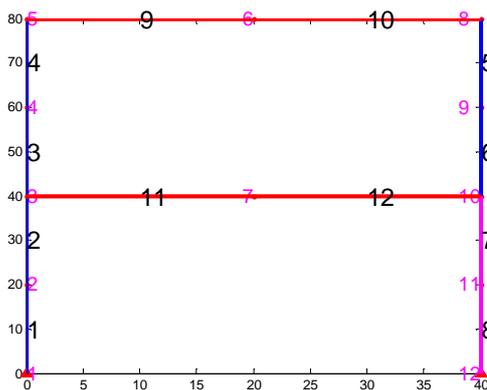


Figura 3.17. Marco analítico con simulación de daño en la columna inferior derecha.

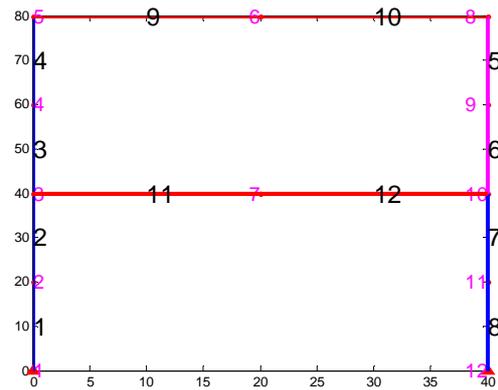


Figura 3.18. Marco analítico con simulación de daño en la columna superior derecha.

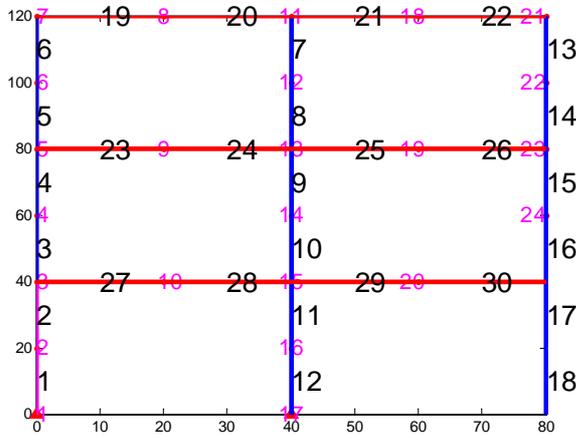


Figura 3.19. Marco analítico con simulación de daño en la columna exterior izquierda del primer nivel.

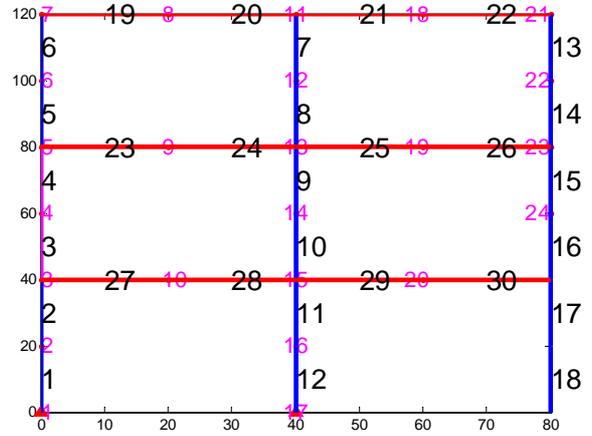


Figura 3.20. Marco analítico con simulación de daño en la columna exterior izquierda del segundo nivel.

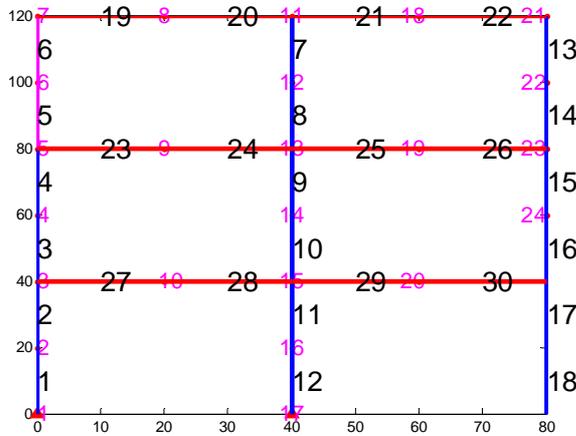


Figura 3.21. Marco analítico con simulación de daño en la columna exterior izquierda del tercer nivel.

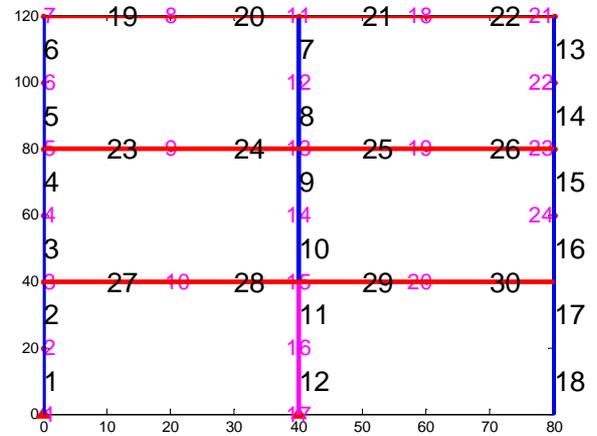


Figura 3.22. Marco analítico con simulación de daño en la columna central del primer nivel.

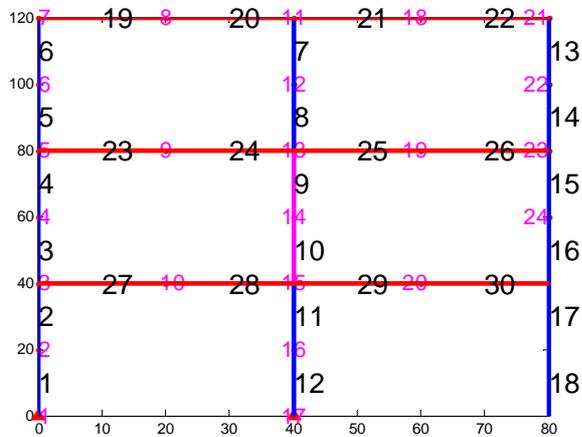


Figura 3.23. Marco analítico con simulación de daño en la columna central del segundo nivel.

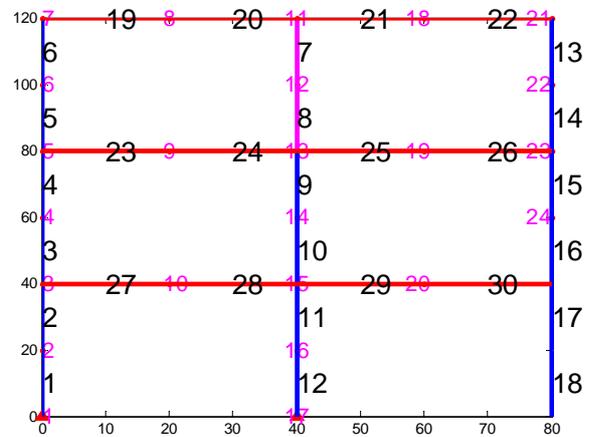


Figura 3.24. Marco analítico con simulación de daño en la columna central del tercer nivel.

## Capítulo 4

### 4.- Metodología experimental

#### 4.1 Equipo: sensores y sistema de adquisición de datos

Un experimento diseñado es un estudio donde se implantan cambios deliberados en las variables de entrada de un sistema, de tal forma que sea posible percibir o identificar las causas de los cambios en la respuesta de salida.

En la metodología experimental el investigador interviene directa o indirectamente sobre el objeto de estudio, modificándolo para crear las condiciones necesarias que permitan descubrir sus características fundamentales por medio de:

- ✓ Aislar el objeto y las propiedades que se pretenden estudiar de la influencia de otros factores.
- ✓ Reproducir el objeto de estudio en condiciones controladas y
- ✓ Modificar las condiciones del fenómeno que se estudia.

De esta manera los datos se obtienen de la manipulación sistemática de variables en un experimento.

La adquisición de datos o señales, radica en obtener muestras del mundo real (sistema analógico) para crear datos que puedan ser manipulados por un ordenador (sistema digital). La adquisición de datos consiste en tomar un conjunto de señales físicas para convertirlas en tensiones eléctricas y digitalizarlas, de manera que se puedan procesar en una computadora.

La adquisición de datos se inicia con el fenómeno físico, o la propiedad física, de un objeto (objeto de la investigación) que se desea medir. Esta propiedad física podría ser, por ejemplo, el cambio de temperatura en cierto lugar, la fuerza aplicada a un objeto, etc. Para la obtención de datos se necesita contar con sensores que son

dispositivos que convierten una propiedad física en una señal eléctrica correspondiente medible, tal como tensión, corriente, el cambio en los valores de resistencia, etc.

La capacidad de un sistema de adquisición de datos para medir los distintos fenómenos depende de los transductores para convertir las señales de los fenómenos físicos mensurables en la adquisición de datos por “hardware”. Hay transductores específicos para diferentes aplicaciones para poder transformar adecuadamente diferentes señales eléctricas que posteriormente puedan ser digitalizadas.

Para la realización de este estudio se utilizó un acondicionador de señal modelo 482A22 (figura 4.1), un sistema de adquisición de datos SigLab modelo 20-42 (figura 4.2) y acelerómetros sísmicos piezoeléctricos uniaxiales modelo 393B12 (figura 4.3).

Un acondicionador de señal es un instrumento que transforman las señales eléctricas obtenidas por los acelerómetros o sensores (energía de entrada) a una forma apropiada para que el sistema de adquisición de datos pueda procesarla (energía de salida). Esto significa cambiar la señal de salida a un nivel de voltaje requerido, modificar el rango dinámico del sensor, eliminar señales indeseables y limitar el espectro del sensor (Pernía-Márquez, 2004).

El sistema de adquisición de datos SigLab modelo 20-42, permite grabar, visualizar y en algunos casos el procesamiento de los datos obtenidos por los transductores. Este modelo tiene la capacidad de procesar señales de hasta 20kHz y tiene la posibilidad de conectar 4 instrumentos de entrada y 2 de salida (Hernández 2010). Este equipo contiene aplicaciones llamadas Instrumentos Virtuales para realizar mediciones y analizarlas en un ambiente de MatLab® 2007a.

Los acelerómetros son instrumentos para adquirir la respuesta en corriente directa de mediciones de aceleración uniforme y vibración de baja frecuencia y se emplean en un amplio abanico de aplicaciones. Entre ellas el de analizar las características de baja frecuencia de edificios, puentes y objetos aeroespaciales; o adquirir información con propósitos de control mediante un proceso de retroalimentación (Pernía-Márquez, 2004).

Los acelerómetros capacitivos operan mediante una técnica donde la capacitancia del elemento de medición interno cambia en proporción a la aceleración aplicada.



Figura 4.1. Acondicionador de señales.



Figura 4.2. Sistema de adquisición de datos SigLab



Figura 4.3. Acelerómetro sísmico piezoeléctrico.

## 4.2. Pruebas realizadas

Para la aplicación del método Proper orthogonal decomposition (POD) es necesaria la respuesta de la estructura ante vibración ambiental.

Existen diferentes propuestas acerca de la ubicación óptima de sensores con el propósito de identificar los parámetros dinámicos. Debido a que el número de sensores a veces está limitado por los costos de la instrumentación, tanto de los equipos como de su instalación, es importante una metodología para la ubicación óptima de los sensores.

Para capturar la respuesta ante algún movimiento en marcos planos Argueta (2009) encontró que la mejor forma de colocar los sensores es en las intersecciones de los elementos y a mitad de cada uno de ellos. Debido a la capacidad que tiene el equipo de adquisición de datos se plantean diferentes arreglos de los sensores.

Según la recomendación de Argueta, para el marco 1 se debe contar con 10 sensores (figura 4.4)

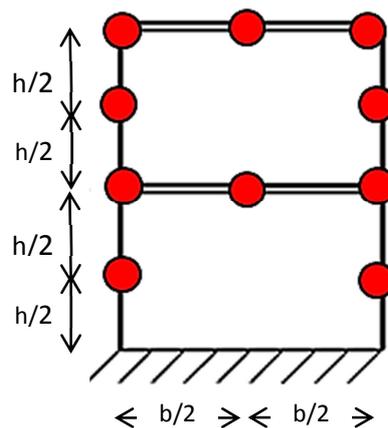


Figura 4.4. Colocación de sensores en el marco 1 según Argueta.

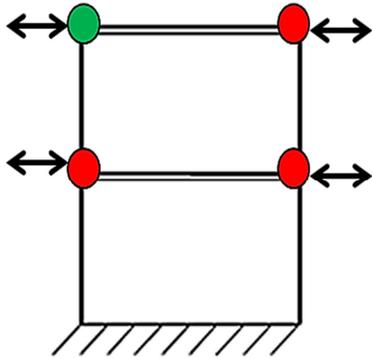


Figura 4.5. Primer arreglo de sensores en el marco 1

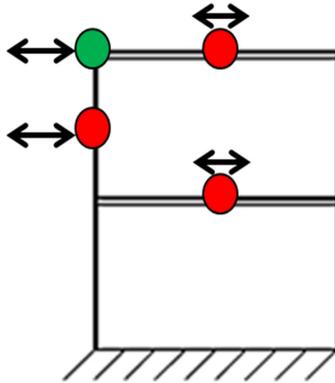


Figura 4.6. Segundo arreglo de sensores en el marco 1

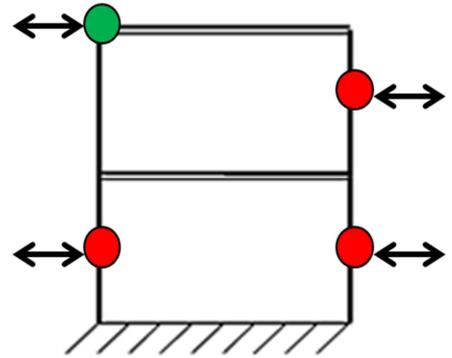


Figura 4.7. Tercer arreglo de sensores en el marco 1

Debido a que el sistema de adquisición de datos sólo puede usar 4 sensores a la vez se plantean las siguientes configuraciones (figuras 4.5, 4.6 y 4.7)

De esta manera se cubre lo propuesto por Argueta, los círculos en color verde denotan al sensor que será tomado como referencia para todas las mediciones, y las flechas la dirección medida por el sensor.

Para la realización de las pruebas, se colocó la probeta reducida 10, 20, 30 y 40% del área original (figuras 3.13 a 3.16) respectivamente para la simulación de daño tanto en la parte inferior y superior del marco 1 como lo muestran las figuras 4.8 y 4.9. Se instrumentó como lo indicado en las figuras 4.5, 4.6 y 4.7. Para cada uno de éstos arreglos, el marco se midió 15 minutos ante vibración ambiental con una velocidad de muestreo de 256 Hz.

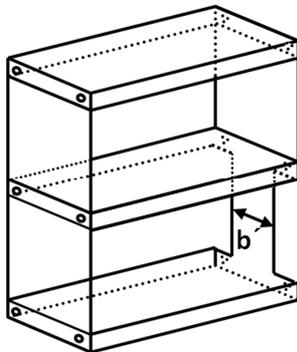


Figura 4.8. Simulación de daño en columna inferior del marco 1

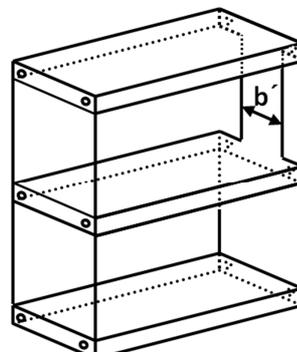


Figura 4.9. Simulación de daño en columna superior del marco 1

La instrumentación del marco 2 también se hizo con base en lo propuesto por Argueta. En esta ocasión se necesitan 24 sensores (figura 4.10). Los arreglos de los sensores se muestran en la figura 4.11 a 4.18.

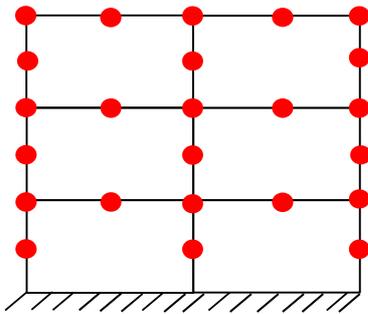


Figura 4.10. Colocación de sensores en el marco 2 según Argueta.

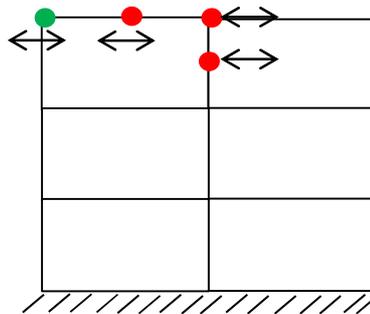


Figura 4.11. Primer arreglo para el marco 2.

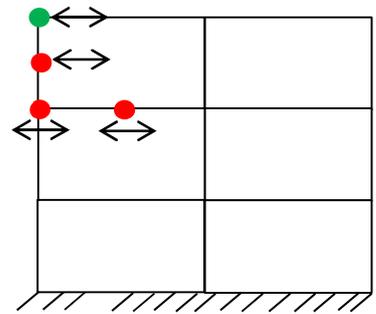


Figura 4.12. Segundo arreglo para el marco 2.

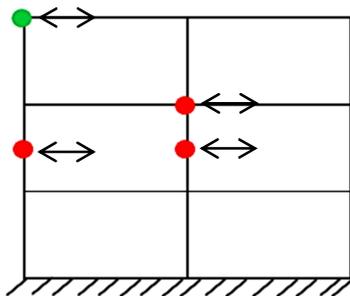


Figura 4.13. Tercer arreglo de sensores para el marco 2

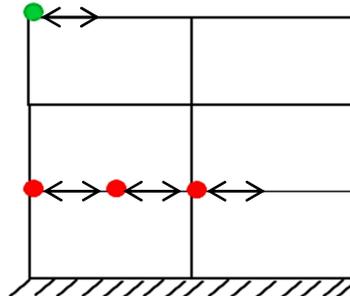


Figura 4.14. Cuarto arreglo de sensores para el marco 2

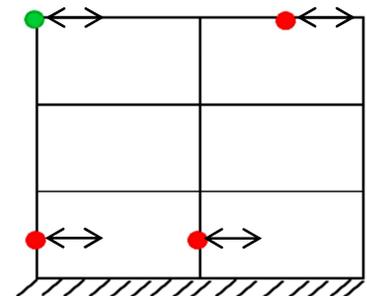


Figura 4.15. Quinto arreglo de sensores para el marco 2

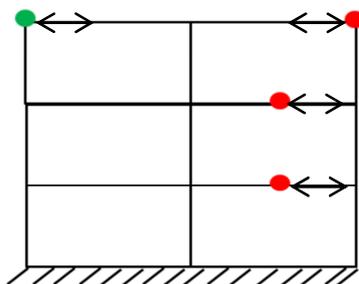


Figura 4.16. Sexto arreglo de sensores para el marco 2

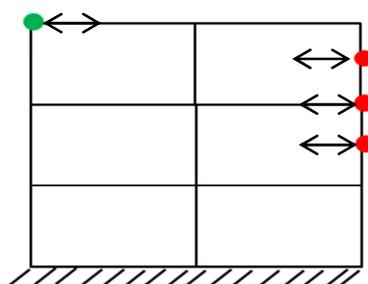


Figura 4.17. Séptimo arreglo de sensores para el marco 2

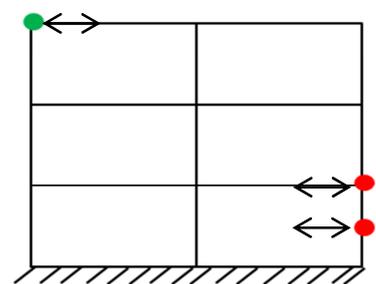


Figura 4.18. Octavo arreglo de sensores para el marco 2

Los círculos en color verde también denota al sensor que será tomado como referencia para todas las mediciones, y las flechas la dirección medida por el sensor.

De igual manera que para el marco 1, para la realización de las pruebas, se colocó la probeta reducida 10, 20, 30 y 40% del área original (figuras 3.13 a 3.16) respectivamente para la simulación de daño en la columna exterior del primer, segundo y tercer nivel (figuras 3.7, 3.8 y 3.9 respectivamente), así como para la simulación de daño en la columna interior del primer, segundo y tercer nivel (figuras 3.10, 3.11 y 3.12 respectivamente). Se instrumentó como lo indicado en las figuras 4.11 a 4.18. Para cada uno de estos arreglos, el marco se midió 15 minutos ante vibración ambiental con una velocidad de muestreo de 256 Hz.

Una vez que se tienen todos los registros en la estructura, debido a que los sensores utilizados son para medir aceleraciones, se realiza una conversión a desplazamientos para que el método pueda ser interpretado. Esta conversión se realiza por el Método corrección línea base, así como por un filtro pasa altas.

Para identificar algún daño en la estructura, se aplicó la metodología del Proper ortogonal decomposition (POD) de forma descentralizada como lo describe Carpio (2009).

El método descentralizado implica que los sensores serán capaces de recolectar la información y procesarla ellos mismos. Los sensores a mitad de los elementos viga y columna procesarán su información para posteriormente enviarla a los sensores de esquina, por lo que sólo se utilizarán los registros de los sensores de la uniones viga-columna llamados sensores líder. Se ilustra el proceso para el marco 1 en la figura 4.19 y para el marco 2 en la figura 4.20. Cada punto en rojo representa la posición de un sensor en la estructura.

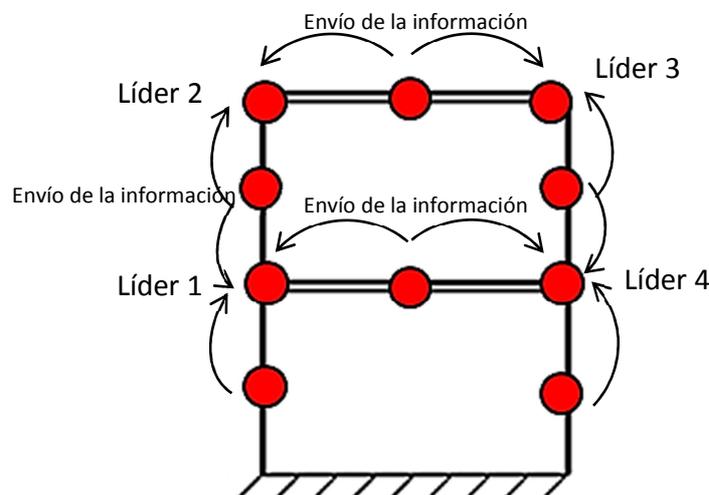


Figura 4.19. Procesamiento de la información del marco 1

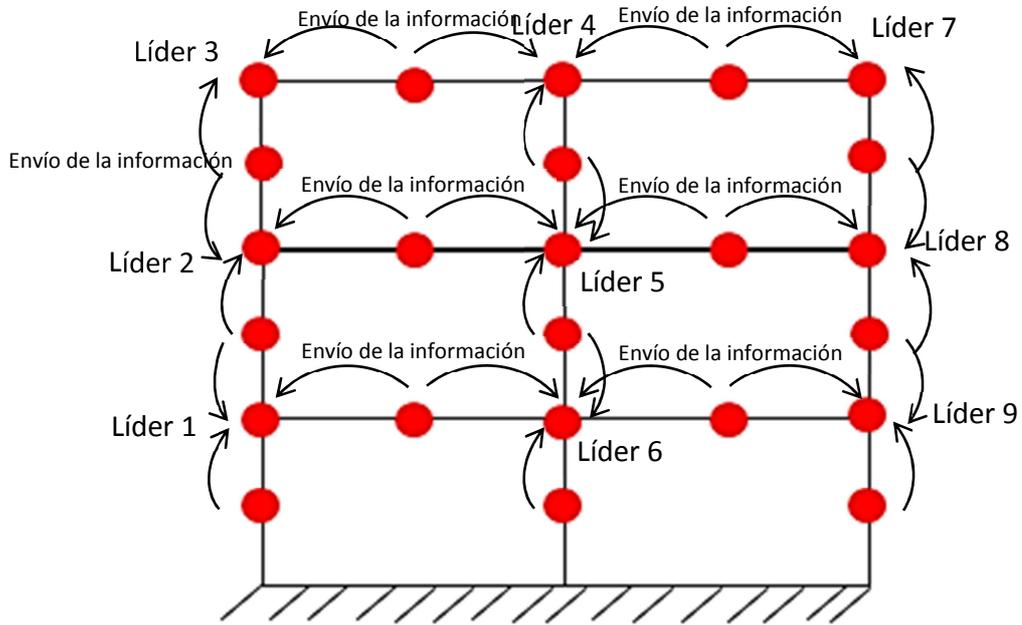


Figura 4.20. Procesamiento de la información del marco 2

En las siguientes imágenes (figura 4.21), los círculos en rojo, muestran la colocación de los sensores en el marco real como se indicó en las figuras 4.11 a 4.18.

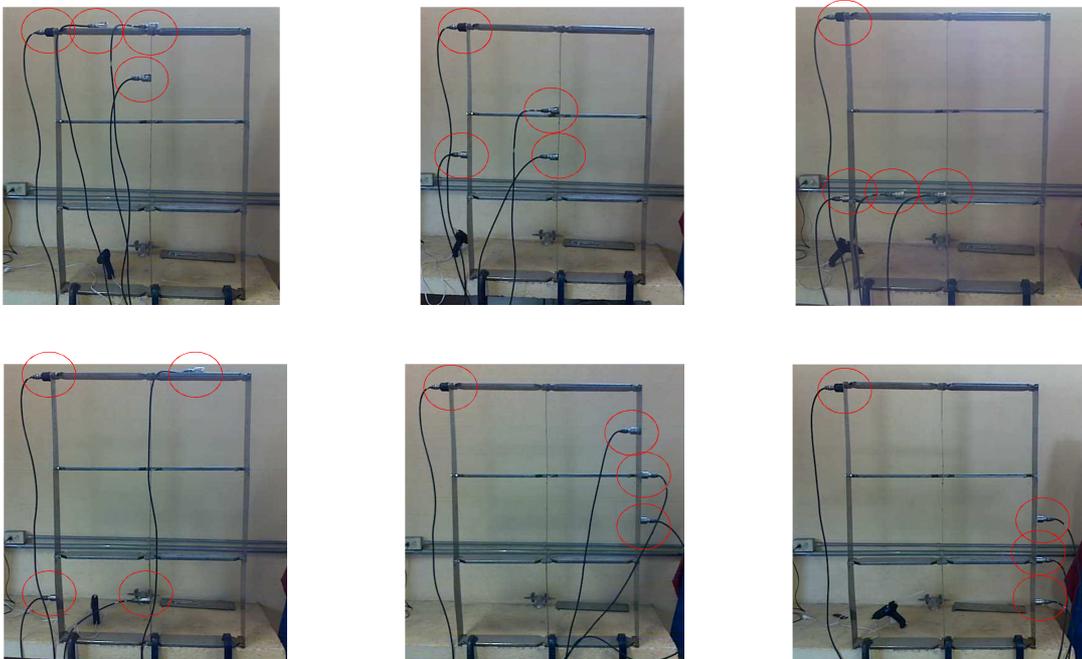


Figura 4.21. Colocación de sensores.

## Capítulo 5

### 5.- Análisis de la información

Se aplicó el método POD para cada uno de los marcos de este estudio. Se analizaron los resultados de los modelos analíticos y experimentales, que se presentaran en las siguientes secciones.

Por sencillez, se mostrará el procedimiento para un caso completo, y se obviará para los subsecuentes.

#### 5.1 Resultados analíticos Marco 1

Se aplicó una aceleración en la base del marco. Esta señal fue un ruido blanco (figura 5.1). El marco fue discretizado como lo indicado en el capítulo 4, es decir, sensores en puntos medios de columnas y vigas. El programa utilizó el método de Newmark para resolver el sistema dinámico (anexo 1), por lo tanto fue posible obtener los valores de desplazamiento en cada uno de los grados de libertad.

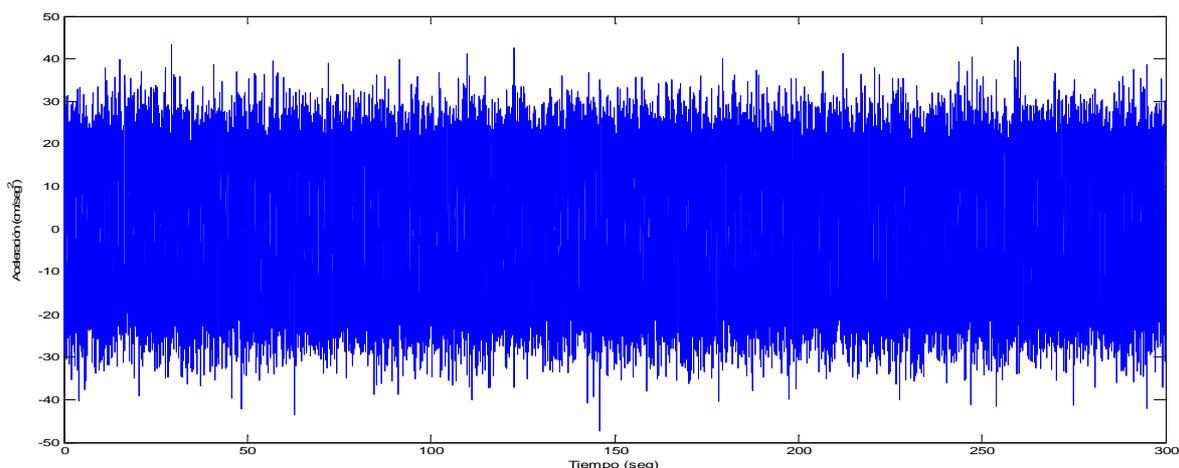


Figura 5.1. Ruido blanco

La figura 5.2 muestra la configuración del registro de aceleraciones de los 10 sensores del marco 1, y la figura 5.3 los registros de los 24 sensores del marco 2.

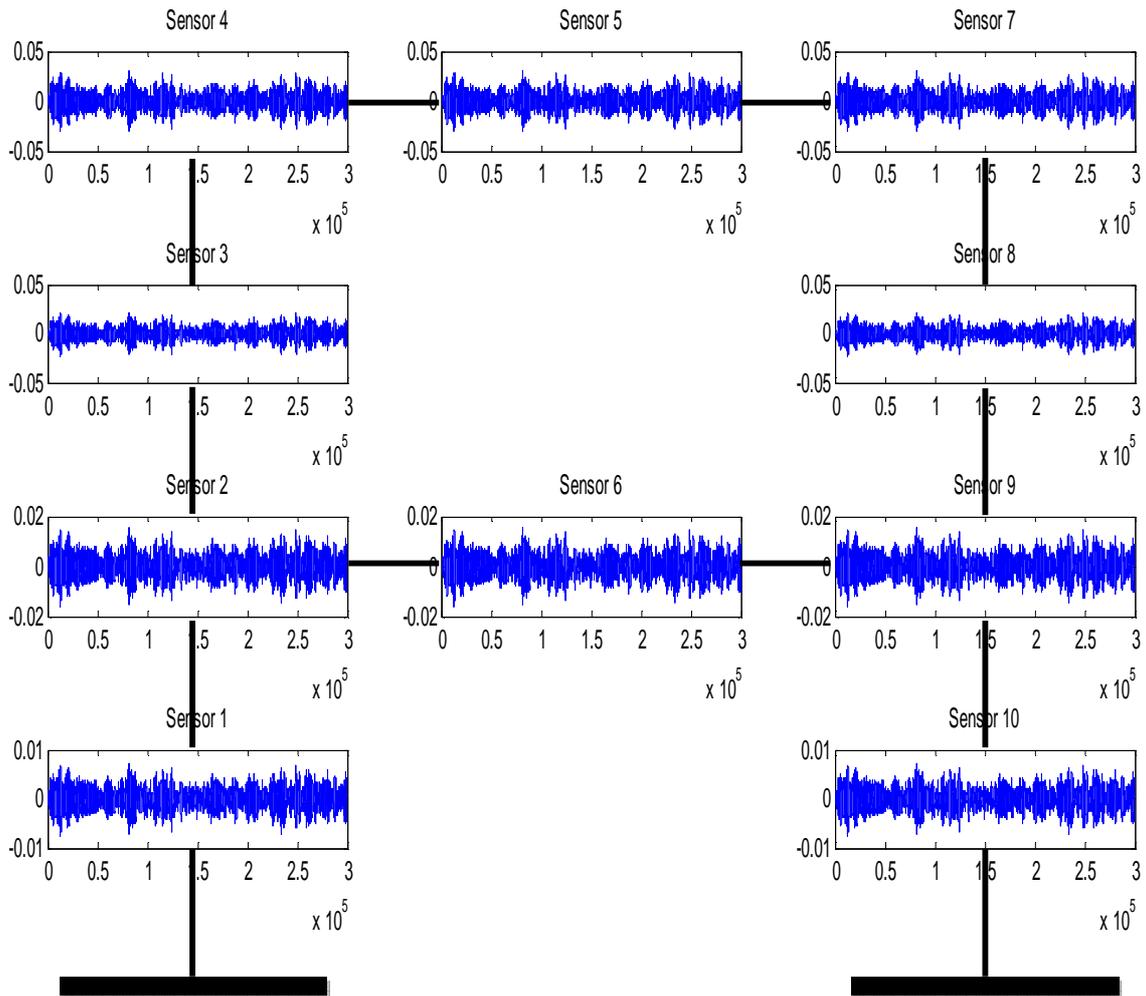


Figura 5.2. Registro de aceleraciones del marco 1

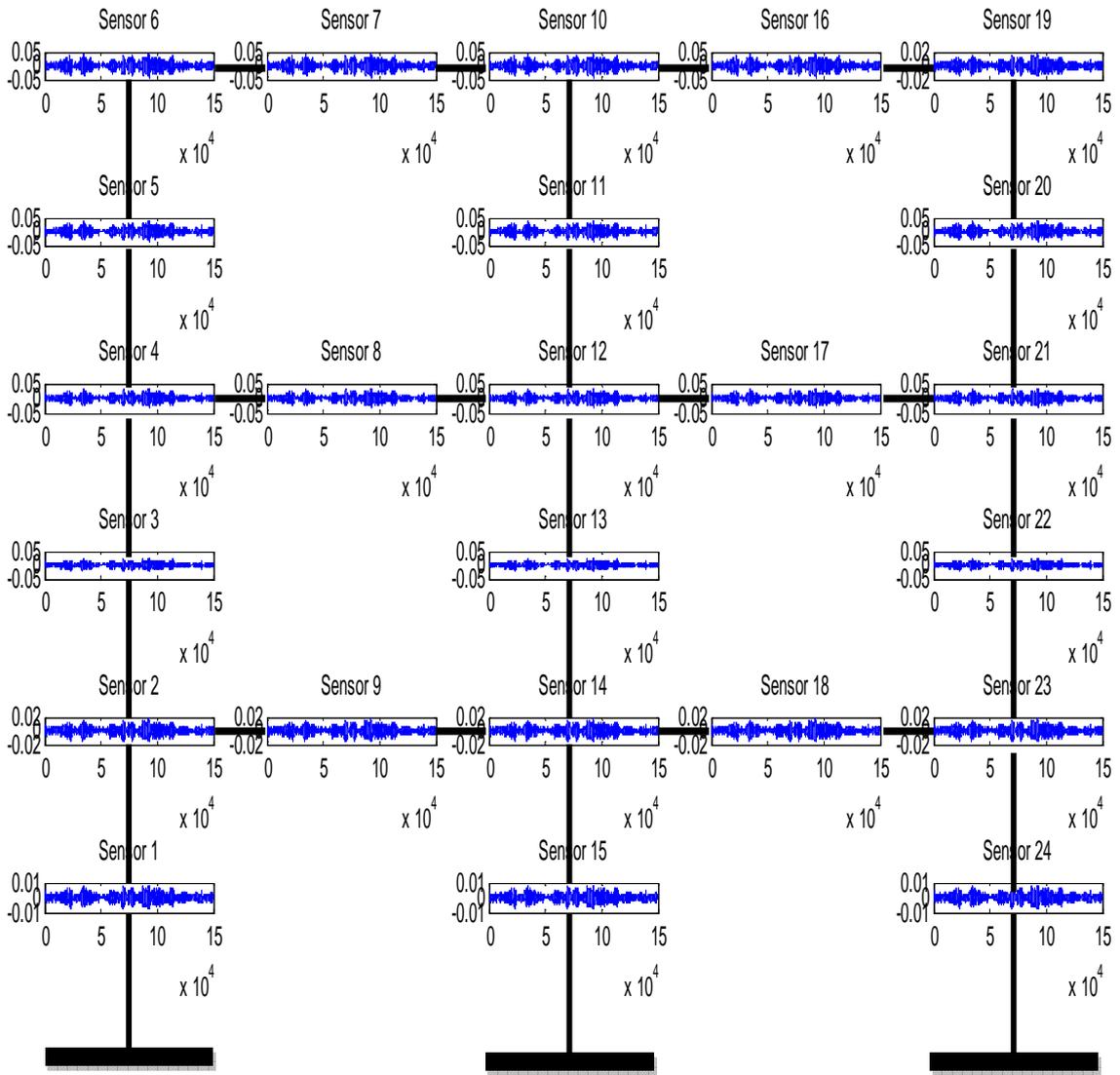


Figura 5.3. Registro de aceleraciones del marco 2

A continuación se presenta el caso de daño en la columna superior derecha con un 30% de disminución de área del marco 1.

En la tabla 5.1 se muestran la matriz de desplazamientos horizontales del marco (matriz A completa) para cada uno de los 10 grados de libertad. Se tienen 300 segundos de registro con una velocidad de muestreo de 1000 Hz.

Tabla 5.1. Matriz de desplazamientos horizontales del marco

Muestra	Tiempo (s)	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4	Sensor 5	Sensor 6	Sensor 7	Sensor 8	Sensor 9	Sensor 10
1	0.001	0	1.83257E-07	5.90094E-08	-1.52667E-06	-3.97717E-06	0.00059749	0.00061404	0.0006321	0.00065183	0.00067298
2	0.002	0	3.2142E-07	1.85239E-07	-2.70891E-06	-7.63383E-06	0.00128923	0.00132971	0.00137322	0.00142001	0.00146971
3	0.003	0	3.25505E-07	1.44845E-07	-2.7273E-06	-7.38551E-06	0.00200012	0.00211212	0.00222667	0.00234397	0.0024636
4	0.004	0	2.82896E-07	1.59676E-07	-2.38378E-06	-6.68941E-06	0.0027363	0.00292267	0.00311105	0.00330157	0.00349385
5	0.005	0	2.82889E-07	1.59684E-07	-2.38373E-06	-6.68934E-06	0.00273632	0.00292269	0.00311107	0.0033016	0.00349388
6	0.006	0	3.21417E-07	1.85254E-07	-2.70889E-06	-7.6339E-06	0.00128923	0.00132971	0.00137321	0.00142	0.00146971
7	0.007	0	2.82896E-07	1.59675E-07	-2.38378E-06	-6.6894E-06	0.00273631	0.00292268	0.00311106	0.00330159	0.00349387
8	0.008	0	3.3909E-07	1.27892E-07	-2.83343E-06	-7.50687E-06	0.00200094	0.00211307	0.00222775	0.00234521	0.00246498
9	0.009	0	3.2142E-07	1.8524E-07	-2.70891E-06	-7.63384E-06	0.00128921	0.0013297	0.0013732	0.00141998	0.00146969
10	0.01	0	1.83249E-07	5.90002E-08	-1.52661E-06	-3.97695E-06	0.00059767	0.00061424	0.00063232	0.00065206	0.00067323
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
299991	299.991	-0.0000060	-0.0000079	-0.0000107	-0.0000150	-0.0000215	0.0006946	0.0007154	0.0007346	0.0007538	0.0007756
299992	299.992	-0.0000118	-0.0000156	-0.0000211	-0.0000295	-0.0000422	0.0015206	0.0015699	0.0016160	0.0016616	0.0017120
299993	299.993	-0.0000112	-0.0000149	-0.0000202	-0.0000282	-0.0000405	0.0025838	0.0027020	0.0028166	0.0029304	0.0030483
299994	299.994	-0.0000103	-0.0000137	-0.0000185	-0.0000259	-0.0000371	0.0036862	0.0038763	0.0040625	0.0042472	0.0044349
299995	299.995	-0.0000103	-0.0000137	-0.0000185	-0.0000259	-0.0000371	0.0036863	0.0038764	0.0040626	0.0042473	0.0044350
299996	299.996	-0.0000118	-0.0000156	-0.0000211	-0.0000295	-0.0000422	0.0015206	0.0015699	0.0016160	0.0016616	0.0017120
299997	299.997	-0.0000103	-0.0000137	-0.0000185	-0.0000259	-0.0000371	0.0036863	0.0038764	0.0040625	0.0042473	0.0044350
299998	299.998	-0.0000113	-0.0000150	-0.0000203	-0.0000285	-0.0000409	0.0025853	0.0027035	0.0028181	0.0029320	0.0030502
299999	299.999	-0.0000118	-0.0000156	-0.0000211	-0.0000295	-0.0000422	0.0015205	0.0015699	0.0016160	0.0016616	0.0017120
300000	300	-0.0000060	-0.0000079	-0.0000107	-0.0000150	-0.0000215	0.0006949	0.0007157	0.0007349	0.0007542	0.0007760

Se formaron 4 grupos de registros (figura 5.4) y con ellos se construyeron 4 matrices de desplazamientos. Posteriormente se calculó la matriz R para cada grupo. La matriz R es la matriz de correlación de los registros y se obtiene multiplicando la matriz A por su transpuesta, (capítulo 2 sección 2.6). Esta matriz tendrá el mismo tamaño que número de sensores de cada grupo.

Los grupos se forman de la siguiente manera.

El sensor 2 recibe la información de los sensores, 5, 7 y 8. Este nodo conformara al líder 1. El sensor 1 recibe la información de los sensores 5 y 6 y conformará al líder 2. El sensor 3 recibe la información de los sensores 6 y 9 y conformará al líder 3. Finalmente, el sensor 4 recibe la información de los sensores 7, 9 y 10 y conforman al líder 4 (figura 5.5).

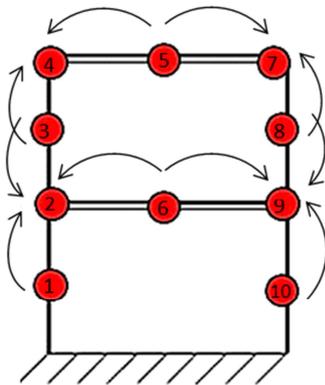


Figura 5.4. Proceso de envío de información de los sensores al nodo líder.

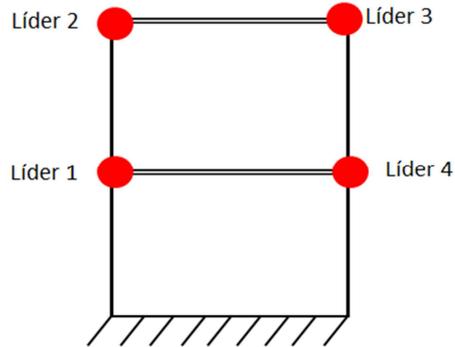


Figura 5.5. Nodos líder

Como ejemplo se presenta la matriz R obtenida del marco 1 sin daño para el caso del líder (tabla 5.2). Dado que este líder está formado por los sensores 1, 2, 3 y 6 el tamaño de esta matriz es de 4x4.

Tabla 5.2. Matriz R del nodo 1 sin daño

Matriz R			
Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 6
1.01384806	2.14906735	2.94717899	2.14908003
2.14906735	4.55837716	6.27399814	4.5584035
2.94717899	6.27399814	8.81014242	6.27403005
2.14908003	4.5584035	6.27403005	4.55842984

Esta matriz se condensa a un solo valor. Este se obtiene con el promedio de todos los valores de la matriz.

La matriz condensada del nodo 1 sin daño es: 4.2277696

Cuando se realiza un daño del 10% en la columna superior derecha del marco 1 se tiene la siguiente matriz R para el mismo líder 1:

Tabla 5.3. Matriz R del nodo 1 con 10% de simulación de daño.

Matriz R			
Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 6
1.39740715	2.96628391	4.13911039	2.96629769
2.96628391	6.29971807	8.81596536	6.29974666
4.13911039	8.81596536	12.5419418	8.81599989
2.96629769	6.29974666	8.81599989	6.29977526

Esta matriz se condensa a un solo valor. Este se obtiene con el promedio de todos los valores de la matriz.

La matriz condensada del nodo 1 con 10% de simulación de daño es: 5.909103126

El siguiente paso para la detección es daño es hacer una relación del promedio de las matrices R del marco con y sin daño para cada uno de los sensores líder. Los puntos donde se tenga una mayor diferencia indicarán un posible daño en esa zona.

El cociente de las matrices R con daño y sin daño es:  $(5.909103/4.2277696=1.397688068)$  que es el primer valor de la primera columna de la tabla 5.4. El proceso es similar para todos los casos.

La tabla 5.4 muestra la relación de los valores de R de la estructura sin daño y con 10, 20, 30 y 40% de simulación de daño en la columna superior derecha (figura 3.6).

Se enuncian el procedimiento para la determinación de daño estructural.

- 1.- De los nodos líderes entre columnas (1 y 2; 3 y 4) se selecciona de mayor coeficiente. Para 1 y 2 es 1.4372 y para 3 y 4 es 1.4374.
  - 2.- Se obtiene el promedio de estos coeficientes  $(1.4372+1.4374)/2=1.4373$
  - 3.- Se obtiene la diferencia del promedio con cada nodo  $(1.4373-1.3977=0.0396)$ .
  - 4.- Se toma el mayor valor (sólo positivos)(0.0396). Esto indicará la zona de posible daño.
- Este procedimiento se aplica a los demás casos de daño. Se resalta en azul las zonas identificadas.

Tabla 5.4. Relación de las matrices R en el marco analítico sin daño y con simulación de daño en la columna superior derecha.

Relación de la matriz R en marco analítico 1 sin daño y con simulación de daño											
Líder	Coef. de R con y sin daño	10%	Líder	Coef. de R con y sin daño	20%	Líder	Coef. de R con y sin daño	30%	Líder	Coef. de R con y sin daño	40%
		Diferencia del promedio con cada nodo			Diferencia del promedio con cada nodo			Diferencia del promedio con cada nodo			Diferencia del promedio con cada nodo
1	1.3977	0.0396	1	1.2673	0.0655	1	1.4553	0.1218	1	1.2245	0.1383
2	1.4372	1E-04	2	1.3326	0.0002	2	1.5767	0.0003	2	1.3623	0.0005
3	1.4374	-1E-04	3	1.2658	0.067	3	1.4543	0.1228	3	1.2238	0.139
4	1.3979	0.0394	4	1.333	-0.0002	4	1.5774	-0.0004	4	1.3633	-0.0005
Promedio	1.4373		Promedio	1.3328		Promedio	1.5771		Promedio	1.3628	

En este caso, la columna con simulación de daño se encuentra entre los líderes 3 y 4 lo cual indica una posición incorrecta para 10% de simulación. Para los siguientes niveles de daño, es decir, para 20, 30 y 40% su ubicación es en el nodo 3 respectivamente y la ubicación posible de daño es correcta.

Tabla 5.5. Relación de las matrices R en el marco analítico sin daño y con simulación de daño en la columna inferior derecha.

Relación de la matriz R en marco analítico 1 sin daño y con simulación de daño											
10%			20%			30%			40%		
Líder	Coef. de R con y sin daño	Diferencia del promedio con cada nodo	Líder	Coef. de R con y sin daño	Diferencia del promedio con cada nodo	Líder	Coef. de R con y sin daño	Diferencia del promedio con cada nodo	Líder	Coef. de R con y sin daño	Diferencia del promedio con cada nodo
1	1.4713	5E-05	1	1.6488	0.00015	1	1.6227	0.00015	1	1.4981	0.0003
2	1.4332	0.03815	2	1.5555	0.09345	2	1.4812	0.14165	2	1.3188	0.1796
3	1.4331	0.03825	3	1.5554	0.09355	3	1.4811	0.14175	3	1.3187	0.1797
4	1.4714	-5E-05	4	1.6491	-0.00015	4	1.623	-0.00015	4	1.4987	-0.0003
Promedio	1.47135		Promedio	1.64895		Promedio	1.62285		Promedio	1.4984	

La tabla 5.5 es para una simulación de daño se hizo por debajo del líder 4 lo cual indica una posición incorrecta para todos los casos de simulación.

## 5.2 Resultados experimentales Marco 1

A continuación se presenta los resultados cuando se utilizan datos experimentales y el daño se encuentra en la columna superior derecha.

Tabla 5.6. Relación de las matrices R en el marco real sin daño y con simulación de daño en la columna superior derecha.

Relación de la matriz R en marco real 1 sin daño y con simulación de daño											
10%			20%			30%			40%		
Líder	Coef. de R con y sin daño	Diferencia del promedio con cada nodo	Líder	Coef. de R con y sin daño	Diferencia del promedio con cada nodo	Líder	Coef. de R con y sin daño	Diferencia del promedio con cada nodo	Líder	Coef. de R con y sin daño	Diferencia del promedio con cada nodo
1	0.3549	0.31495	1	0.0027	0.0052	1	0.0406	0.35565	1	1.4297	1.9297
2	0.2652	0.40465	2	0.0032	0.0047	2	0.732	-0.33575	2	3.5692	-0.2098
3	0.2672	0.40265	3	0.0019	0.006	3	0.0605	0.33575	3	1.4265	1.9329
4	0.9848	-0.31495	4	0.0131	-0.0052	4	0.0558	0.34045	4	3.1496	0.2098
Promedio	0.66985		Promedio	0.0079		Promedio	0.39625		Promedio	3.3594	

La tabla 5.6 muestra los resultados del marco experimental 1, la simulación de daño se hizo entre el líder 3 y 4 mostrando una ubicación incorrecta sólo para el caso de 10% de simulación.

Tabla 5.7. Relación de las matrices R en el marco real sin daño y con simulación de daño en la columna inferior derecha.

Relación de la matriz R en marco real 1 sin daño y con simulación de daño											
10%			20%			30%			40%		
Líder	Coef. de R con y sin daño	Diferencia del promedio con cada nodo	Líder	Coef. de R con y sin daño	Diferencia del promedio con cada nodo	Líder	Coef. de R con y sin daño	Diferencia del promedio con cada nodo	Líder	Coef. de R con y sin daño	Diferencia del promedio con cada nodo
1	7.3182	-1.8667	1	0.3208	-0.41485	1	7.0709	7.3111	1	0.0478	-0.79225
2	4.6385	0.813	2	0.2692	-1.41485	2	7.1672	6.3111	2	0.0467	-1.79225
3	3.5848	1.8667	3	0.3253	-2.41485	3	4.3745	5.3111	3	0.3677	-2.79225
4	3.3336	2.1179	4	0.8495	-3.41485	4	9.455	4.3111	4	0.231	-3.79225
Promedio	5.4515		Promedio	0.58515		Promedio	8.3111		Promedio	0.20775	

En la tabla 5.7 la simulación de daño se hizo por debajo del líder 4 indicando sólo para el caso de 10% la ubicación correcta.

En las siguientes tablas se presenta el resumen de los resultados analíticos y experimentales del marco 1.

Tablas 5.8. Resumen del marco 1 analítico y real.

Resumen Marco 1 Analítico			Resumen Marco 1 Real		
Posición			Posición		
Daño	Superior	Inferior	Daño	Superior	Inferior
10%			10%		
20%			20%		
30%			30%		
40%			40%		

En las tablas, las casillas en verde representan un resultado correcto, de manera contraria, las casillas en rojo un resultado incorrecto.

Se aprecia que en ningún caso los resultados analíticos para columnas inferiores arrojaron resultados correctos.

## 5.3 Resultados analíticos Marco 2

A continuación se presentan los resultados cuando se utilizan los datos analíticos del marco 2 y el daño está en la columna central y exterior izquierda de cada nivel.

Tabla 5.9. Relación de las matrices R en el marco analítico sin daño y con simulación de daño en la columna central de planta baja.

Relación de la matriz R en marco analítico 2 sin daño y con simulación de daño											
10%			20%			30%			40%		
Líder	Coef. de R con y sin daño	Diferencia del promedio con cada nodo	Líder	Coef. de R con y sin daño	Diferencia del promedio con cada nodo	Líder	Coef. de R con y sin daño	Diferencia del promedio con cada nodo	Líder	Coef. de R con y sin daño	Diferencia del promedio con cada nodo
1	1.1932	-0.0159	1	1.1831	-0.02625	1	1.4878	-0.048267	1	1.5606	-0.0702667
2	1.1563	0.021	2	1.1296	0.02725	2	1.3895	0.0500333	2	1.4174	0.07293333
3	1.1458	0.0315	3	1.1084	0.04845	3	1.3485	0.0910333	3	1.3608	0.12953333
4	1.1455	0.0318	4	1.1075	0.04935	4	1.3468	0.0927333	4	1.3585	0.13183333
5	1.1562	0.0211	5	1.1293	0.02755	5	1.3889	0.0506333	5	1.4166	0.07373333
6	1.1956	-0.0183	6	1.1864	-0.02955	6	1.4937	-0.054167	6	1.5694	-0.0790667
7	1.1458	0.0315	7	1.1084	0.04845	7	1.3485	0.0910333	7	1.3608	0.12953333
8	1.1563	0.021	8	1.1296	0.02725	8	1.3895	0.0500333	8	1.4174	0.07293333
9	1.2062	-0.0289	9	1.1831	-0.02625	9	1.4878	-0.048267	9	1.5606	-0.0702667
Promedio	1.1773		Promedio	1.15685		Promedio	1.4395333		Promedio	1.4903333	

En la tabla 5.9 la simulación de daño se hizo por debajo del líder 6, indicando para todos los casos una ubicación incorrecta (figura 4.20).

Tabla 5.10. Relación de las matrices R en el marco analítico sin daño y con simulación de daño en la columna exterior izquierda de planta baja.

Relación de la matriz R en marco analítico 2 sin daño y con simulación de daño											
10%			20%			30%			40%		
Líder	Coef. de R con y sin daño	Diferencia del promedio con cada nodo	Líder	Coef. de R con y sin daño	Diferencia del promedio con cada nodo	Líder	Coef. de R con y sin daño	Diferencia del promedio con cada nodo	Líder	Coef. de R con y sin daño	Diferencia del promedio con cada nodo
1	1.193	-0.015867	1	1.1828	-0.0263833	1	1.4868	-0.048383	1	1.5605	-0.07048333
2	1.1562	0.0209333	2	1.1292	0.0272167	2	1.3884	0.0500167	2	1.4171	0.07291667
3	1.1456	0.0315333	3	1.108	0.0484167	3	1.3476	0.0908167	3	1.3606	0.12941667
4	1.1454	0.0317333	4	1.1072	0.0492167	4	1.3459	0.0925167	4	1.3584	0.13161667
5	1.1561	0.0210333	5	1.1289	0.0275167	5	1.3879	0.0505167	5	1.4164	0.07361667
6	1.1954	-0.018267	6	1.1858	-0.0293833	6	1.4923	-0.053883	6	1.5687	-0.07868333
7	1.1456	0.0315333	7	1.108	0.0484167	7	1.3476	0.0908167	7	1.3606	0.12941667
8	1.1562	0.0209333	8	1.1292	0.0272167	8	1.3885	0.0499167	8	1.4172	0.07281667
9	1.2059	-0.028767	9	1.1826	-0.0261833	9	1.4866	-0.048183	9	1.5602	-0.07018333
Promedio	1.1771333		Promedio	1.156416667		Promedio	1.4384167		Promedio	1.4900167	

En la tabla 5.10 la simulación de daño se hizo por debajo del líder 1 indicando para todos los casos una ubicación incorrecta (figura 4.20).

Tabla 5.11. Relación de las matrices R en el marco analítico sin daño y con simulación de daño en la columna central del primer nivel.

Relación de la matriz R en marco analítico 2 sin daño y con simulación de daño															
Líder	Coef. de R con y sin daño	10%		Líder	Coef. de R con y sin daño	20%		Líder	Coef. de R con y sin daño	30%		Líder	Coef. de R con y sin daño	40%	
		Diferencia del promedio con cada nodo				Diferencia del promedio con cada nodo				Diferencia del promedio con cada nodo				Diferencia del promedio con cada nodo	
1	1.127	0.0108667		1	1.0324	0.0414333		1	1.1606	0.0663333		1	1.2242	0.0944	
2	1.1376	0.0002667		2	1.0734	0.0004333		2	1.2261	0.0008333		2	1.3174	0.0012	
3	1.1342	0.0036667		3	1.0663	0.0075333		3	1.2124	0.0145333		3	1.2977	0.0209	
4	1.1341	0.0037667		4	1.0657	0.0081333		4	1.2113	0.0156333		4	1.2962	0.0224	
5	1.1384	-0.000533		5	1.0747	-0.000867		5	1.2286	-0.001667		5	1.321	-0.0024	
6	1.1264	0.0114667		6	1.0296	0.0442333		6	1.1562	0.0707333		6	1.2181	0.1005	
7	1.1342	0.0036667		7	1.0663	0.0075333		7	1.2124	0.0145333		7	1.2977	0.0209	
8	1.1376	0.0002667		8	1.0734	0.0004333		8	1.2261	0.0008333		8	1.3174	0.0012	
9	1.1363	0.0015667		9	1.0324	0.0414333		9	1.1606	0.0663333		9	1.2242	0.0944	
Promedio	1.1378667			Promedio	1.0738333			Promedio	1.2269333			Promedio	1.3186		

En la tabla 5.11 la simulación de daño se hizo entre los líderes 5 y 6 lo cual indica una posición correcta para todos los casos de simulación.

Tabla 5.12. Relación de las matrices R en el marco analítico sin daño y con simulación de daño en la columna exterior izquierda del primer nivel.

Relación de la matriz R en marco analítico 2 sin daño y con simulación de daño															
Líder	Coef. de R con y sin daño	10%		Líder	Coef. de R con y sin daño	20%		Líder	Coef. de R con y sin daño	30%		Líder	Coef. de R con y sin daño	40%	
		Diferencia del promedio con cada nodo				Diferencia del promedio con cada nodo				Diferencia del promedio con cada nodo				Diferencia del promedio con cada nodo	
1	1.127	0.0108		1	1.0223	0.05103333		1	1.1538	0.0715		1	1.2146	0.1033	
2	1.1376	0.0002		2	1.0729	0.00043333		2	1.2246	0.0007		2	1.3169	0.001	
3	1.1341	0.0037		3	1.0658	0.00753333		3	1.2107	0.0146		3	1.297	0.0209	
4	1.134	0.0038		4	1.0652	0.00813333		4	1.2097	0.0156		4	1.2956	0.0223	
5	1.1383	-0.0005		5	1.0742	-0.0008667		5	1.2268	-0.0015		5	1.3201	-0.0022	
6	1.1263	0.0115		6	1.0291	0.04423333		6	1.1546	0.0707		6	1.2173	0.1006	
7	1.1341	0.0037		7	1.0658	0.00753333		7	1.2107	0.0146		7	1.2971	0.0208	
8	1.1375	0.0003		8	1.0729	0.00043333		8	1.2245	0.0008		8	1.3167	0.0012	
9	1.1362	0.0016		9	1.0321	0.04123333		9	1.1593	0.066		9	1.2239	0.094	
Promedio	1.1378			Promedio	1.0733333			Promedio	1.2253			Promedio	1.3179		

En la tabla 5.12 la simulación de daño se hizo entre los líderes 1 y 2 lo cual indica una posición correcta para todos los casos excepto para 10% de simulación.

Tabla 5.13. Relación de las matrices R en el marco analítico sin daño y con simulación de daño en la columna central del segundo nivel.

Relación de la matriz R en marco analítico 2 sin daño y con simulación de daño															
Líder	Coef. de R con y sin daño	10%		Líder	Coef. de R con y sin daño	20%		Líder	Coef. de R con y sin daño	30%		Líder	Coef. de R con y sin daño	40%	
		Diferencia del promedio con cada nodo				Diferencia del promedio con cada nodo				Diferencia del promedio con cada nodo				Diferencia del promedio con cada nodo	
1	1.1271	0.0033833		1	1.0046	0.0089		1	1.0141	0.0118167		1	1.3004	0.0221333	
2	1.1204	0.0100833		2	1.0048	0.0087		2	1.0132	0.0127167		2	1.2995	0.0230333	
3	1.1298	0.0006833		3	1.0221	-0.0086		3	1.0385	-0.012583		3	1.3453	-0.022767	
4	1.1305	-1.67E-05		4	1.0231	-0.0096		4	1.0399	-0.013983		4	1.3479	-0.025367	
5	1.1201	0.0103833		5	1.0041	0.0094		5	1.0122	0.0137167		5	1.2977	0.0248333	
6	1.1279	0.0025833		6	1.0046	0.0089		6	1.0152	0.0107167		6	1.3005	0.0220333	
7	1.1298	0.0006833		7	1.0221	-0.0086		7	1.0385	-0.012583		7	1.3453	-0.022767	
8	1.1204	0.0100833		8	1.0048	0.0087		8	1.0132	0.0127167		8	1.2995	0.0230333	
9	1.1378	-0.007317		9	1.0056	0.0079		9	1.0139	0.0120167		9	1.3122	0.0103333	
Promedio	1.1304833			Promedio	1.0135			Promedio	1.0259167			Promedio	1.3225333		

En la tabla 5.13 la simulación de daño se hizo entre los líderes 4 y 5 lo cual indica una posición correcta para todos los casos de simulación.

Tabla 5.14. Relación de las matrices R en el marco analítico sin daño y con simulación de daño en la columna exterior izquierda del segundo nivel.

Relación de la matriz R en marco analítico 2 sin daño y con simulación de daño															
Líder	Coef. de R con y sin daño	10%		Líder	Coef. de R con y sin daño	20%		Líder	Coef. de R con y sin daño	30%		Líder	Coef. de R con y sin daño	40%	
		Diferencia del promedio con cada nodo				Diferencia del promedio con cada nodo				Diferencia del promedio con cada nodo				Diferencia del promedio con cada nodo	
1	1.1272	0.0033		1	1.0046	0.00886667		1	1.0147	0.0108333		1	1.2849	0.0229	
2	1.1205	0.01		2	1.0045	0.00896667		2	1.0122	0.0133333		2	1.2095	0.0983	
3	1.1299	0.0006		3	1.0221	-0.0086333		3	1.0383	-0.012767		3	1.3461	-0.0383	
4	1.1304	1E-04		4	1.0228	-0.0093333		4	1.0393	-0.013767		4	1.3478	-0.04	
5	1.1201	0.0104		5	1.0046	0.00886667		5	1.0125	0.0130333		5	1.2978	0.01	
6	1.1279	0.0026		6	1.0055	0.00796667		6	1.0138	0.0117333		6	1.2839	0.0239	
7	1.1298	0.0007		7	1.022	-0.0085333		7	1.038	-0.012467		7	1.3456	-0.0378	
8	1.1204	0.0101		8	1.0048	0.00866667		8	1.0129	0.0126333		8	1.3	0.0078	
9	1.1378	-0.0073		9	1.0066	0.00686667		9	1.0135	0.0120333		9	1.2846	0.0232	
Promedio	1.1305			Promedio	1.0134667			Promedio	1.0255333			Promedio	1.3078		

En la tabla 5.14 la simulación de daño se hizo entre los líderes 2 y 3 lo cual indica una posición correcta para 20, 30 y 40% de simulación de daño.

## 5.4 Resultados experimentales Marco 2

A continuación se presentan los resultados cuando se utilizan los datos experimentales del marco 2 y el daño está en la columna central y exterior izquierda de cada nivel.

Tabla 5.15. Relación de las matrices R en el marco real sin daño y con simulación de daño en la columna central de planta baja.

Relación de la matriz R en marco real 2 sin daño y con simulación de daño											
10%			20%			30%			40%		
Líder	Coef. de R con y sin daño	Diferencia del promedio con cada nodo	Líder	Coef. de R con y sin daño	Diferencia del promedio con cada nodo	Líder	Coef. de R con y sin daño	Diferencia del promedio con cada nodo	Líder	Coef. de R con y sin daño	Diferencia del promedio con cada nodo
1	0.0009736	0.99765218	1	0.0037673	0.33991729	1	1.807E-07	0.3905737	1	0.0143184	1.33560846
2	2.502E-05	0.99860079	2	2.898E-05	0.34365563	2	7.672E-10	0.39057388	2	0.0011362	1.34879063
3	7.201E-05	0.9985538	3	2.438E-06	0.34368217	3	3.038E-05	0.39054349	3	0.0003	1.34962682
4	0.0548957	0.9437301	4	0.0004868	0.3431978	4	5.526E-05	0.39051862	4	0.0515505	1.29837636
5	7.394E-05	0.99855186	5	5.569E-06	0.34367904	5	7.977E-10	0.39057388	5	0.0005314	1.34939544
6	0.0003666	0.99825921	6	0.0017995	0.3418851	6	6.881E-08	0.39057381	6	0.0108579	1.33906892
7	0.629208	0.36941779	7	0.0711192	0.27256537	7	0.0034845	0.38708941	7	5.381753	-4.0318262
8	4.9368211	-3.9381953	8	0.8017863	-0.45810167	8	1.9527835	-1.5622096	8	2.639945	-1.2900182
9	3.3893294	-2.3907036	9	1.2542387	-0.91055414	9	1.5119604	-1.1213866	9	1.7137928	-0.3638659
Promedio	0.9986258		Promedio	0.3436846		Promedio	0.3905739		Promedio	1.3499268	

En la tabla 5.15 la simulación de daño se hizo por debajo del líder 6 lo que indica una posición incorrecta para todos los casos de simulación.

Tabla 5.16. Relación de las matrices R en el marco real sin daño y con simulación de daño en la columna exterior izquierda de planta baja.

Relación de la matriz R en marco real 2 sin daño y con simulación de daño											
10%			20%			30%			40%		
Líder	Coef. de R con y sin daño	Diferencia del promedio con cada nodo	Líder	Coef. de R con y sin daño	Diferencia del promedio con cada nodo	Líder	Coef. de R con y sin daño	Diferencia del promedio con cada nodo	Líder	Coef. de R con y sin daño	Diferencia del promedio con cada nodo
1	0.0138802	0.5261651	1	0.0117143	1.22492054	1	0.0002284	0.32394917	1	5.325E-06	0.20651237
2	1.298E-06	0.54004399	2	4.301E-05	1.23659182	2	7.074E-08	0.32417754	2	6.152E-07	0.20651708
3	4.241E-06	0.54004104	3	0.0002145	1.23642035	3	2.875E-07	0.32417733	3	2.626E-06	0.20651507
4	0.04579	0.49425533	4	0.5183675	0.71826736	4	0.1970892	0.12708842	4	0.0052598	0.2012579
5	4.049E-06	0.54004124	5	6.157E-06	1.23662868	5	1.34E-06	0.32417628	5	1.42E-06	0.20651627
6	0.0049751	0.53507023	6	0.0016317	1.23500309	6	0.0001156	0.32406206	6	2.917E-06	0.20651478
7	0.1140086	0.4260367	7	6.256685	-5.02005016	7	0.9709484	-0.6467708	7	0.1642064	0.0423113
8	2.635577	-2.0955317	8	0.3408521	0.89578276	8	1.4234546	-1.099277	8	1.0273178	-0.8208001
9	2.092103	-1.5520577	9	0.6311196	0.60543882	9	0.6073202	-0.2831426	9	0.9477731	-0.7412554
Promedio	0.5400453		Promedio	1.2366348		Promedio	0.3241776		Promedio	0.2065177	

En la tabla 5.16 la simulación de daño se hizo por debajo del líder 1 lo que indica una posición incorrecta para todos los casos de simulación.

Tabla 5.17. Relación de las matrices R en el marco real sin daño y con simulación de daño en la columna central del primer nivel.

Relación de la matriz R en marco real 2 sin daño y con simulación de daño											
10%			20%			30%			40%		
Líder	Coef. de R con y sin daño	Diferencia del promedio con cada nodo	Líder	Coef. de R con y sin daño	Diferencia del promedio con cada nodo	Líder	Coef. de R con y sin daño	Diferencia del promedio con cada nodo	Líder	Coef. de R con y sin daño	Diferencia del promedio con cada nodo
1	0.0844934	2.95880026	1	3.121E-05	0.26042648	1	0.003979669	1.37671234	1	5.4268826	-4.25381268
2	0.0051239	3.03816978	2	8.305E-06	0.26044938	2	0.000937443	1.37975457	2	7.877E-05	1.17299112
3	3.588E-06	3.04329005	3	5.357E-05	0.26040411	3	2.90231E-06	1.38068911	3	3.708E-05	1.17303281
4	0.0009111	3.04238254	4	9.636E-06	0.26044804	4	0.000290689	1.38040132	4	0.0048608	1.16820911
5	2.465E-05	3.04326898	5	3.885E-10	0.26045768	5	2.7814E-06	1.38068923	5	9.141E-06	1.17306075
6	0.01919	3.02410359	6	1.044E-07	0.26045758	6	0.002913898	1.37777811	6	5.638E-05	1.17301351
7	0.9381519	2.10514175	7	1.562614	-1.3021563	7	0.106128132	1.27456388	7	0.0994806	1.0735893
8	8.4596389	-5.4163453	8	2.138E-05	0.2604363	8	6.896272891	-5.5155809	8	0.433471	0.73959893
9	9.6904045	-6.6471109	9	3.756E-05	0.26042012	9	4.449030719	-3.0683387	9	0.0200938	1.15297614
Promedio	3.04329364		Promedio	0.2604577		Promedio	1.38069201		Promedio	1.1730699	

En la tabla 5.17 la simulación de daño se hizo entre los líderes 5 y 6 lo cual indica una posición correcta para todos los casos de simulación excepto para 10% de simulación.

Tabla 5.18. Relación de las matrices R en el marco real sin daño y con simulación de daño en la columna exterior izquierda del primer nivel.

Relación de la matriz R en marco real 2 sin daño y con simulación de daño											
10%			20%			30%			40%		
Líder	Coef. de R con y sin daño	Diferencia del promedio con cada nodo	Líder	Coef. de R con y sin daño	Diferencia del promedio con cada nodo	Líder	Coef. de R con y sin daño	Diferencia del promedio con cada nodo	Líder	Coef. de R con y sin daño	Diferencia del promedio con cada nodo
1	0.5682019	0.95331274	1	0.0025266	0.51499027	1	2.6098799	-2.0643162	1	7.28756E-05	1.42944217
2	0.0003009	1.52121377	2	1.966E-06	0.51751493	2	0.0146998	0.53086391	2	1.20148E-05	1.42950303
3	8.822E-06	1.52150583	3	6.77E-06	0.51751012	3	0.0047538	0.54080991	3	1.38584E-05	1.42950119
4	0.001677	1.51983763	4	0.0797896	0.43772732	4	0.5270227	0.01854095	4	0.000509248	1.4290058
5	3.902E-05	1.52147563	5	2.27E-06	0.51751462	5	0.001392	0.54417165	5	1.57846E-05	1.42949926
6	0.0358887	1.48562592	6	0.0008561	0.51666081	6	0.1200746	0.42548914	6	2.25859E-05	1.42949246
7	1.4472137	0.07430096	7	0.1974864	0.32003052	7	0.0012417	0.54432198	7	1.296300119	0.13321493
8	7.0015047	-5.4799901	8	1.3819274	-0.8644105	8	0.0004635	0.54510021	8	7.146958512	-5.7174435
9	4.5611636	-3.0396489	9	1.6399949	-1.122478	9	0.0003216	0.54524213	9	0.002033613	1.42748143
Promedio	1.5215147		Promedio	0.5175169		Promedio	0.5455637		Promedio	1.429515047	

En la tabla 5.18 la simulación de daño se hizo entre los líderes 1 y 2 lo cual indica una posición correcta sólo para 20 y 40 % de simulación de daño.

Tabla 5.19. Relación de las matrices R en el marco real sin daño y con simulación de daño en la columna central del segundo nivel.

Relación de la matriz R en marco real 2 sin daño y con simulación de daño											
10%			20%			30%			40%		
Líder	Coef. de R con y sin daño	Diferencia del promedio con cada nodo	Líder	Coef. de R con y sin daño	Diferencia del promedio con cada nodo	Líder	Coef. de R con y sin daño	Diferencia del promedio con cada nodo	Líder	Coef. de R con y sin daño	Diferencia del promedio con cada nodo
1	3.7242295	-2.977068	1	0.000157492	0.5212291	1	0.7531469	2.7596943	1	0.0017113	1.057269
2	2.632E-05	0.7471353	2	3.66429E-07	0.5213862	2	1.718986	1.7938552	2	0.0004144	1.0585659
3	1.736E-05	0.7471442	3	1.37991E-06	0.5213852	3	0.8566956	2.6561456	3	0.0002471	1.0587332
4	0.001908	0.7452536	4	0.000891631	0.5204949	4	1.5081628	2.0046783	4	0.0026907	1.0562896
5	1.738E-07	0.7471614	5	3.02322E-07	0.5213863	5	0.0003041	3.5125371	5	8.482E-05	1.0588955
6	2.641E-05	0.7471352	6	0.000118978	0.5212676	6	0.0262271	3.4866141	6	0.0001746	1.0588058
7	0.0012364	0.7459252	7	0.040251801	0.4811348	7	0.2049682	3.3078729	7	0.1489142	0.9100661
8	0.0096267	0.7375349	8	2.605763333	-2.084377	8	5.1594507	-1.64661	8	5.2899107	-4.23093
9	0.0094077	0.7377539	9	1.51325503	-0.991868	9	9.1513792	-5.638538	9	0.1078057	0.9511747
Promedio	0.7471616		Promedio	0.521386563		Promedio	3.5128411		Promedio	1.0589803	

En la tabla 5.19 la simulación de daño se hizo entre los líderes 4 y 5 lo cual indica una posición correcta para todos los casos de simulación de daño.

Tabla 5.20. Relación de las matrices R en el marco real sin daño y con simulación de daño en la columna exterior izquierda del segundo nivel.

Relación de la matriz R en marco real 2 sin daño y con simulación de daño											
10%			20%			30%			40%		
Líder	Coef. de R con y sin daño	Diferencia del promedio con cada nodo	Líder	Coef. de R con y sin daño	Diferencia del promedio con cada nodo	Líder	Coef. de R con y sin daño	Diferencia del promedio con cada nodo	Líder	Coef. de R con y sin daño	Diferencia del promedio con cada nodo
1	1.4036586	2.9321854	1	0.080622053	0.2786627	1	0.007475955	0.7069253	1	0.190921	0.1234043
2	0.0042134	4.3316306	2	2.66289E-05	0.3592581	2	0.000233154	0.7141681	2	0.0023378	0.3119874
3	0.0170739	4.3187701	3	4.55177E-05	0.3592392	3	0.000215594	0.7141857	3	3.316E-06	0.3143219
4	3.2170999	1.1187442	4	0.014351967	0.3449328	4	0.02874366	0.6856576	4	0.0005973	0.3137279
5	0.0001415	4.3357025	5	8.86047E-05	0.3591962	5	0.000329461	0.7140718	5	7.377E-06	0.3143179
6	0.044386	4.2914581	6	0.047812439	0.3114723	6	0.002541195	0.7118601	6	0.0825487	0.2317766
7	2.5069783	1.8288657	7	1.327744809	-0.96846	7	0.619327591	0.0950737	7	0.2147846	0.0995407
8	7.5050865	-3.169242	8	0.685131775	-0.325847	8	3.533029879	-2.818629	8	0.5523439	-0.238019
9	13.827759	-9.491915	9	0.509557843	-0.150273	9	3.025509721	-2.311108	9	1.0572027	-0.742877
Promedio	4.335844		Promedio	0.35928476		Promedio	0.714401257		Promedio	0.3143252	

En la tabla 5.20 la simulación de daño se hizo entre los líderes 2 y 3 lo cual indica una posición correcta para todos los casos excepto para 10% de simulación de daño.

En las siguientes tablas se presenta el resumen de los resultados analíticos y experimentales del marco 2.

Tablas 5.21. Resumen del marco 2 analítico y real.

Daño	Resumen Marco 2 Analítico					
	Posición					
	Exterior P.B.	Central P.B.	Exterior 1er Niv.	Central 1er Niv.	Exterior 2do Niv.	Exterior 1er Niv.
10%	Red	Red	Red	Green	Red	Green
20%	Red	Red	Green	Green	Green	Green
30%	Red	Red	Green	Green	Green	Green
40%	Red	Red	Green	Green	Green	Green

Daño	Resumen Marco 2 Real					
	Posición					
	Exterior P.B.	Central P.B.	Exterior 1er Niv.	Central 1er Niv.	Exterior 2do Niv.	Exterior 1er Niv.
10%	Red	Red	Red	Green	Red	Green
20%	Red	Red	Green	Green	Green	Green
30%	Red	Red	Red	Green	Green	Green
40%	Red	Red	Green	Green	Green	Green

Se aprecia que en ningún caso de los resultados analíticos y experimentales para columnas inferiores arrojaron resultados correctos. También para bajos niveles de simulación de daño (10%) en la mayoría de los casos no es correcta la ubicación.

## Capítulo no. 6

### 6.- Conclusiones

Este trabajo tuvo como finalidad la detección de daño experimental. La detección se realizó en dos marcos planos a cortante.

Las características de los marcos planos a cortante es que tienen una viga con rigidez suficientemente grande en comparación con las columnas, que impiden que las uniones viga columna roten.

El daño se definió con cambios geométricos en las columnas (disminución de área), que simule una pérdida de rigidez.

Se seleccionó como base el método POD modificado. Este método consiste en la obtención de las matrices de correlación de los registros sobre la estructura. Este método busca localizar daño a través del alejamiento (desviación) que tiene la matriz de correlación con daño con respecto a la de sin daño.

En la aplicación del método analítico se utilizó registro de ruido blanco en la base de la estructura. Para los modelos reales se utilizaron registros de vibración ambiental.

A comparación de métodos tradicionales, el empleado en este estudio buscar analizar la información en nodos concentradores en cada esquina del marco. Es característica permitiría que fuera implementado en sensores inteligentes, aquellos con capacidad de análisis a nivel de sensor.

Se presentó una descripción de los modelos empleados así como el daño inducido en los mismos. Se evaluó el criterio de calibración de los modelos analíticos y se comparó con los experimentales.

De los resultados obtenidos se puede decir:

Los registros de vibración ambiental con los que se excitó los marcos 1 y 2, tienen un contenido de frecuencia de banda ancha, que no es el caso ideal de ruido blanco (excitación todas la frecuencias hasta la Nyquist). El contenido de frecuencias de banda ancha variará de acuerdo a las condiciones del entorno de la medición. Este parámetro no fue estudiado.

El método de detección de daño requirió registros de desplazamientos. En el caso del método analítico fueron obtenidos por medio del método de Newmark. Para el método experimental fue necesario convertir las aceleraciones a desplazamientos. Este procedimiento fue llevado a cabo por medio de una corrección de línea base, aunado a un filtro pasa-alta. Existen muchas metodologías para pasar de aceleraciones a desplazamientos; sin embargo en este trabajo no se estudió el efecto que estas correcciones puedan tener en la ubicación de daño sobre la estructura.

El número de sensores utilizado fue en base al estudio de Argueta (2009), en el que se indican que sensores ubicados en puntos medios son los mínimos necesarios para captar las principales formas modales. Posiblemente para daños locales las formas modales superiores son las más afectadas.

El método analítico fue capaz de detectar la ubicación de la zona de daño con las siguientes características:

Independientemente del nivel de daño inducido, el método no permite detectar daño en columnas de planta baja en cualquiera de los marcos.

Para las columnas de segundo y tercer nivel (en su caso) el método identifica la zona de daño de la estructura en un 90%; sin embargo, esto se cumple para niveles de daño superiores al 10%.

Los resultados del método experimental corroboraron lo indicado por el método analítico, con todo y sus características.

Comentarios:

Los métodos que involucran la instrumentación de estructuras indican ser procedimientos efectivos para la detección de daño, por tal motivo, se puede promover el uso de estas tecnologías.

Los trabajos futuros podrían enfocarse en la aplicación de una metodología similar a la presentada para marcos tridimensionales, y así poder acercarse más a la realidad para la detección de daño en estructuras. También, se podría considerar la opción de detección de multidaño en las estructuras.

Finalmente, se puede investigar el efecto de la elección del nodo líder como recolector de información de los registros. Este nodo podría no estar en la esquina, o podría tomar información de un mayor número de nodos adyacentes.

## REFERENCIAS

- Carpio C. 2009. “Identificación de daño estructural de forma descentralizada de marcos planos a cortante”. Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, México
- Galvanetto U., Violaris G. 2007. “Numerical investigation of a new damage detection method based on proper orthogonal decomposition”. Mechanical System and Signal Processing 21.
- Hernández R. 2010. “Configuración de una red inalámbrica a una estructura.” Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, México
- Franco G.J. 2006 “Detección de daño estructural mediante métodos de correlación modal”. Universidad Nacional Autónoma de México, Escuela Nacional de Estudios Profesionales, Acatlán. México
- Iglesias J, Robles F, De la Cera J, González O. “Reparación de estructuras de concreto y mampostería”. Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, México, 1985.
- J. Cauich–Cupul, J.A. Rodríguez–Laviada y C.R. Ríos–Soberanis, “Detección del daño generado en materiales compuestos de matriz polimérica empleando la técnica de emisión acústica”. Centro de Investigación Científica de Yucatán, Unidad de Materiales Mérida, México, Octubre de 2007.
- PCB Piezotronics Inc, “Model 393A03, Accelerometer, Installation and Operating Manual”, disponible en línea:  
[http://www.pcb.com/products/browse\\_productlist.asp?RequestType=Paging&CategoryType=ProductType&CategoryId=316&app=&tech=&config=&PageNumberRequested=23&SearchCriteriaWithin=](http://www.pcb.com/products/browse_productlist.asp?RequestType=Paging&CategoryType=ProductType&CategoryId=316&app=&tech=&config=&PageNumberRequested=23&SearchCriteriaWithin=)
- PCB Piezotronics Inc, “Model 482A22, Signal Conditioner, Installation and Operating Manual”, disponible en línea:  
<http://www.imisensors.com/SearchResults.aspx?term=signal%20conditiones>
- Spectral Dynamics Inc. (2001), “SIGLAB Manuals, User’s Guide”

Pernia-Márquez, *“Introducción a la Medición de Vibración”*, disponible en línea:  
[http://www.ing.ula.ve/~dpernia/pdfs/vibracion\\_mecanica.pdf](http://www.ing.ula.ve/~dpernia/pdfs/vibracion_mecanica.pdf)

Matlab® 2007a, “The Language of Technical Computing”, Version 7.8.0.347,  
Copyright 1984 – 2009, The MathWorks Inc.

Argueta X., 2009 *“Caracterización dinámica mediante la implantación de redes distribuidas de sensores”*. Universidad Autónoma Metropolitana, Azcapotzalco México.

Tedesco, J. W., W G Mc Dougal y C A Ross (1999), *“Structural dynamics: theory and applications”*, Addison Wesley, EUA.

(Copyright © FEMCAE 2010.)

[http://es.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9todo\\_experimental#Clasificaciones](http://es.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9todo_experimental#Clasificaciones)

[http://es.wikipedia.org/wiki/Adquisici%C3%B3n\\_de\\_datos](http://es.wikipedia.org/wiki/Adquisici%C3%B3n_de_datos)

[http://secre.ssn.unam.mx/SSN/Doc/Mx\\_sismo/mhist.htm](http://secre.ssn.unam.mx/SSN/Doc/Mx_sismo/mhist.htm)

[http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S140577432008000200005&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S140577432008000200005&script=sci_arttext)

## Anexo 1

```
%Programa para obtener los desplazamientos por el Método de Newmark
clear all; close all; clc;
for III=1:5
    III
    dat=load('datos.txt');
    dan=[1 0.9 0.8 0.7 0.6];
    barras
    rigidez
    masas
    [FM,W2]=eig(KT,MT);
    ww=sqrt(diag(W2));
    Per=2*pi./diag(sqrt(W2));
    if(III==1)
    demas100
    end
    if(III==2)
    demas90
    end
    if(III==3)
    demas80
    end
    if(III==4)
    demas70
    end
    if(III==5)
    demas60
    end

end
metodo

% Programa de barras
CO=load('coord.txt');
for I=1:dat(2)
    if CO(I,3)==0 & CO(I,4)==0
        M(I)='.';
    end
    if (CO(I,3)==1 & CO(I,4)==0) | (CO(I,3)==0 & CO(I,4)==1)
        M(I)='o';
    end
    if (CO(I,3)==1 & CO(I,4)==1)
        M(I)='^';
    end
end
end

figure(1)
plot(CO(1,1),CO(1,2),M(1),'markersize',8,'color','r','MarkerFaceColor','r')
text(0.955*CO(1,1),CO(1,2),'1','color','m','fontsize',14)
hold
for I=2:dat(2)
```

```

plot(CO(I,1),CO(I,2),M(I),'markersize',8,'color','r','MarkerFaceColor','r')
text(0.95*CO(I,1),CO(I,2),num2str(I),'color','m','fontsize',14)
end
CN=load('conec.txt');
cl=['b','r','m','g','y','k'];
for I=1:dat(1)

%line([CO(CN(I,1),1),CO(CN(I,2),1)],[CO(CN(I,1),2),CO(CN(I,2),2)],[CO(CN(
I,1),3),CO(CN(I,3),3)],'color',cl(CN(I,3)),...

line([CO(CN(I,1),1),CO(CN(I,2),1)],[CO(CN(I,1),2),CO(CN(I,2),2)],'color',
cl(CN(I,3)),...
'linewidth',3)
text(CO(CN(I,1),1)+(CO(CN(I,2),1)-
CO(CN(I,1),1))/2,CO(CN(I,1),2)+(CO(CN(I,2),2)-CO(CN(I,1),2))/2,...
num2str(I),'FontSize',18)
end

% Cálculo de las matrices de rigidez

mate=load('mate.txt');
for I=1:dat(1)
    L(I)=norm([(CO(CN(I,2),1)-CO(CN(I,1),1)), (CO(CN(I,2),2)-
CO(CN(I,1),2))]);
    S(I)=(CO(CN(I,2),2)-CO(CN(I,1),2))/L(I);
    C(I)=(CO(CN(I,2),1)-CO(CN(I,1),1))/L(I);
    if (CN(I,3)==3)
        fass=dan(III);
    else
        fass=1;
    end
    EE=mate(CN(I,3),1);
    AA=mate(CN(I,3),2);
    II=mate(CN(I,3),3)*fass;
    K(:, :, I)=[EE*AA/L(I) 0 0 -EE*AA/L(I) 0 0
                0 12*EE*II/L(I)^3 6*EE*II/L(I)^2 0 -12*EE*II/L(I)^3
6*EE*II/L(I)^2
                0 6*EE*II/L(I)^2 4*EE*II/L(I) 0 -6*EE*II/L(I)^2
2*EE*II/L(I)
                -EE*AA/L(I) 0 0 EE*AA/L(I) 0 0
                0 -12*EE*II/L(I)^3 -6*EE*II/L(I)^2 0 12*EE*II/L(I)^3 -
6*EE*II/L(I)^2
                0 6*EE*II/L(I)^2 2*EE*II/L(I) 0 -6*EE*II/L(I)^2
4*EE*II/L(I)];
    T(:, :, I)=[C(I) S(I) 0 0 0 0
                -S(I) C(I) 0 0 0 0
                0 0 1 0 0 0
                0 0 0 C(I) S(I) 0
                0 0 0 -S(I) C(I) 0
                0 0 0 0 0 1];
end

for I=1:dat(1)

```

```

        temp1(:, :)=T(:, :, I);
        temp2(:, :)=K(:, :, I);
        KG(:, :, I)=temp1'*temp2*temp1;
    end

% calculo de los grados de libertad
cont=0;
for I=1:dat(2)
    for J=3:5
        if CO(I,J)==1
            V(I,J-2)=0;
        end
        if CO(I,J)==0
            cont=cont+1;
            V(I,J-2)=cont;
        end
    end
end

maxgdl=cont;
% construccion de vectores para cada matriz global
for I=1:dat(1)
    Vk(I, :)=[V(CN(I,1), :), V(CN(I,2), :)]';
end

% Ensamble de Matriz
KT=zeros(maxgdl, maxgdl);
for I=1:dat(1)
    for CC=1:6
        if Vk(I, CC) ~=0
            for RR=1:6
                if Vk(I, RR) ~=0

KT(Vk(I, RR), Vk(I, CC))=KG(RR, CC, I)+KT(Vk(I, RR), Vk(I, CC));
                    end
                end
            end
        end
    end
end

% Programa que calcula las masas de cada nodo
g=.0512;
for I=1:dat(1)
    L(I)=norm([(CO(CN(I,2),1)-CO(CN(I,1),1)), (CO(CN(I,2),2)-CO(CN(I,1),2))]);
    EE=mate(CN(I,3),1);
    AA=mate(CN(I,3),2);
    DEN=mate(CN(I,3),4);
    MG(:, :, I)=[L(I)*0.5*AA*DEN/g 0 0 0 0 0
                0 L(I)*0.5*AA*DEN/g 0 0 0 0
                0 0 (L(I)*AA*DEN/g)*L(I)^2/(3) 0 0 0
                0 0 0 L(I)*0.5*AA*DEN/g 0 0
                0 0 0 0 L(I)*0.5*AA*DEN/g 0
                0 0 0 0 0 (L(I)*AA*DEN/g)*L(I)^2/(3)];
end

```

```

% Ensamble de Matriz
MT=zeros(maxgdl,maxgdl);
for I=1:dat(1)
    for CC=1:6
        if Vk(I,CC) ~=0
            for RR=1:6
                if Vk(I,RR) ~=0

MT(Vk(I,RR),Vk(I,CC))=MG(RR,CC,I)+MT(Vk(I,RR),Vk(I,CC));
                    end
                end
            end
        end
    end
end

% Programa que calcula los desplazamientos en cada grado de libertad

ST=300;
st=0.001;
seed=10000;
sim('genera');
% figure
% plot(tout,sismo)
eps=0.02;
inter=[1 ww(1)^2;1 ww(2)^2]^-1*[2*ww(1)*0.02;2*ww(2)*0.02];
alfa=inter(1);
beta=inter(2);
epss=0.5*(alfa./ww(3:end)+beta+ww(3:end));
epstot=[eps;eps;epss];
Mmod=FM'*MT*FM;
Kmod=FM'*KT*FM;
Cmod=diag(2.*epstot.*ww)*Mmod;
[nps,dummy]=size(sismo);
vector=zeros(cont,nps);
for I=1:3:cont;
    vector(I,:)=1.*sismo';
end
Pt=FM'*vector;
desp=zeros(30,nps);
vel=zeros(30,nps);
acc=zeros(30,nps);
%Newmark
a0=1/0.25/st^2; a1=0.5/0.25/st;a2=1/.25/st;a3=(1/2/0.25)-
1;a4=1;a5=0;a6=st*0.5;a7=0.5*st;
for I=1:cont
    ke=ww(I)^2+a0*1+a1*2*epstot(I)*ww(I);
    for J=1:nps-1

Fe=Pt(I,J+1)+Mmod(I,I)*(a0*desp(I,J)+a2*vel(I,J)+a3*acc(I,J))+2*epstot(I)
*ww(I)*...
        (a1*desp(I,J)+a4*vel(I,J)+a5*acc(I,J));
        desp(I,J+1)=ke^-1*Fe;
        acc(I,J+1)=a0*(desp(I,J+1)-desp(I,J))-a2*vel(I,J)-a3*acc(I,J);
        vel(I,J+1)=vel(I,J)+a6*acc(I,J)+a7*acc(I,J+1);
    end
end

```

```

        end
    end
    despf=FM*desp;
    velf=FM*vel;
    accf=FM*acc;
    figure
    % plot(tout,despf(1,:), 'r--
    ',tout,despf(4,:), 'b',tout,despf(7,:), 'g:', tout,despf(10,:), 'k:')
    % plot(tout,accf(1,:), 'r--
    ',tout,accf(4,:), 'b',tout,accf(7,:), 'g:', tout,accf(10,:), 'k:')
    % legend
    despr=zeros(10,nps);
    % accr=zeros(10,nps);
    conta=0;
    for I=1:3:30
        conta=conta+1;
        despr(conta,:)=despf(I,:);
        % accr(conta,:)=accf(I,:);
    end
    lider1=(despr([1 2 3 6],:));
    lider2=(despr([3 4 5],:));
    lider3=(despr([5 7 8],:));
    lider4=(despr([6 8 9 10],:));

    % lider1=(accr([1 2 3 6],:));
    % lider2=(accr([3 4 5],:));
    % lider3=(accr([5 7 8],:));
    % lider4=(accr([6 8 9 10],:));

    R1=lider1*lider1';
    R2=lider2*lider2';
    R3=lider3*lider3';
    R4=lider4*lider4';

    save R100.mat R1 R2 R3 R4 -mat

    % Programa que calcula los coeficientes de R en cada nodo

    clear all; close all; clc;
    load('R100.mat');
    load('R90.mat');
    load('R80.mat');
    load('R70.mat');
    load('R60.mat');

    grupo1=mean(mean(R1));
    grupo2=mean(mean(R2));
    grupo3=mean(mean(R3));
    grupo4=mean(mean(R4));

    grupo1d90=mean(mean(R1_90));
    grupo2d90=mean(mean(R2_90));
    grupo3d90=mean(mean(R3_90));
    grupo4d90=mean(mean(R4_90));

    glob=[grupo1,grupo2,grupo3,grupo4];

```

```
globd90=[grupo1d90,grupo2d90,grupo3d90,grupo4d90];
```

```
grupo1d80=mean(mean(R1_80));
```

```
grupo2d80=mean(mean(R2_80));
```

```
grupo3d80=mean(mean(R3_80));
```

```
grupo4d80=mean(mean(R4_80));
```

```
globd80=[grupo1d80,grupo2d80,grupo3d80,grupo4d80];
```

```
grupo1d70=mean(mean(R1_70));
```

```
grupo2d70=mean(mean(R2_70));
```

```
grupo3d70=mean(mean(R3_70));
```

```
grupo4d70=mean(mean(R4_70));
```

```
globd70=[grupo1d70,grupo2d70,grupo3d70,grupo4d70];
```

```
grupo1d60=mean(mean(R1_60));
```

```
grupo2d60=mean(mean(R2_60));
```

```
grupo3d60=mean(mean(R3_60));
```

```
grupo4d60=mean(mean(R4_60));
```

```
globd60=[grupo1d60,grupo2d60,grupo3d60,grupo4d60];
```

```
hh90=(globd90./glob);
```

```
hh80=(globd80./glob);
```

```
hh70=(globd70./glob);
```

```
hh60=(globd60./glob);
```

```
feo=[hh90' hh80' hh70' hh60']
```

```
hh90'
```

```
hh80'
```

```
hh70'
```

```
hh60'
```