



*UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO*
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



MAESTRÍA EN INGENIERÍA EN EL ÁREA DE
ESTRUCTURAS

TESIS:

*“IDENTIFICACIÓN DE DAÑO EN ARCOS DE
MAMPOSTERÍA CON BASE EN VIBRACIÓN AMBIENTAL“*

PRESENTA:

ING. FRANCISCO FILOGONIO HERNÁNDEZ OREJEL

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA EN EL ÁREA DE ESTRUCTURAS

Asesor:

DR. EN I. GUILLERMO MARTÍNEZ RUÍZ

MORELIA, MICHOACÁN FEBRERO 2015.

DEDICATORIA

A DIOS

Por permitirme culminar una etapa más en mi vida y por concederme salud, bienestar y fortaleza.

"Sobre todas las cosas cuida tu corazón, porque este determina el rumbo de tu vida" Proverbios 4:23 (NTV)

A MI FAMILIA

Por haber estado en los momentos difíciles para animarme y recordarme que los principios y valores son el fundamento de una vida de éxito.

A MI ESPOSA

Por estar a mi lado en las buenas y malas, pero sobre todo por apoyarme incondicionalmente en todo el proceso para la culminación de este trabajo.

"La disciplina tarde o temprano vencerá a la inteligencia"

AGRADECIMIENTOS

Al director de la tesis:

DR. EN I. GUILLERMO MARTÍNEZ RUÍZ

Por su paciencia, motivación y conocimiento brindado.

Al jefe de división de posgrado:

DR. CARLOS CHÁVEZ NEGRETE

Por todas la facilidades brindadas para la realización del presente trabajo.

Al CONACyT:

Por brindarme el apoyo, para poder culminar estudios de posgrado.

“IDENTIFICACIÓN DE DAÑO EN ARCOS DE MAMPOSTERÍA CON BASE EN VIBRACIÓN AMBIENTAL“

RESUMEN

En el presente trabajo se plasmará una metodología no destructiva para la identificación del daño en elementos de mampostería simple, haciendo uso del monitoreo estructural con equipo acelerométrico realizando registros de vibración ambiental. Con la finalidad de recopilar exitosamente la información y dada la importancia de los edificios para los cuales se desea aplicar esta metodología, se decidió como un primer paso el tratar con elementos de mampostería construidos en laboratorio para poder tener el control de las condiciones de análisis, ya que se requiere primeramente realizar una inspección del estado del elemento sin daño, para posteriormente infligir un daño progresivo y realizar un análisis que describa cada estado de daño.

Palabras clave: Identificación de daño, vibración ambiental, sensores, arcos.

ABSTRACT

This work will be reflected a non-destructive methodology for the identification of damage to unreinforced masonry elements, making use of structural monitoring with accelerometric sensors by performing environmental vibration records. In order to successfully compile the information and the importance of buildings for which we want to apply this methodology, it was decided as a first step in dealing with masonry elements constructed in the laboratory to take control of the analysis conditions, primarily because it requires an inspection of the state of the element without damage to later inflict progressive damage and an analysis that describes each damage state.

Keywords: Damage detection, environmental vibration, sensors, arch.

IDENTIFICACIÓN DE DAÑO EN ARCOS DE MAMPOSTERÍA CON BASE EN VIBRACIÓN
AMBIENTAL

Índice

| | |
|--|----|
| 1. Introducción | 1 |
| 2. Dinámica Estructural | 4 |
| 3. Identificación Dinámica de Daño | 14 |
| 3.1 Estado del Conocimiento | 14 |
| 3.2 Métodos Generales | 24 |
| 3.2.1. Métodos de Identificación de Daño basados en Monitoreo | |
| Estructural | 26 |
| Criterio de Correlación Modal (MAC) / Diferencia Modal | |
| Normalizada (NMD) | 27 |
| Criterio Coordinado de Correlación Modal (CoMAC) | 28 |
| Método del Cambio de la Flexibilidad, Medida Dinámicamente | 29 |
| Método del Cambio de la Rigidez, Medida Dinámicamente | 30 |
| Comparación de Curvaturas Modales Mediante el Enfoque Mixto .. | 31 |
| Enfoque Mixto | 32 |
| Índice de Daño (DI) | 34 |
| 4. Muestreo Experimental y Equipo Utilizado | 36 |
| Razones y variables para la evaluación operacional | 37 |
| Adquisición y gestión de datos | 38 |
| Identificación antes y después del daño | 38 |
| Cuantificación del daño | 38 |
| Modelos estructurales | 39 |
| Predicción | 39 |
| 4.1. Equipo Utilizado | 40 |

| | |
|---|-----|
| 4.1.1. Técnicas de Identificación empleadas | 42 |
| 4.1.2. Identificación de Frecuencias y Modos | 42 |
| 4.1.3. Método de Identificación de Daño Basado en Cambios en la Matriz de Rigidez y Flexibilidades | 46 |
| 5. Aplicaciones de Identificación del daño en Arcos de Mampostería | 49 |
| 5.1. Estructura en Estudio | 50 |
| Qué es un arco | 50 |
| Componentes de un arco | 51 |
| Elementos | 51 |
| Dimensiones | 51 |
| Líneas | 51 |
| Superficies | 51 |
| Juntas | 52 |
| Arco de medio punto o redondo | 52 |
| Arco rebajado o de segmento | 53 |
| 5.1.1. Arco de Medio Punto | 54 |
| 5.1.2. Arco Rebajado | 56 |
| Campaña Experimental | 58 |
| 6. Conclusiones y Líneas Futuras | 105 |
| Anexo I | 108 |
| Anexo II | 114 |

Índice de Figuras

| | |
|-------------------------|----|
| <i>Figura 2.1</i> | 5 |
| <i>Figura 2.2</i> | 6 |
| <i>Figura 2.3</i> | 7 |
| <i>Figura 2.4</i> | 8 |
| <i>Figura 2.5</i> | 9 |
| <i>Figura 2.6</i> | 9 |
| <i>Figura 2.7</i> | 10 |
| <i>Figura 3.1</i> | 17 |
| <i>Figura 3.2</i> | 17 |
| <i>Figura 3.3</i> | 20 |
| <i>Figura 3.4</i> | 22 |
| <i>Figura 3.5</i> | 22 |
| <i>Figura 3.6</i> | 23 |
| <i>Figura 3.7</i> | 23 |
| <i>Figura 3.8</i> | 23 |
| <i>Figura 3.9</i> | 24 |
| <i>Figura 4.1</i> | 41 |
| <i>Figura 4.2</i> | 41 |
| <i>Figura 4.3</i> | 43 |
| <i>Figura 4.4</i> | 44 |
| <i>Figura 4.5</i> | 45 |
| <i>Figura 5.1</i> | 52 |
| <i>Figura 5.2</i> | 53 |
| <i>Figura 5.3</i> | 53 |
| <i>Figura 5.4</i> | 54 |
| <i>Figura 5.5</i> | 55 |
| <i>Figura 5.6</i> | 56 |
| <i>Figura 5.7</i> | 57 |

| | |
|--------------------------|----|
| <i>Figura 5.8</i> | 58 |
| <i>Figura 5.9</i> | 59 |
| <i>Figura 5.10</i> | 60 |
| <i>Figura 5.11</i> | 61 |
| <i>Figura 5.12</i> | 62 |
| <i>Figura 5.13</i> | 63 |
| <i>Figura 5.14</i> | 63 |
| <i>Figura 5.15</i> | 64 |
| <i>Figura 5.16</i> | 65 |
| <i>Figura 5.17</i> | 66 |
| <i>Figura 5.18</i> | 67 |
| <i>Figura 5.19</i> | 68 |
| <i>Figura 5.20</i> | 68 |
| <i>Figura 5.21</i> | 69 |
| <i>Figura 5.22</i> | 70 |
| <i>Figura 5.23</i> | 71 |
| <i>Figura 5.24</i> | 72 |
| <i>Figura 5.25</i> | 72 |
| <i>Figura 5.26</i> | 73 |
| <i>Figura 5.27</i> | 74 |
| <i>Figura 5.28</i> | 75 |
| <i>Figura 5.29</i> | 75 |
| <i>Figura 5.30</i> | 76 |
| <i>Figura 5.31</i> | 77 |
| <i>Figura 5.32</i> | 78 |
| <i>Figura 5.33</i> | 79 |
| <i>Figura 5.34</i> | 80 |
| <i>Figura 5.35</i> | 81 |
| <i>Figura 5.36</i> | 82 |
| <i>Figura 5.37</i> | 83 |

| | |
|--------------------------|-----|
| <i>Figura 5.38</i> | 84 |
| <i>Figura 5.39</i> | 84 |
| <i>Figura 5.40</i> | 85 |
| <i>Figura 5.41</i> | 85 |
| <i>Figura 5.42</i> | 86 |
| <i>Figura 5.43</i> | 87 |
| <i>Figura 5.44</i> | 87 |
| <i>Figura 5.45</i> | 88 |
| <i>Figura 5.46</i> | 89 |
| <i>Figura 5.47</i> | 90 |
| <i>Figura 5.48</i> | 91 |
| <i>Figura 5.49</i> | 92 |
| <i>Figura 5.50</i> | 93 |
| <i>Figura 5.51</i> | 94 |
| <i>Figura 5.52</i> | 95 |
| <i>Figura 5.53</i> | 96 |
| <i>Figura 5.54</i> | 96 |
| <i>Figura 5.55</i> | 97 |
| <i>Figura 5.56</i> | 97 |
| <i>Figura 5.57</i> | 98 |
| <i>Figura 5.58</i> | 99 |
| <i>Figura 5.59</i> | 100 |
| <i>Figura 5.60</i> | 101 |
| <i>Figura 5.61</i> | 102 |
| <i>Figura 5.62</i> | 103 |
| <i>Figura 5.63</i> | 103 |
| <i>Figura 5.64</i> | 104 |
| <i>Figura I.1</i> | 108 |
| <i>Figura I.2</i> | 109 |
| <i>Figura I.3</i> | 109 |

| | | |
|---------------------|-------|-----|
| <i>Figura I.4</i> | ..... | 110 |
| <i>Figura I.5</i> | ..... | 110 |
| <i>Figura I.6</i> | ..... | 111 |
| <i>Figura I.7</i> | ..... | 112 |
| <i>Figura I.8</i> | ..... | 113 |
| <i>Figura II.1</i> | ..... | 114 |
| <i>Figura II.2</i> | ..... | 114 |
| <i>Figura II.3</i> | ..... | 115 |
| <i>Figura II.4</i> | ..... | 115 |
| <i>Figura II.5</i> | ..... | 116 |
| <i>Figura II.6</i> | ..... | 116 |
| <i>Figura II.7</i> | ..... | 117 |
| <i>Figura II.8</i> | ..... | 117 |
| <i>Figura II.9</i> | ..... | 118 |
| <i>Figura II.10</i> | ..... | 119 |

Índice de Tablas

| | | |
|----------------|-------|----|
| <i>Tabla 1</i> | ..... | 76 |
| <i>Tabla 2</i> | ..... | 76 |
| <i>Tabla 3</i> | ..... | 77 |
| <i>Tabla 4</i> | ..... | 78 |
| <i>Tabla 5</i> | ..... | 79 |
| <i>Tabla 6</i> | ..... | 80 |
| <i>Tabla 7</i> | ..... | 81 |
| <i>Tabla 8</i> | ..... | 82 |



INTRODUCCIÓN

Las edificaciones históricas son consideradas como parte fundamental en la cultura de la sociedad actual, dado a que no solo forman parte de la historia de una ciudad, sino que además contribuyen en la economía de muchas de ellas y en ocasiones hasta de países enteros, porque al igual que las maravillas naturales estos edificios resultan ser gratas atracciones para el turismo. De ahí la necesidad de preservar el patrimonio histórico, ya que no solo tiene un impacto cultural en las ciudades, sino que también se refleja en la economía y el desarrollo de las mismas. Por lo tanto la evaluación de la seguridad resulta importante para construcciones patrimoniales.

Pero en el proceso de preservación de dichos sitios, la evaluación y monitoreo del daño deberá enfocarse en una metodología no destructiva, dado a que se intenta que estos edificios sufran una mínima intervención que modifique su concepción original. En este caso resultan bastante atractivos y prácticos los métodos de observación combinados con algún método que, de manera analítica o con ayuda de alguna herramienta de medición y procesamiento se pueda identificar la zona dañada y en muchas ocasiones hasta la línea que siguen las fracturas que en bastantes casos no son apreciables a simple vista, ya que se encuentran bajo intervenciones de tipo cosmético.

Se tiene conocimiento de que las cargas de servicio, acciones accidentales y hasta la influencia ambiental pueden causar daño en las edificaciones antiguas. Debido a esto el mantenimiento a lo largo de la vida útil de la estructura juega un papel muy importante. En el caso del patrimonio histórico el mantenimiento es de mayor interés dada su importancia cultural, la seguridad de los visitantes, potenciales riesgos naturales y la acumulación de factores químicos, físicos y mecánicos del daño en la estructura a lo largo de su vida.



En los últimos años se han realizado extensas investigaciones en torno a la conservación de edificaciones históricas, las cuales han llevado a desarrollos en la inspección, estudios o ensayos no destructivos, monitoreo y análisis de estos monumentos. No obstante la total comprensión, el análisis y las técnicas correctas para la preservación de estas edificaciones siguen siendo un gran reto actualmente.

Además por la complejidad en su geometría, la heterogeneidad que existe en las propiedades de sus materiales, el poco y casi nulo conocimiento sobre los daños presentes en la estructura y la falta de disposiciones que contribuyan al trato correcto de dichas edificaciones, siguen siendo un gran desafío para la ingeniería. Sumado a todo esto las restricciones que se tienen para su acceso, los altos costos que derivan del diagnóstico y su inspección, a menudo resultan en una reducción de la información relativa a estas construcciones.

Dado lo anterior es importante proponer una metodologías, entre las cuales se incluyan la incorporación de técnicas no destructivas, como lo es el monitoreo estructural con equipo acelerométrico (vibraciones ambientales). Actualmente en la literatura se presentan gran variedad de métodos que su fundamento está en la identificación de daño basado en mediciones de vibración, pero desafortunadamente pocos de estos trabajos se han aplicado en estructuras de mampostería, como lo son los edificios históricos. La práctica actual de monitoreo de la salud estructural aún se basa principalmente en la inspección visual, pero gracias al adelanto tecnológico de las últimas décadas es posible realizar un monitoreo continuo de una estructura, instalando una gran cantidad de sensores y realizando lecturas en tiempo real. Ahora el reto es decidir qué información es de importancia desde el punto de vista estructural y el cómo se debe almacenar y procesar para su análisis.

Por las razones expuestas, un estudio para la identificación de daño mediante técnicas no destructivas cobra gran importancia en la preservación de edificaciones consideradas como patrimonio cultural.



Por lo anteriormente mencionado, el objetivo principal del presente trabajo es la identificación de daño empleando alguna de las metodologías utilizadas en la práctica, para lo cual será necesario identificar primeramente las técnicas existentes para la evaluación de daño en estructuras de mampostería simple, analizar cuál de estas técnicas se pueden aplicar para así mismo seleccionar el equipo a utilizar y planear las pruebas, para poder lograr una recopilación de datos exitosa que nos asegure una correcta identificación del daño, para finalmente poder aplicar dicha metodología a elementos de mampostería.

Debido a que precisamente lo que se busca es el resguardo del patrimonio, se decidió como un primer paso el tratar con elementos de mampostería construidos en laboratorio, para poder tener control de las condiciones de análisis, ya que primeramente será necesario realizar una inspección del estado del elemento sin daño, para posteriormente infligir un daño progresivo con el cual se pueda inducir a la falla y realizar un análisis de identificación secuencial que describa cada estado de daño, logrando así una adecuada correspondencia entre el comportamiento del modelo de análisis y las fallas internas del elemento.



2. DINÁMICA ESTRUCTURAL

La dinámica estructural describe el comportamiento de un sistema ante efecto de una acción externa (carga estática o dinámica), para lo cual es necesario hacer mención de algunos conceptos básicos.

Una *fuerza dinámica* es aquella que va cambiando respecto al tiempo, su variación puede ser en magnitud, dirección o sentido.

Considerando lo anterior una *fuerza estática* es un caso particular donde la fuerza no varía en el tiempo, es decir $F(t) = \text{constante}$.

Por ejemplo las fuerzas producidas por la acción de un sismo son claramente dinámicas y por consiguiente su respuesta también será dinámica.

Se le denomina respuesta al resultado o estado final de los elementos mecánicos en las estructuras.

Entonces, la dinámica estructural permite correlacionar modelos matemáticos obtenidos de un cuerpo en equilibrio que representa un sistema estructural, lo cual nos servirá para determinar la respuesta de la estructura sometida a una acción que varía con el tiempo. Las respuestas en una estructura pueden ser aceleraciones, velocidades, desplazamientos, fuerzas normal, cortante y momento flexionante.

En dinámica estructural, el número de coordenadas independientes entre sí necesarias para definir la posición deformada de un sistema en cualquier instante de tiempo se conoce como el *número de grados de libertad*. Toda estructura tiene un número infinito de grados de libertad (Paz, 1992). Sin embargo, la idealización de un modelo matemático permite reducir los grados de libertad a un determinado número y en algunos casos a uno



solo. Por lo regular los grados de libertad se asocian a los posibles desplazamientos y giros que puede tener una estructura ante una excitación. Los grados de libertad en una estructura pueden se pueden representar por medio de un modelo matemático (ver Figura 2.1) el cual cuenta con los siguientes elementos: masa (m) que representa la masa o propiedad de inercia de una estructura; un resorte (k) que representa las fuerzas internas del sistema y la capacidad de la estructura de albergar energía potencial; amortiguamiento (c) que representa las características friccionales y la pérdida de energía de la estructura y finalmente una fuerza de excitación ($F(t)$) la cual a su vez representa las fuerzas exteriores que actúan sobre el sistema estructural, la fuerza $F(t)$ se escribe de esta forma para indicar que es una función del tiempo (*Paz, 1992*).

Dicha representación matemática proporciona un conocimiento total del comportamiento del modelo, pero solo proporciona información aproximada acerca del comportamiento físico del sistema real. Pero desde el punto de vista práctico la información obtenida del análisis del modelo matemático es suficiente para representar el comportamiento dinámico del sistema estructural real, así como sus especificaciones para el diseño y seguridad del mismo.

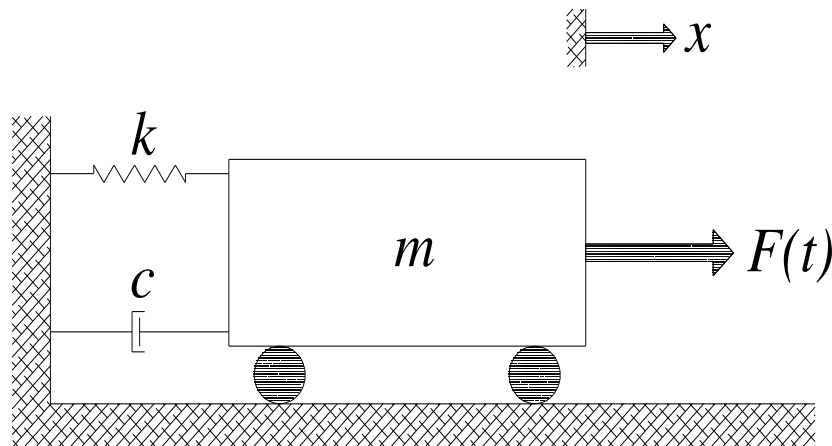


Figura 2.1. Modelo matemático de un sistema de un grado de libertad.



La *rigidez* es la fuerza necesaria para generar un desplazamiento unitario en la dirección de la fuerza, es decir, es la relación entre la fuerza o momento y el desplazamiento o giro que estos producen respectivamente. Esto solo es válido mientras que la relación entre fuerza y desplazamiento sea lineal ($k = F/d$).

Como resultado del movimiento de un objeto la energía cinética se transforma disipándose en distintas formas, esto ocasiona que el objeto se detenga hasta su reposo. A todas estas fuentes de disipación de energía las podemos agrupar en un solo término llamado como *amortiguamiento*, cuyo efecto es equivalente a una fuerza que se opone al movimiento (Paz, 1992). Las fuentes de disipación de energía son las deformaciones de los elementos estructurales, la fricción con elementos no estructurales, la imperfección de los materiales con los que se construyó la estructura, la interacción con la superficie del suelo e incluso la fricción con el aire.

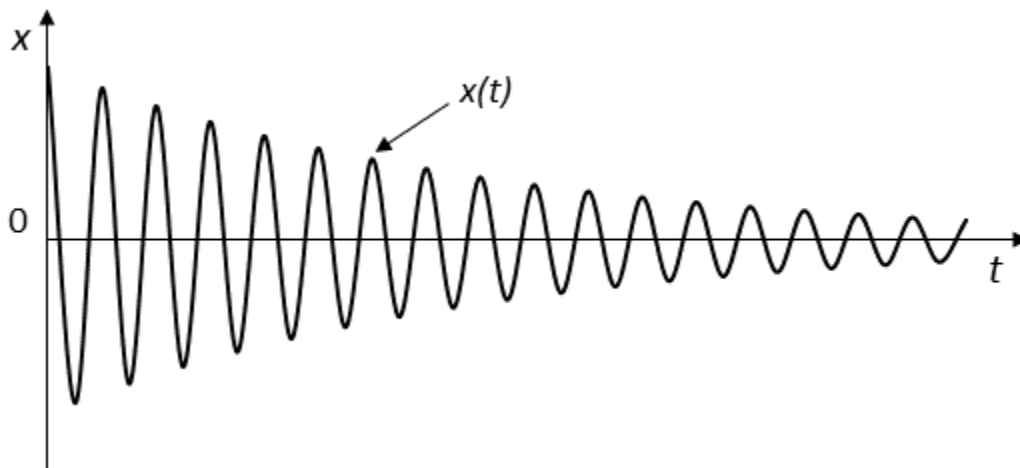


Figura 2.2. Decaimiento de la amplitud de vibración de un oscilador armónico amortiguado.

La magnitud que mide el número de repeticiones por unidad de tiempo de cualquier fenómeno o suceso periódico es conocida con el nombre de *frecuencia* (Paz, 1992). Para calcular la frecuencia de un suceso, se contabiliza el número de ocurrencias del mismo, teniendo en cuenta un intervalo temporal, luego estas repeticiones se dividen por el tiempo transcurrido y su unidad de medición son los hercios (Hz):



$$1 \text{ Hz} = 1/s \quad 2.1$$

Análíticamente la frecuencia circular de una estructura se obtiene a partir de su rigidez y su masa:

$$\omega = \sqrt{(K/m)} \quad (\text{rad} / \text{seg}) \quad 2.2$$

Y en función de la frecuencia circular se puede obtener la frecuencia natural:

$$f = \omega/2\pi \quad (\text{Hz}) \quad 2.3$$

El lapso mínimo que separa dos instantes en los que un sistema se encuentra exactamente en el mismo estado, es decir posiciones iguales, velocidades iguales y amplitudes iguales es conocido como *periodo* (Paz, 1992). Entonces, el periodo es el tiempo necesario para completar una longitud de onda o en términos generalizados es el tiempo que se demora un ciclo de la onda en volver a iniciar.

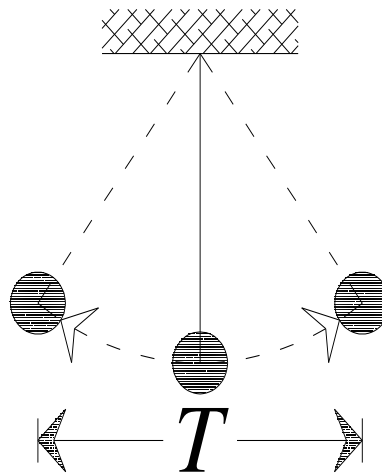


Figura 2.3. El péndulo como ejemplo representativo del periodo.



Gráficamente el periodo es el tiempo transcurrido entre dos crestas o valles sucesivos en una onda (Figura 2.4).

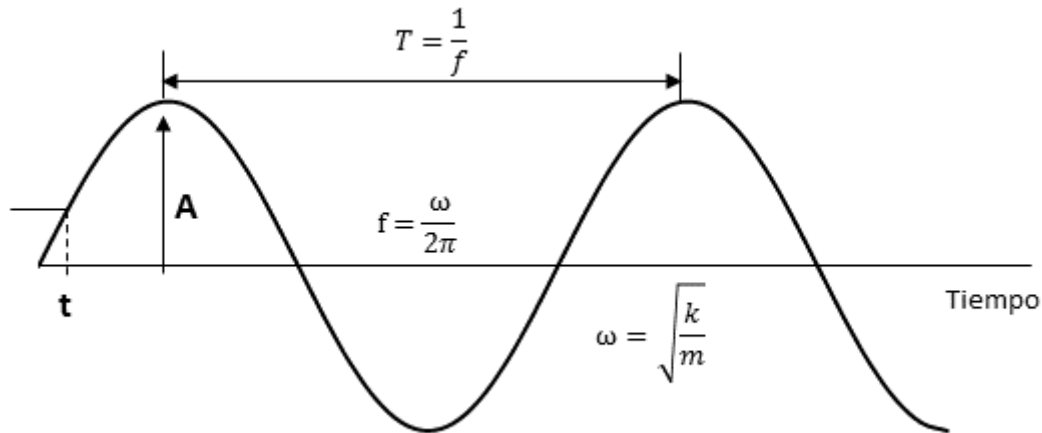


Figura 2.4. Periodo en una amplitud de onda.

Mientras que analíticamente el periodo se representa como el inverso de la frecuencia:

$$T = 2\pi/\omega \quad (\text{Seg.}) \quad 2.4$$

$$T = 1/f \quad (\text{Seg.}) \quad 2.5$$

Los *modos de vibración* son una propiedad inherente de las estructuras, los cuales se pueden determinar por las propiedades del material, geometría, masa, rigidez, y amortiguamiento (*Paz, 1992*). Cada modo se define por una frecuencia natural y una forma modal.

Un sistema vibratorio de n grados de libertad tiene por lo general n diferentes frecuencias naturales. Desde el punto de vista físico, un modo de vibración de una estructura es caracterizado por una frecuencia natural en la cual el movimiento predominante de la estructura es una forma de onda bien definida que se denomina forma modal (ver Figura 2.5).



Figura 2.5. Formas modales en el sistema estructural representado por marcos en tres niveles.

Un sistema de un grado de libertad en que se aplica una fuerza $F(t)$ sobre una masa m , en dirección x (positivo) como el planteado en la Figura 2.1, la ecuación de movimiento que describe a este sistema puede obtenerse aplicando el principio D'Alembert (Paz, 1992), que al incluir una fuerza de inercia y determinando el equilibrio en dirección x , se obtiene una ecuación diferencial ordinaria de orden dos que describe al sistema lineal de un grado de libertad:

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx = F(t) \quad 2.6$$

De igual forma si se tiene un sistema dinámico en vibración libre que conecta tres masas unidas a través de tres resortes como se muestra en la Figura 2.6 (que representa a un sistema de varios grados de libertad), considerando que el sistema es no amortiguado, se puede plantear un diagrama de cuerpo libre (DCL) (ver Figura 2.7) que nos ayude a deducir la ecuación de movimiento (Paz, 1992):

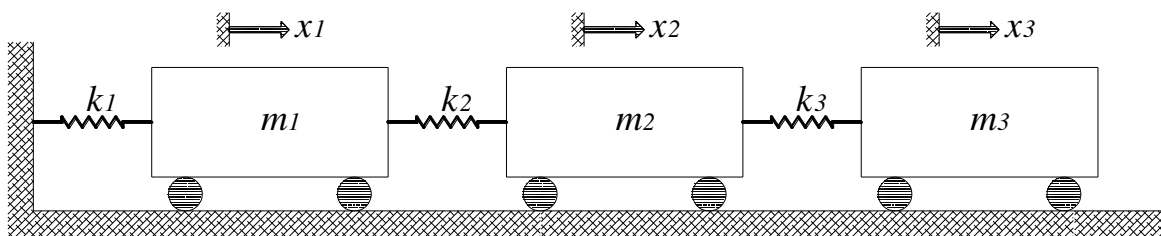


Figura 2.6. Sistema de varios grados de libertad en vibración libre.



D C L

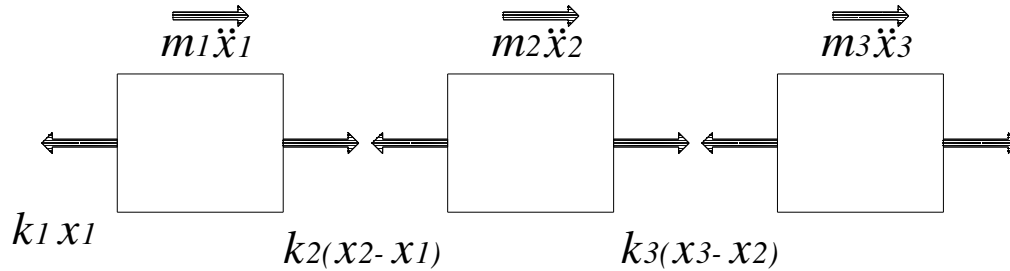


Figura 2.7. Diagrama de cuerpo libre del sistema de varios grados de libertad.

Para hallar las ecuaciones del sistema, basta con aplicar las ecuaciones de equilibrio a cada una de las tres masas. Sumando las fuerzas e igualando a cero se llega a:

- Para la masa m_1 :

$$F_{r1} - F_{r2} = F_i \quad m_1 \ddot{x}_1 + k_1 x_1 - k_2 (x_2 - x_1) = 0 \quad 2.7$$

- Para la masa m_2 :

$$F_{r2} - F_{r3} = F_i \quad m_2 \ddot{x}_2 + k_2 (x_2 - x_1) - k_3 (x_3 - x_2) = 0 \quad 2.8$$

- Para la masa m_3 :

$$F_{r3} = F_i \quad m_3 \ddot{x}_3 + k_3 (x_3 - x_2) = 0 \quad 2.9$$

Factorizando y reordenando términos, se llega a las siguientes ecuaciones:

$$m_1 \ddot{x}_1 + (k_1 + k_2) x_1 - k_2 x_2 = 0 \quad 2.10$$

$$m_2 \ddot{x}_2 - k_2 x_1 + (k_2 + k_3) x_2 - k_3 x_3 = 0 \quad 2.11$$

$$m_3 \ddot{x}_3 - k_3 x_2 + k_3 x_3 = 0 \quad 2.12$$



Cada una de estas ecuaciones corresponde a una ecuación diferencial de equilibrio dinámico en vibración libre para un sistema de varios grados de libertad, las cuales se pueden expresar de forma matricial (ver Ecuación 2.13) y su forma condensada (ver Ecuación 2.14) como se muestra a continuación:

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \ddot{x}_3 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 \\ 0 & -k_3 & k_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad 2.13$$

$$[m]\{\ddot{x}\} + [k]\{x\} = \{0\} \quad 2.14$$

La *ortogonalidad de los modos de vibración* es una propiedad de gran importancia en el estudio de la vibraciones (Paz, 1992), gracias a ella podemos desacoplar las ecuaciones de movimiento convirtiéndolas en n ecuaciones diferenciales independientes.

Cada modo corresponde a una frecuencia natural diferente que satisface la siguiente condición de ortogonalidad, cuando $\omega_i \neq \omega_n$:

$$[k]\{\Phi^n\} = \omega_n^2 [m]\{\Phi^n\} \quad 2.15$$

Si ahora se premultiplica por la transpuesta del vector de amplitudes modales:

$$\{\Phi^r\}^T [k]\{\Phi^n\} = \omega_n^2 \{\Phi^r\}^T [m]\{\Phi^n\} \quad 2.16$$

Entonces, si se inicia con el modo r y premultiplicamos por el vector transpuesto del modo n , se tiene que:

$$\{\Phi^n\}^T [k]\{\Phi^r\} = \omega_r^2 \{\Phi^r\}^T [m]\{\Phi^n\} \quad 2.17$$

Debido a que son simétricas se cumple que la matriz $[k] = [k]^T$ y la matriz $[m] = [m]^T$, empleando la ecuación 2.16, se tiene que:

$$\{\Phi^n\}^T [k]\{\Phi^r\} = \omega_n^2 \{\Phi^n\}^T [m]\{\Phi^r\} \quad 2.18$$



Ahora restando las ecuaciones 2.17 y 2.18, tenemos:

$$(\omega_n^2 - \omega_r^2)\{\Phi^n\}^T [m] \{\Phi^r\} = 0 \quad 2.19$$

$$(\omega_n^2 - \omega_r^2) = 0 \quad 2.20$$

$$\{\Phi^n\}^T [m] \{\Phi^r\} = 0 \quad 2.21$$

La ecuación anterior se cumple cuando $\omega_n^2 \neq \omega_r^2$, esto implica que $\omega_n \neq \omega_r$ para sistemas de frecuencias naturales positivas se concluye que:

$$\{\Phi^r\}^T [k] \{\Phi^n\} = \{\omega_r^2\} \quad 2.22$$

$$\{\Phi^r\}^T [k] \{\Phi^n\} = \{1\} \quad 2.23$$

Entonces el significado físico que implica la ortogonalidad de los modos es que el trabajo ejercido por las fuerzas de inercia del n modo a través del desplazamiento del r modo es igual a cero.

Normalización de los modos consiste en tomar uno de los elementos del vector de modos y asignarle un valor arbitrario, por ejemplo los elementos restantes quedan normalizados respecto a este valor y los vectores se denominan modos normales (*Paz, 1992*). Si el vector $\{\Phi^n\}$ es modo normal, cualquier vector proporcional es prácticamente el mismo modo escalado por un factor. A veces es conveniente normalizar cada modo de los elementos correspondientes a un grado de libertad en particular. Es común normalizar los modos respecto a la matriz de masas, es decir que las masas tengan valores unitarios (a esta masa se le conoce como masa ortonormal).

$$\{\Phi^r\}^T \{\Phi^r\} = 1 \quad 2.24$$

$$\{\Phi^r\}^T [m] \{\Phi^r\} = [I] \quad 2.25$$

$$[I] = \text{Matiz identidad} \quad 2.26$$



Entonces, es importante realizar una apropiada y realista determinación de las propiedades dinámicas de un sistema estructural para su análisis, diseño, monitoreo y revisión de la misma. Tradicionalmente, las oficinas de cálculo han utilizado expresiones aproximadas presentes en la normatividad sísmica para la determinación del periodo fundamental de vibración y de los amortiguamientos, pero en la actualidad se cuentan con otros métodos, con los cuales a partir del uso de tecnología (como lo es un acelerómetro), se puede conocer estos parámetros con tan solo vibraciones ambientales.



3. IDENTIFICACIÓN DINÁMICA DE DAÑO

Las técnicas de identificación de daño comenzaron a ser usadas intensamente con los notables avances del hardware haciendo uso del análisis de la Transformada Rápida de Fourier (*Silva, 2007*) o como se le conoce en sus siglas en inglés FFT. Dicho avance fue aprovechado para ser aplicado en la temprana detección de daño de estructuras como en plataformas para la industria del aceite, transbordadores espaciales en la ingeniería espacial y en la ingeniería civil aplicado en puentes para monitoreo de su salud estructural.

En la literatura existen una gran diversidad de aplicaciones para la identificación de daño como lo son los realizados en vigas de acero y concreto, placas, elementos tipo “Shell”, marcos, puentes, edificios y hasta en materiales compuestos (*Silva, 2007*), pero pocas hacen referencia a la identificación de daño para estructuras de mampostería.

3.1 ESTADO DEL CONOCIMIENTO

El presente trabajo se enfoca principalmente a la identificación de daño sobre elementos de mampostería, en el cual se pretende establecer una metodología versátil, confiable y simple que posteriormente pueda ser aplicada a edificaciones históricas.

Para lo anterior es conveniente mencionar algunas de estas técnicas o métodos, los cuales pueden variar desde simple inspección visual, análisis de modelos de elementos finitos, hasta el uso de distinta instrumentación como acelerógrafos y georradars.



La mayoría de estos métodos buscan presentar una propuesta orientada en cierta forma a sistematizar la evaluación de los parámetros que indican el deterioro de edificios patrimoniales. Como por ejemplo el escaneo laser 3D, es una técnica de medición que ofrece un elevado potencial a la hora de conseguir mediciones precisas y fiables de objetos tridimensionales, hoy en día en la ingeniería civil y arquitectura se pueden sustituir los métodos de estudio tradicionales por un escáner laser que garantiza datos más completos, además de reducir la duración y los costes de los proyectos (*FARO, 2010*).

Los escáneres láser 3D suelen emplear dos tipos diferentes de mediciones a distancia: la medición de desplazamiento de fase y la medición de tiempo de vuelo; en ambos casos se emite un rayo láser que después regresa reflejada al sistema, el escáner láser gira 360 grados horizontalmente y el ángulo horizontal se codifica al mismo tiempo que la medición de la distancia. El dispositivo genera un escaneo del entorno formando una nube de puntos que no es más que la suma de mediciones individuales desde una posición de escaneo específica, un objeto puede capturar totalmente desde múltiples posiciones de escaneo según su dimensión y complejidad y finalmente la combinación de las diferentes nubes de puntos crea una imagen 3D del objeto escaneado (*FARO, 2010*). En la ingeniería civil los escáneres láser representan una herramienta eficiente para la documentación 3D rápida y precisa del estado actual de edificaciones de todo tipo, más concretamente las aplicaciones del escaneo láser en el área de patrimonio abarcan:

- Documentación 3D de construcción de edificios, volúmenes de excavación, deformaciones estructurales y en fachadas.
- Escaneo de fachadas e interiores de edificios para construcción y restructuración, así como para la conservación histórica.
- Registro geométrico de propiedades existentes como antecedente en caso de modificaciones o ampliaciones.
- Análisis y mantenimiento estructural.



La técnica de georradar o GPR (Ground Penetrating Radar) es una técnica no destructiva que sus primeras etapas de investigación fueron encaminadas a la determinación de las propiedades electromagnéticas de los materiales y sus rangos de frecuencia (*Caicedo et al.*), y gracias al desarrollo técnico y tecnológico alcanzado actualmente sus campos de investigación en aplicaciones prácticas se expandieron rápidamente como lo son la arqueología, construcción e inspección, detección de minas, evaluación de materiales, glaciología, hidrología, ingeniería, puentes y pavimentos, entre otras. Dicha técnica está basada en la emisión y recepción de ondas electromagnéticas cuyo principio de funcionamiento no difiere en mucho al de un radar común, lo único que cambia es el medio de propagación ya que en el georradar el material es sólido (generalmente no homogéneo), mientras que en el radar se trata de aire (material homogéneo) (*Caicedo et al.*), la incidencia de la energía de una onda electromagnética sobre las heterogeneidades provocará fenómenos de reflexión, refracción y difracción que posteriormente serán detectados por una antena receptora, por lo tanto lo que un GPR detectará son los cambios en las propiedades de los materiales del subsuelo, pues estas propiedades junto con las características de la onda serán las que rigen la propagación de la energía por el medio; las variables que rigen la propagación y atenuación de las ondas son las propiedades electromagnéticas del medio de propagación o material en estudio, algunas de ellas son la conductividad, permitividad dieléctrica y permeabilidad magnética (*Caicedo et al.*). Aplicado a edificaciones históricas proporciona resultados detallados de ciertas peculiaridades que en ocasiones no son apreciables a simple vista, tales como la influencia que tiene un arco o elemento “oculto” en una estructura (ver Figura 3.2), identificar vacíos en elementos como los son los muros, definir espesores de los materiales en muros, verificar los componentes de muros, hasta se puede conocer la altura real del nivel de humedad dentro de los muros. Otra metodología es determinación experimental de características dinámicas de edificios basadas en ensayos de vibración ambiental (ver Figura 3.1), las cuales ayudan a identificar si las características dinámicas de una estructura se llegaron a modificar, esto se puede lograr con evaluación periódica de la edificación histórica con la finalidad de poder comparar registros, para en la medida



de los posible detectar tempranamente la aparición de patologías que pueden o no evidenciarse a simple vista (Gea et al., 2011).



Figura 3.1. Sensor triaxial (Gea et al., 2011).

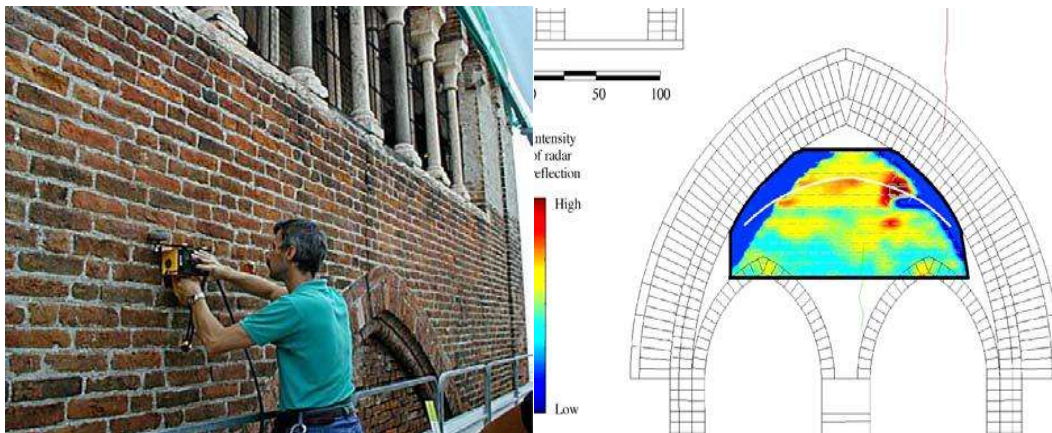


Figura 3.2. Aplicación de un georadar (Gea et al., 2011).

También existen trabajos que presentan estrategias para el modelado y análisis de estructuras históricas, en los cuales se muestra el proceso a seguir para la intervención estructural de una edificación histórica (Peña, 2010), la cual se puede dividir principalmente en la adquisición de datos, comportamiento estructural, diagnóstico y seguridad y medidas de intervención para poder lograr una correcta intervención es necesario realizar un análisis integral de la construcción histórica, por lo tanto la



estrategia de análisis no sólo se enfoca al análisis numérico sino que también se deberá tomar en cuenta la comprensión total del comportamiento estructural del edificio, para lo cual el análisis se deberá complementar y desarrollar considerando las condiciones pasadas, actuales y futuras de la estructura, de forma cuantitativa se consideran estas condiciones que definen el proceso necesario para la integración del modelo y el análisis numérico, este proceso se puede resumir en algunos pasos, que son la adquisición de datos, selección de las herramientas de análisis, proceso de calibración y validación, selección de los tipos de análisis numéricos y el análisis paramétrico (*Peña, 2010*).

De igual manera tanto la SCT como el IMT han propuesto el uso del Método Inverso por Sub-Dominios (MISD) (*Carrión et al., 2001*), que es una metodología para el monitoreo de la condición estructural de puentes carreteros y estructuras complejas, que a su vez permite la detección de daño. Dicho método es potencialmente flexible para adaptarse a diferentes tamaños y características de las estructuras, así como para procesar información proveniente de instrumentos de medición (sensores) de diferentes tipos que proporcionen información temporal o espacial. El uso de este método permite considerar escenarios en los que el análisis se efectúe en forma remota y en tiempo real con aplicación a los sistemas de puentes. En contraparte de otros métodos (como los modales), el MISD se basa en el análisis de la propagación de ondas en las estructuras, por lo que no está limitado por el tipo o ubicación de los sensores ni por las condiciones de medición. Además, se pueden realizar distintos niveles de análisis a partir de una sola prueba. Se analizaron diferentes casos de simulación en los que se consideran situaciones de poca instrumentación, análisis por subregiones y análisis por subdominios (*Carrión et al., 2001*). También evaluaron condiciones de pruebas controladas y pruebas bajo condiciones de operación normal en las que las fuerzas de excitación estructural son desconocidas. Los resultados que obtuvieron muestran el potencial del MISD para el monitoreo de la condición estructural de puentes y proponen líneas de investigación



numérica para adaptar algoritmos de solución rápida debido a la estructura de las matrices resultantes (*Carrión et al., 2001*).

De igual forma se han realizado investigaciones concernientes al modelado numérico de edificios históricos, en los cuales se discuten aspectos como el comportamiento mecánico de la mampostería, así mismo se plantea una serie de procedimientos de análisis que se han propuesto para describir la respuesta mecánica de la mampostería. Dentro del estudio de estas estructuras se plantea que los análisis de su comportamiento sean a nivel “micro” y “macro”, en dichos modelos lo que se busca es representar la pérdida de las propiedades mecánicas en la mampostería al presentarse la falla; además de que se hace énfasis en las ventajas que presentan las estrategias de modelado al representar la mampostería como una combinación de elementos bloque, rígidos o deformables con algunos elementos interfaz, donde estos elementos representan las juntas de mortero (*Orduña et al., 2001*).

Así mismo, se ha estudiado el problema de localización y estimación de daño en edificios mediante cambios en sus características dinámicas. Para ello se revisaron diferentes métodos para localizar daño estructural en modelos experimentales para marcos de edificios utilizando como información principal sus formas modales y frecuencias de vibración, se propone y evalúa el Método de la Matriz de Transformación (*Escobar, 2007*) para localizar y estimar daño en estructuras definido como la pérdida de rigidez de los elementos estructurales. Se desarrolló un cálculo que relaciona los cambios de las características dinámicas en las estructuras haciendo uso de la matriz de rigidez condensada, lográndose detectar los elementos dañados.

En Venezuela se realizó un estudio cuyo propósito es el de la determinación experimental de los parámetros dinámicos del modelo a escala del puente Vega de Asa, a fin implementar técnicas de salud estructural (*Laya et al., 2007*). Este modelo de 3 metros de longitud (ver Figura 3.3), fue construido en la Universidad Experimental del Táchira, y reproduce en proporción geométrica la estructura de una gran cantidad de puentes



presentes en las carreteras de Venezuela. Se desarrolló en la primera fase de la investigación un modelo numérico empleando el método de elementos finitos, y se generó un análisis modal para la obtención de los valores de las frecuencias naturales y los modos de vibración correspondientes. La segunda fase correspondió a la obtención de datos experimentales de la respuesta del sistema a cargas de frecuencias fijas, empleando un rotor desequilibrado (*Laya et al., 2007*).



Figura 3.3. Modelo a Escala del Puente Vega de Asa (*Laya et al., 2007*).

Mientras, otros investigadores han propuesto una forma de aplicar varios métodos de detección de daño basados en vibraciones, en los que se toman en cuenta métodos que detectan y localizan la presencia de daño mediante correlaciones de las formas modales, matrices de rigideces y flexibilidades dinámicamente medidas, comparación de curvaturas modales y energías de deformación, y métodos basados en la Transformada Wavelet. Se destaca el buen comportamiento encontrado para los métodos basados en curvaturas modales y la aplicación de la Transformada Wavelet (*Ancona et al., 2011*). Se aprecia baja sensibilidad al daño en métodos basados en correlaciones de formas modales y de rigideces dinámicamente medidas (*Ancona et al., 2011*).



Otros investigadores han comprobado que algunos de los algoritmos más exitosos de identificación de daño son algoritmos basados en ajustes de modelos; sin embargo, dichos algoritmos son muy lentos y la evaluación de daños se logra a través de un proceso inverso que requiere mucho tiempo, lo cual es un problema para aplicaciones de monitoreo en tiempo real. Las Redes Neuronales Artificiales (RNA) se han introducido recientemente como una alternativa a estos métodos. Una vez que una red neuronal ha sido debidamente entrenada, puede potencialmente detectar, localizar y cuantificar daños estructurales con precisión en tiempo real. La principal contribución de dicha investigación es el desarrollo de un algoritmo de evaluación de daños en tiempo real utilizando redes neuronales artificiales y frecuencias de anti-resonancia (*Meruane et al.*). A diferencia de los métodos clásicos, en donde se usan los modos de vibración y las frecuencias naturales, en el ya mencionado trabajo se proponen utilizar las frecuencias de anti-resonancia como entrada a la red neuronal. Las frecuencias de anti-resonancia se pueden identificar más fácilmente y con mayor precisión que los modos de vibración. Además, estas frecuencias son más sensibles a cambios estructurales. El algoritmo de detección de daños fue validado con datos experimentales de una viga libre con múltiples daños (*Meruane et al.*).

Aunque también en ocasiones aún se recurre a la experiencia relacionada con la forma de construir y los materiales utilizados, los cuales son un buen parámetro del cual se puede partir para iniciar un proceso de diagnóstico de las alteraciones y daños que pueden presentarse en los edificios, así como también es de gran utilidad disponer de la mayor información sobre las intervenciones y modificaciones realizadas en el edificio a lo largo de los años y en muchas ocasiones hasta de los diversos usos a los que se ha destinado. Dicho lo anterior se ha comprobado que muchas de las lesiones más frecuentes se manifiestan debido a los diversos elementos constructivos que conforman los sistemas estructurales de dichos edificios (*Díaz G.*), distinguiendo de forma especial aquellos que soportan directamente las sollicitaciones mecánicas debidas a las de cargas gravitatorias, del viento y del sismo, dando como resultado entre otras tantas: las lesiones por exceso



de compresión en un tramo amplio de muro (ver Figura 3.4), lesiones debidas a cargas puntuales (ver Figura 3.5), lesiones debidas a insuficiencias de rigidez de los elementos vinculantes (ver Figura 3.6), lesiones debidas a diferencias de rigidez entre los materiales componentes de los muros mixtos (ver Figura 3.7), lesiones debidas a movimiento sísmicos (ver Figura 3.8), por el empuje de bóvedas (ver Figura 3.9) (Díaz G.).

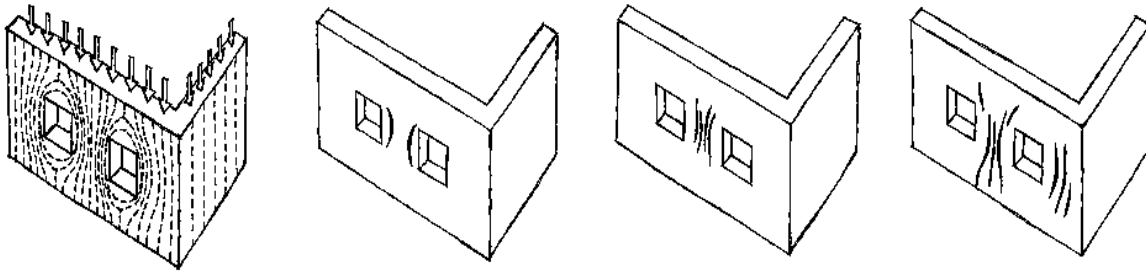


Figura 3.4. Falla por exceso de compresión (Díaz G.).

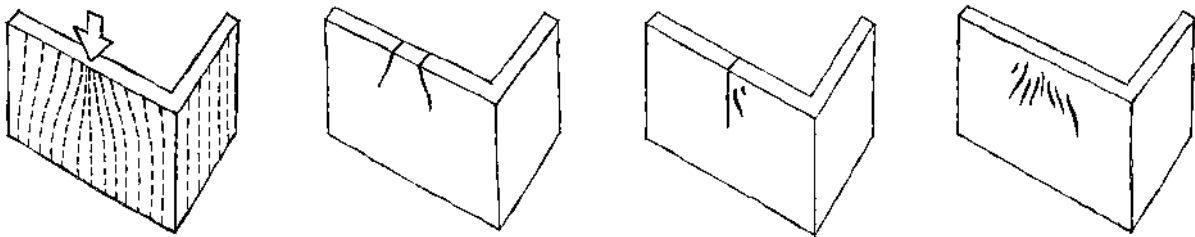


Figura 3.5. Falla por carga puntual (Díaz G.).

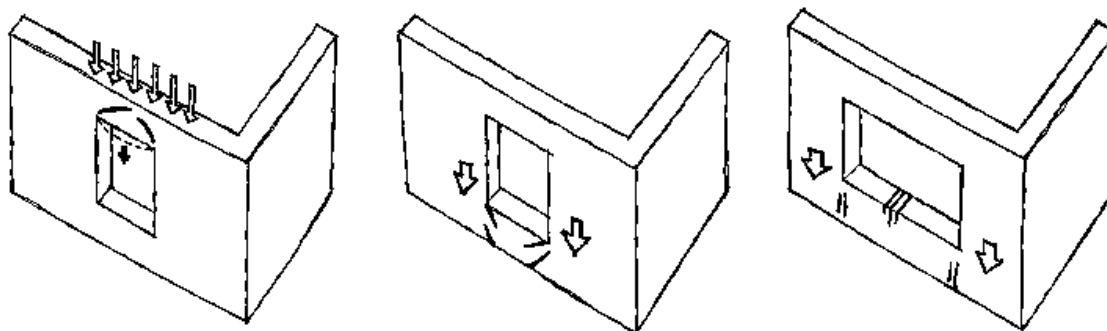


Figura 3.6. Falla por falta de rigidez en los elementos (Díaz G.).

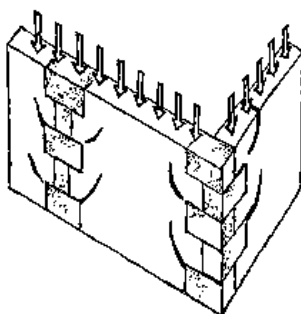


Figura 3.7. Falla por diferencia de rigidez en los materiales (Díaz G.).

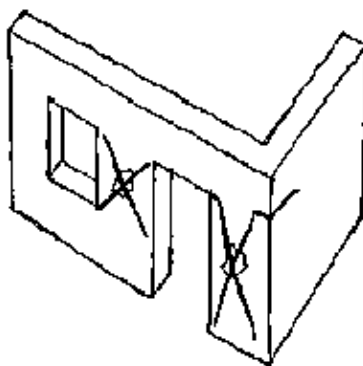


Figura 3.8. Falla por acciones sísmicas (Díaz G.).

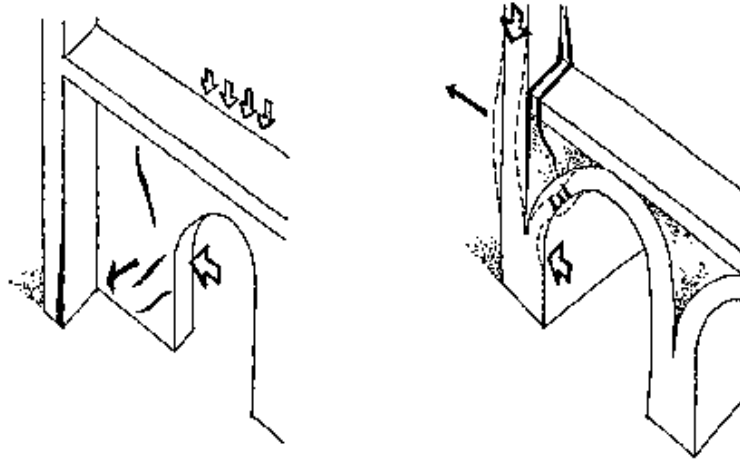


Figura 3.9. Falla por el empuje de bóvedas (Díaz G.).

3.2 MÉTODOS GENERALES

Los ensayos no destructivos destinados al monitoreo, la identificación estructural y de diagnóstico cobran gran importancia estratégica en la ingeniería civil. Este tipo de pruebas se han vuelto una práctica generalizada que en la actualidad se emplean tanto en cuestiones de diseño en las nuevas edificaciones, así como también en la reparación y seguimiento de las ya existentes (Morassi *et al.*, 2008). Para garantizar que los resultados obtenidos en estas pruebas sean fiables, los modelos deben ser calibrados con información precisa sobre las características de los materiales y sus componentes estructurales. Para lograr esto, las técnicas no destructivas son una herramienta útil desde distintos puntos de vista, como es el caso del diagnóstico donde es común realizar pruebas



durante un periodo de tiempo que pueden indicar la aparición de posibles daños que se produzcan durante la vida de la estructura (*Morassi et al., 2008*).

Pero de las muchas técnicas no destructivas ahora disponibles, los métodos dinámicos gozan de un creciente enfoque en la comunidad ingenieril. Los métodos convencionales de diagnóstico, tales como los basados en la inspección visual, térmica o ultrasónica, son de naturaleza local, para su efectividad se requiere de acceso directo a la región monitoreada y además de conocimiento previo de la posición de la zona afectada. Por el contrario las técnicas basadas en el estudio de la respuesta dinámica de la estructura, son una herramienta de diagnóstico potencialmente eficaz, ya que estos pueden diagnosticar la estructura a una escala global y no requieren información alguna de la zona dañada (*Morassi et al., 2008*).

Recientes avances tecnológicos han generado que los métodos experimentales sean extremadamente precisos y fiables permitiendo una buena estimación de los cambios en el comportamiento dinámico de un sistema estructural ocasionado por posibles daños.

Estos métodos suponen que cualquier presencia de daño se puede interpretar como un cambio significativo de sus propiedades, por ejemplo una reducción de la rigidez en la estructura. Es importante recordar que la respuesta dinámica depende de las propiedades del sistema estructural como la masa, rigidez, amortiguamiento, tipo de materiales, entre otras y cualquier cambio en estas propiedades se ve reflejado en un cambio en la respuesta dinámica de la estructura, representada por frecuencias naturales, modos de vibrar, factores de amortiguamiento, etc. Al final, el mayor inconveniente de estos métodos consiste en correlacionar de manera adecuada las características de la estructura en su estado de inicial (sin daño o de control), con las de su estado dañado (*Morassi et al., 2008*).



3.2.1. MÉTODOS DE IDENTIFICACIÓN DE DAÑO BASADOS EN MONITOREO ESTRUCTURAL

A continuación se presentara una breve descripción de algunos de los métodos más usados para la detección de daño haciendo uso del monitoreo de sistemas estructurales. Estos métodos tienen como característica común el que no es necesario tener un modelo matemático detallado de la estructura para determinar el daño, o en algunos casos no se necesita conocer el estado de la estructura previo al daño. Dichos métodos se enlistan a continuación:

- I. Métodos basados en parámetros básicos (Correlación de formas Modales).
 - a) Criterio de Correlación Modal (MAC - Modal Assurance Criterion)/ Diferencia Modal Normalizada (NMD - Normalized Modal Diference).
 - b) Criterio Coordinado de Correlación Modal (CoMAC - Coordinate Modal Assurance Criterion)

- II. Métodos basados en cambios de parámetros estructurales derivados (Curvaturas de formas modales, deformaciones, rigideces y flexibilidades medidas dinámicamente).
 - a) Método del Cambio de la Matriz de Flexibilidad, medida dinámicamente (FM – Flexibility Method).
 - b) Método del Cambio de la Matriz de Rigidez, media dinámicamente (SM – Stiffness Method)
 - c) Comparación de Curvaturas de las Formas modales mediante Enfoque Mixto (MA – Mixed Approach).
 - d) Índice de Daño (DI – Damage Index).



CRITERIO DE CORRELACIÓN MODAL (MAC) / DIFERENCIA MODAL NORMALIZADA (NMD)

Este método es una medida de consistencia (grado de linealidad) entre estimaciones de un vector ϕ , mediante la determinación de la desviación mínima cuadrada de una estimación sobre otra (Ancona et al., 2011). Matemáticamente se puede definir como se muestra en la siguiente fórmula:

$$MAC(\phi_i, \phi_i^*) = \frac{|\phi_i^T \phi_i^*|^2}{(\phi_i^T \phi_i)(\phi_i^{*T} \phi_i^*)} \quad 2.1$$

Donde ϕ_i y ϕ_i^* corresponden a la i -ésimas formas modales para la condición sin daño y con daño respectivamente, el superíndice T representa la transpuesta del vector. Si los valores de los vectores de formas modales ϕ , son iguales para la condición con daño y sin daño, el valor de MAC será igual a la unidad, lo que indicaría que no se presentó daño en el sistema estructural. Por el contrario, si los vectores no son iguales, el valor de MAC oscilará entre 0 y 1, esto nos indicará la presencia de daño (Ancona et al., 2011). El inconveniente de este método es que el valor MAC es un escalar que solo proporciona información sobre la presencia o ausencia de daño y no específicamente la magnitud del daño.

El método MAC cuenta con una variante, el cual es el criterio de la Diferencia Modal Normalizada (NMD). Este método está directamente relacionado con el valor de MAC y la ecuación que lo representa se muestra a continuación:

$$NMD(\phi_i, \phi_i^*)(\%) = \sqrt{\frac{1 - MAC(\phi_i, \phi_i^*)}{MAC(\phi_i, \phi_i^*)}} \quad 2.2$$



El valor que da como resultado de la ecuación anterior del criterio NMD, es más sensible que el valor obtenido por el método MAC, en particular en valores muy cercanos a la unidad. En éste método el valor mínimo a obtener es de 0%, el cual es equivalente al valor de la unidad en el método MAC, que indica una adecuada correlación entre los vectores de formas modales (*Ancona et al., 2011*).

CRITERIO COORDENADO DE CORRELACIÓN MODAL (COMAC)

El método CoMAC se presenta como una variante del método MAC, y al igual que en éste método los cálculos se realizan a partir de los datos obtenidos de la matriz de formas modales con daño y sin daño. Los vectores de formas modales en cada uno de los modos de vibrar representan sólo uno de los modos, pero el conjunto de todos los vectores modales forman la matriz de modos de vibrar, que no es más que la representación de los modos de interés dentro del mismo rango de frecuencias (*Ancona et al., 2011*).

Si los desplazamientos modales en el nodo i de un conjunto de formas modales son idénticos, el valor obtenido por el método CoMAC será igual a la unidad. Por el contrario, si hay perturbaciones en la zona donde se localizan los daños de las formas modales, el valor obtenido mediante este método será menor que la unidad (*Ancona et al., 2011*). La expresión matemática empleada en el método CoMAC se muestra a continuación:

$$CoMAC_j = \frac{\left[\sum_{i=1}^N |\phi_{ij} \phi_{ij}^*| \right]^2}{\left(\sum_{i=1}^N \phi_{ij}^2 \right) \left(\sum_{i=1}^N \phi_{ij}^{*2} \right)} \quad 2.3$$

Donde ϕ_{ij} y ϕ_{ij}^* corresponden a los valores de las formas modales para el j -ésimo nodo de la i -ésima forma modal para ambas combinaciones, sin daño y con daño, respectivamente. Este método tiene la particularidad de poder identificar la posición del daño a diferencia del método MAC.



**MÉTODO DEL CAMBIO DE LA FLEXIBILIDAD, MEDIDA
DINÁMICAMENTE**

Se sabe que el daño estructural puede ser tomado como una reducción de las propiedades de la estructura, en este caso se refiere específicamente a la reducción de la rigidez del sistema estructural. Por consiguiente, donde se presenta la disminución de la rigidez se presentará un incremento en la flexibilidad (Ancona et al., 2011). Para poder identificar la existencia de daño en una estructura este método tiene como premisa principal encontrar los cambios en la matriz de flexibilidad que se puede obtener usando los parámetros modales del sistema estructural empleando las siguientes ecuaciones:

$$C = \phi \Omega^{-1} \phi^{*T} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{\omega_i^2} \phi_i \phi_i^T \quad 2.4$$

$$C^* = \phi^* \Omega^{*-1} \phi^{*T} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{\omega_i^{*2}} \phi_i^* \phi_i^{*T} \quad 2.5$$

$$\Delta C = C^* - C \quad 2.6$$

En donde C es la matriz de flexibilidades de la estructura, $\phi = [\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_N]$ es la matriz de formas modales, $\Omega = \text{diag}(\omega_i^2)$ es la matriz de rigidez modal, ω_i es la i -ésima frecuencia circular natural, ϕ_i es la i -ésima forma modal y el superíndice * indica los parámetros modales de un estado con daño.

El cambio en la matriz de flexibilidad del sistema estructural se obtiene por medio de la matriz de flexibilidades con daño y la matriz de flexibilidades sin daño (Ancona et al., 2011), esta relación se puede observar en la ecuación 2.6.



Un mejor indicador para predecir la presencia de daño puede ser determinado mediante el máximo valor absoluto de los elementos de la j -ésima columna de la matriz ΔC , esta expresión se puede representar en la siguiente ecuación:

$$\overline{\delta c_j} = \max |\delta c_{ij}| \quad 2.7$$

Donde δc_{ij} indican los elementos de la matriz ΔC que representan la variación de la flexibilidad de cada grado de libertad. El valor $\overline{\delta c_j}$ indica el grado de libertad donde se presentó la máxima variación de la flexibilidad y es donde se debería de localizar el daño (Ancona et al., 2011).

MÉTODO DEL CAMBIO DE LA RIGIDEZ, MEDIDA DINÁMICAMENTE

Éste método al igual que en el método de cambio de flexibilidad, se basa en el cambio de la matriz de rigideces entre una condición sin daño y otra con daño. Tiene como fundamento principal el problema de los valores característicos o eigenvalores (Ancona et al., 2011), los cuales definen el comportamiento dinámico de cualquier sistema estructural para el caso sin daño y sin amortiguamiento, que se resuelve reemplazando los valores y vectores característicos dañados por un conjunto de parámetros modales (ΔK y ΔM) con daño y sustituyendo las perturbaciones en las matrices de masas y de rigideces de las matrices iniciales. Separando los términos que contienen a las matrices originales de los términos de la matriz de daño, el vector de daño D_i queda definido como se muestra a continuación:

$$D_i = (\Delta K)\phi_i^* \quad 2.8$$



Las matrices de rigideces para el estado sin daño y con daño se puede obtener de los parámetros modales, de la misma forma en que se obtienen para el método del cambio de la flexibilidad medida dinámicamente como en las ecuaciones 2.4, 2.5 y 2.6.

$$K \approx \phi \Omega \phi^T = \sum_{i=1}^N \omega_i^2 \phi_i \phi_i^T \quad 2.9$$

$$K^* \approx \phi^* \Omega^* \phi^{*T} = \sum_{i=1}^N \omega_i^{*2} \phi_i^* \phi_i^{*T} \quad 2.10$$

$$\Delta K = K^* - K \quad 2.11$$

COMPARACIÓN DE CURVATURAS MODALES MEDIANTE EL ENFOQUE MIXTO

La curvatura de la forma modal se introdujo como un parámetro para identificación de daño debido a que está directamente relacionado con la rigidez de la estructura; esta relación se refiere a que cualquier cambio en la rigidez EI (en este caso disminución), el cual afectará de forma inversamente proporcional a la curvatura modal κ (*Ancona et al., 2011*). Por lo tanto, al comparar las curvas modales que se obtuvieron para las condiciones sin daño y con daño es como se puede conocer la localización del daño en las zonas donde esta diferencia entre ambas curvaturas sean las mayores. Las curvaturas se obtienen utilizando un método de derivación numérica con aproximaciones del Teorema de la Diferencia Central. El inconveniente de este teorema es que en caso de presentarse pequeñas irregularidades que no son causadas por daño, como lo son las ocasionadas por la contaminación de la señal debido al ruido ambiental. Dada esta situación se propuso un nuevo método basado en las curvaturas, el cual se denominó Calculo Directo de la Rigidez (DSC), este nuevo método como se verá a continuación, propone obtener las curvaturas sin la necesidad de utilizar la derivación de las formas modales, y que en conjunción con las fuerzas internas modales llevan a una estimación de pérdida de rigidez en la estructura.



ENFOQUE MIXTO

Existe una parte del procedimiento del Cálculo Directo de la Rigidez (DSC), denominada *Enfoque Mixto*, cuya finalidad es la de obtener las curvaturas modales sin la necesidad de derivación numérica, este enfoque funciona mediante un método de aislamiento de las formas modales basado en *penalizaciones* (Ancona et al., 2011).

El enfoque de penalizaciones consiste en transformar una función objetivo a minimizar, así como también sus restricciones, en una sola función con términos adicionales de penalización como cantidad de restricciones tenga el sistema. Cada término adicional es ponderado por un factor de penalización, el cual restringe las violaciones a las restricciones del sistema. Dicho valor puede ser elegido adaptativamente y es preferiblemente adimensional (Ancona et al., 2011). Para éste caso, la función objetivo a ser minimizada contiene la diferencia entre las formas modales aproximadas y las medidas. En ella se incorporan dos términos de penalización para reforzar la continuidad de las rotaciones y las curvas, como se muestra a continuación:

$$\pi \int \frac{(v - \phi_m^b)^2}{2} dx + \frac{\alpha L^{e2}}{2} \int \left(\psi - \frac{dv}{dx} \right)^2 dx + \frac{\beta L^{e4}}{2} \int \left(k - \frac{d\psi}{dx} \right)^2 dx \quad 2.12$$

Donde L^e representa la longitud de un elemento discreto del modelo y ϕ_m^b la forma modal media. El primer término de la ecuación 2.12 expresa que la diferencia entre los desplazamientos modales aproximados y medidos debe ser minimizado. Con el fin de filtrar los errores experimentales y por lo tanto un aislamiento de la deflexión, se agregan los dos últimos términos donde las diferencias entre las rotaciones y las curvaturas con las primeras derivadas de los desplazamientos y las rotaciones, respectivamente, son minimizadas (Ancona et al., 2011). El peso de las condiciones extra está definido por medio de los factores de penalización adimensionales α y β .



Derivando la función objetivo en la ecuación 2.12 para cada grado de libertad modal desconocido $v_i, v_j, \psi_i, \psi_j, k_i, k_j$ (por turno) y usando funciones de forma lineales para rotaciones, curvaturas y funciones cuadráticas para los desplazamientos, se obtiene una forma analítica de funcionamiento del sistema en cada elemento (*Ancona et al., 2011*). Si los elementos son elegidos de tal manera que los nodos coincidan con los puntos de medición se llega al sistema mostrado en la ecuación 2.13, donde se observan que el vector del lado derecho contiene desplazamientos modales experimentales (si los nodos de los elementos coinciden con los puntos de medición):

$$\begin{bmatrix}
 \frac{L^e}{3} + \alpha L^e & \frac{L^e}{6} - \alpha L^e & \frac{\alpha L^{e2}}{2} & \frac{\alpha L^{e2}}{2} & 0 & 0 \\
 \frac{L^e}{3} + \alpha L^e & -\frac{\alpha L^{e2}}{2} & \frac{\alpha L^{e2}}{2} & 0 & 0 & 0 \\
 & \frac{\alpha L^{e3}}{3} + \beta L^{e3} & \frac{\alpha L^{e3}}{3} - \beta L^{e3} & \frac{\beta L^{e4}}{2} & \frac{\beta L^{e4}}{2} & \\
 \text{Simétrica} & & \frac{\alpha L^{e3}}{3} + \beta L^{e3} & -\frac{\beta L^{e4}}{2} & -\frac{\beta L^{e4}}{2} & \\
 & & & \frac{\beta L^{e5}}{3} & \frac{\beta L^{e5}}{6} & \\
 & & & & \frac{\beta L^{e5}}{3} &
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 v_i \\
 v_j \\
 \psi_i \\
 \psi_j \\
 \kappa_i \\
 \kappa_j
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 \frac{\phi_{m,i} L^e}{3} + \frac{\phi_{m,j} L^e}{6} \\
 \frac{\phi_{m,i} L^e}{3} + \frac{\phi_{m,j} L^e}{6} \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0
 \end{bmatrix}
 \quad 2.13$$

Las ventajas de utilizar el Método de Enfoque Mixto son:

- El vector del miembro derecho es fácilmente calculado cuando L^e corresponde con los puntos de medición.
- Las curvaturas se obtienen directamente de la solución.
- Las condiciones de frontera pueden ser introducidas fácilmente.

Pero este método también tiene desventajas y una de ellas se encuentra en el Enfoque Mixto, el cual tiene cierta dificultad en la elección de los factores de penalización adecuados. Valores muy grandes de α y β causan que las curvaturas obtenidas por éste



método se alejen de las reales. Por otro lado, valores demasiado pequeños nos permiten minimizar errores causados por la presencia de ruido en las mediciones, pero pueden suprimir en determinada proporción los datos relativos al daño (Ancona et al., 2011).

ÍNDICE DE DAÑO (DI)

En este método se calcula el cambio en la energía de deformación almacenada en una estructura. El método supone que la distribución de energía de deformación que se encuentra almacenada originalmente en la estructura se verá disminuida en las áreas que presentan daño (Ancona et al., 2011). Una vez que un elemento de la estructura sufre un cambio, específicamente una reducción en la rigidez, representa que la estructura ya no puede absorber la misma cantidad de energía comparado con lo que podía absorber antes de presentarse el daño, provocando una desviación de la distribución original de la energía de deformación de la estructura en su estado sin daño. Entonces la medición adecuada de estos cambios puede ser empleada para detectar y localizar el daño.

Para este caso se considera como ejemplo una viga de Euler-Bernoulli de longitud L , en la cual solo se permite la rigidez a flexión sobre el eje vertical. Si se considera que la viga está dividida en NE elementos con N nodos a lo largo de toda su longitud, donde $[a, b]$ son los límites del elemento j y EI_j la j –ésima rigidez a flexión de dicho elemento (Ancona et al., 2011), su contribución a la energía de deformación del i –ésimo modo es:

$$U_{ij} = \frac{1}{2} EI_j \int_a^b \left(\frac{\partial^2 \phi_i^2}{\partial x^2} \right)^s dx \quad 2.14$$



Podemos expresar la ecuación anterior como una porción de la energía de deformación total del i –ésimo modo, de igual forma se obtienen expresiones similares para el caso donde se presenta el daño, además se puede obtener la siguiente expresión que define el Índice de Daño B_{ij} para elementos estructurales discretos:

$$\beta_{ij} = \frac{(\epsilon_{i,j}^*)^2 + \sum_1^{N_t} (\epsilon_{i,j}^*)^2 \sum_1^{N_t} (\epsilon_{i,j})^2}{(\epsilon_{i,j})^2 + \sum_1^{N_t} (\epsilon_{i,j})^2 \sum_1^{N_t} (\epsilon_{i,j}^*)^2} \quad 2.15$$

$$\epsilon_{i,j} = \left[\frac{\partial^2 \phi_i^2}{\partial x^2} \right]_{x=x_j} \quad 2.16$$

$$\epsilon_{i,j}^* = \left[\frac{\partial^2 \phi_i^2}{\partial x^2} \right]_{x=x_i} \quad 2.17$$

Donde N_t es el número total de nodos en la viga y ϵ es la curvatura de la forma modal. En las ecuaciones 2.15, 2.16 y 2.17 se consideró que la rigidez a lo largo de la viga era aproximadamente constante para los casos sin daño y con daño, debido a que si se considera que el daño puede estar localizado en un número pequeño de elementos, la rigidez del caso con daño no sufrirá ningún cambio significativo a lo largo de la viga. Debido a esto se puede considerar que $EI \cong EI^*$, los índices más grandes del Índice de Daño β_{ij} indican los miembros que probablemente presenten el daño (Ancona et al., 2011).



4. MUESTREO EXPERIMENTAL Y EQUIPO UTILIZADO

En los anteriores capítulos se hizo mención de algunas de las técnicas existentes para la obtención de la información necesaria para identificar el daño en una estructura, como pueden ser desde aspectos visuales hasta propiedades dinámicas, así como también los distintos métodos o medios por los cuales se puede obtener dicha información.

En lo que concierne a las pruebas de identificación modal experimental “in situ”, una de las técnicas mayormente recurridas son las pruebas de vibración realizadas con sensores o también conocido como *monitoreo de salud estructural*, en la que a través de una excitación se obtiene una respuesta (vibración) que es medida para poder realizar el estudio, para lo cual se usan equipos de *medición, adquisición y procesamiento* de los datos (*Silva, 2007*). Básicamente este equipamiento consta de un mecanismo de excitación, una serie de sensores, un convertidor digital análogo incorporado en un dispositivo de adquisición de datos y una computadora para procesar la información de la señal. Antes de continuar con el capítulo es conveniente definir algunos conceptos como que es el monitoreo estructural y todo lo que este involucra.

El *monitoreo estructural* es una técnica que combina la captura de datos de una estructura con el análisis de la misma. Los datos se consiguen desde una red “sensorial” no destructiva, a través de la cual se obtienen indicadores que permiten detectar anomalías (daños o degradación) en la estructura. Esta información puede ser periódica o en tiempo real y continuo y estar asociada a cambios diversos como deterioro, corrosión, fatiga, reacciones químicas, humedad, cambios en las variables del ambiente, así como a las propiedades físicas relativas a la carga, esfuerzos, desplazamientos, deformaciones,



aceleraciones, agrietamiento, vibraciones y otros que sean necesarios para la evaluación operacional de la estructura. Esta evaluación demanda contrastar la situación de la estructura con un perfil “saludable” de la misma y finalmente realizar el análisis, el cual debe hacerse a la estructura a partir de la información captada por los sensores (*Silva, 2007*).

El campo del monitoreo de la salud estructural es amplio y se desarrolla y aplica con intensidad en las áreas de las ingenierías aeronáutica, civil y mecánica, por ejemplo en el campo de la ingeniería civil ya se aplican a estructuras flexibles como puentes, edificios altos, estadios y túneles así como en edificaciones antiguas (*Silva, 2007*).

Del monitoreo de la salud estructural pueden distinguirse las siguientes etapas, la mismas variarán dependiendo de la estructura en estudio.

RAZONES Y VARIABLES PARA LA EVALUACIÓN OPERACIONAL

Existen distintas razones y variables dentro de las cuales se pueden destacar el tipo y la importancia de la estructura así como el de las solicitaciones a las que está sometida, las cuales justifican que se establezca el monitoreo de salud estructural ya sea por razones económicas, estratégicas, de seguridad u otras.

La selección de variables por captar y estudiar está ligada a conocer el o los posibles daños que puede sufrir la estructura (tomando en cuenta la importancia de los mismos), así como las condiciones operativas o ambientales que podrían determinarlos (*Silva, 2007*).

Hay que considerar también la posibilidad y limitaciones tanto para medir como para monitorear las variables seleccionadas. Ello incluye las facilidades tecnológicas así como la frecuencia necesaria para realizar las mediciones.



ADQUISICIÓN Y GESTIÓN DE DATOS

En esta parte se reconocen o determinan los métodos de activación o excitación, los tipos de sensores más apropiados (su capacidad, forma de adhesión y de prueba), así como su número y disposición espacial. Hay que tomar en cuenta el hardware apropiado para adquirir, almacenar y transmitir los datos, así como la periodicidad de estas tareas (*Silva, 2007*).

En esta etapa también es necesaria una “limpieza de datos”, que son filtros que ayudan a determinar los datos que serán transmitidos, desde las visitas y formas para comprobar que algún sensor esté o no funcionando bien, a la aplicación de técnicas de procesamiento de señales.

IDENTIFICACIÓN ANTES Y DESPUÉS DEL DAÑO

Debe estar claro si el dato que se transmite corresponde a la estructura sana o dañada. Los rasgos del dato que lo caracterizan en una u otra situación. Esto es variable dependiendo de la estructura y de la situación. Por ejemplo para el análisis dinámico serán verificables las variaciones en la amplitud y en la frecuencia o en otros serán los casos relacionados con la fractura o la temperatura (*Silva, 2007*).

En la gestión de datos es importante considerar la comprensión de los mismos. Esta es una forma recomendable para cuando existan muchas variables o datos durante periodos largos.

Finalmente en esta etapa se considerará la calidad de los datos, que en ocasiones se pueden utilizar pruebas de significancia estadística.

CUANTIFICACIÓN DEL DAÑO

El sistema de monitoreo debe dar lugar a una información cuantificada de la magnitud del daño. Se trata de uno o más algoritmos que incluso pueden estar asociadas a sistemas automatizados para conocer mejor si la estructura está dañada o no.



MODELOS ESTRUCTURALES

En la literatura se les cita como parte del sistema de monitoreo. Se trata de modelos de análisis que utilizan la información básica de la estructura (geométrica y constitutiva) con las condiciones provenientes del sistema sensorial (*Silva, 2007*).

Los resultados se comparan con un patrón de la estructura sana. Es el equivalente a realizar un diagnóstico de la estructura.

PREDICCIÓN

El monitoreo de salud estructural tiene el propósito preventivo de establecer si la estructura habrá de dañarse, para tomar las medidas correctivas oportunas. De ahí que la información histórica que registre debe servir también para establecer parámetros de conformidad y tendencias, que faciliten un sistema de alerta.

En cuanto a la *respuesta* existen distintos dispositivos que usualmente son utilizados en este tipo de pruebas para generar una respuesta dinámica en una estructura, como lo son los mecanismos que generan sacudidas (ej. mesa vibratoria), los martillos de impacto y los mecanismos de aplicación de peso (ej. actuadores). En los primeros en ocasiones su uso resulta costoso y la estructura se limita a las dimensiones del dispositivo; los martillos son usados para inducir un impulso sobre una estructura con la finalidad de generar una respuesta dinámica en la misma, teniendo resultados satisfactorios en sistemas con poco peso, el impulso depende de la masa del martillo y la velocidad de impacto; finalmente los mecanismos de aplicación de peso cuya ventaja es que se tiene un mayor control en la aplicación de la carga y en comparación a los martillos una mayor energía al momento de la aplicación de la carga (*Silva, 2007*).

Sobre los *sensores*, los cuales son un dispositivo que detecta un estímulo y transmite la información, el diseño de los mismos permite captar la información del estímulo y



transformarla en forma de señal eléctrica en proporción de una cantidad física que define la respuesta de la estructura, como es el desplazamiento, velocidad, aceleración, etc. Esta señal en teoría queda lista para ser procesada por un sistema de adquisición de datos.

El *sistema de adquisición* de datos graba la excitación y la respuesta de la señal a través de series de tiempo discreto, para finalmente ser procesada por un software especializado en una computadora (Silva, 2007).

4.1. EQUIPO UTILIZADO

El *epiensor ES-U2 de Kinematics* (ver Figura 4.1) es un acelerómetro de balance de fuerzas con una superficie uniaxial diseñado principalmente para aplicaciones en ingeniería estructural. Sin embargo, puede ser utilizado en una variedad de aplicaciones para la medición de aceleraciones de hasta $\pm 4g$ y menores para el nivel de ruido ambiental. Con rangos de grabación a gran escala de ± 0.25 a $\pm 4g$, además ofrece registros en escala de movimientos sísmicos, incluso en lugares cercanos a la falla y en una amplia variedad de tipos de estructuras.

Debido a que el ES-U2 es extremadamente sensible a un nivel bajo de ruido, puede detectar movimientos en el terreno producidos por vibración ambiental en la mayoría de los sitios urbanos y estructuras civiles de 1 Hz a 200 Hz.

El ancho de banda mejorado significativamente de DC a 200 Hz permite a los ingenieros y científicos estudiar los movimientos a frecuencias más altas, mientras se mantiene una importante respuesta de DC que permite la calibración de campo simple y reduce la confusión del procesamiento (Kinematics, 2013).



Figura 4.1. EpiSensor Uniaxial ES-U2 (Kinemetrics, 2013).

Para la adquisición de los datos se utilizó una grabadora digital de alta sensibilidad, el equipo *K2 de Kinemetrics* (ver Figura 4.2), que gracias a los avances técnicos y a innovaciones en la ingeniería han incrementado el rendimiento y la flexibilidad de la misma para ofrecer un rango dinámico de ~ 114 dB. El alto rango dinámico y superior resolución ofrecen ventajas significativas para aplicaciones donde la precisión de la señal y la integridad de los datos son de vital importancia (Kinemetrics, 2013).

Con el fin de proporcionar la mayor flexibilidad en el almacenamiento de datos, recuperación y comunicación, cuenta con dos puertos totalmente compatibles a tarjetas PCMCIA. Esto permite a los usuarios configurar fácilmente al K2 para sus aplicaciones específicas. Además Microsoft Windows desarrollo los softwares de QuickTalk y QuickLook para proporcionar un entorno fácil de uso, haciendo que la configuración del sistema, la comunicación y el análisis sea rápido y fácil.



Figura 4.2. Sistema de adquisición K2 (Kinemetrics, 2013).



4.1.1. TÉCNICAS DE IDENTIFICACIÓN EMPLEADAS

A continuación se describirán las técnicas empleadas tanto para la obtención de las frecuencias y modos, así como también para la identificación del daño en el elemento por estudiar.

4.1.2. IDENTIFICACIÓN DE FRECUENCIAS Y MODOS

Para procesar los registros de vibración ambiental obtenidos de las mediciones experimentales, se utilizó la técnica conocida como *Descomposición en el Dominio de la Frecuencia* (también conocido por sus siglas en inglés como *FDD*), empleando el software especializado ARTEMIS Extractor (*svibs, 2011*), el cual es una herramienta que permite realizar la identificación modal precisa en condiciones operativas, y en situaciones donde la estructura es imposible o difícil para excitar por la aplicación de fuerzas externas. Los resultados de los análisis son la información sobre las frecuencias naturales, formas modales y relaciones de amortiguamiento.

La estimación del dominio de la frecuencia es un modelo no paramétrico (también conocido como modelos espectrales) basado en el método *FDD* (*Descomposición en el Dominio de la Frecuencia*), el principio básico de esta técnica es realizar una descomposición aproximada de la respuesta del sistema en un conjunto de sistemas independientes de un grado de libertad, cada uno correspondiente a un modo individual.

En el método *FDD* la matriz de densidad espectral se descompone por medio de la Descomposición del Valor Singular (*SVD*), en un conjunto de funciones de densidad espectral, cada una correspondiente a un solo grado de libertad del sistema. Los pasos de la técnica *FDD* se ilustran en la Figura 4.3.

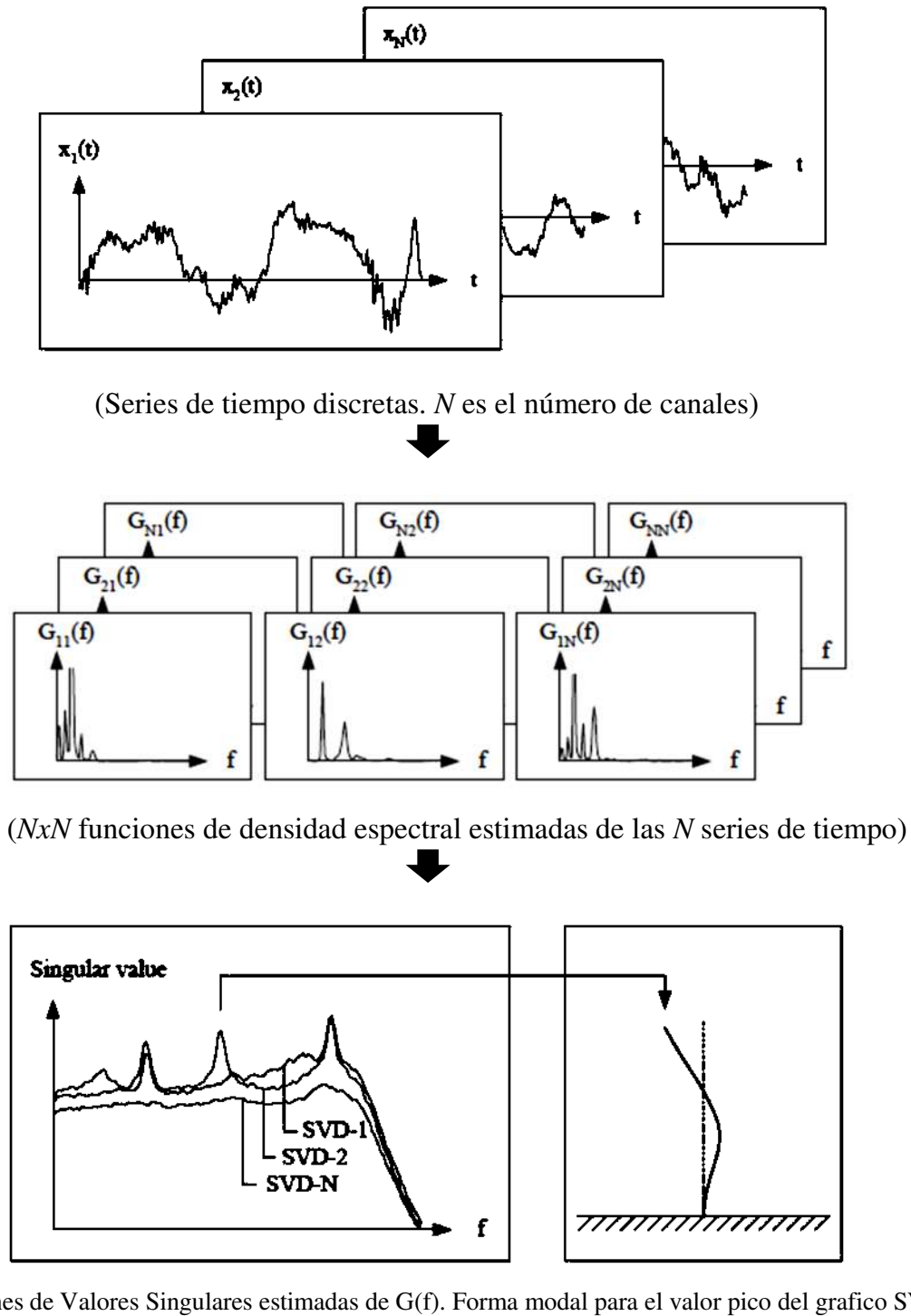


Figura 4.3. Principales pasos de la técnica de Descomposición en el Dominio de la Frecuencia (FDD).



Como resultado de la técnica *FDD* empleada en el software especializado ARTEMIS Extractor se puede apreciar que tanto los modos como las frecuencias del elemento estudiado se pueden obtener haciendo un simple “clic” sobre los picos en el grafico que este software presenta (ver Figura 4.4 y Figura 4.5).

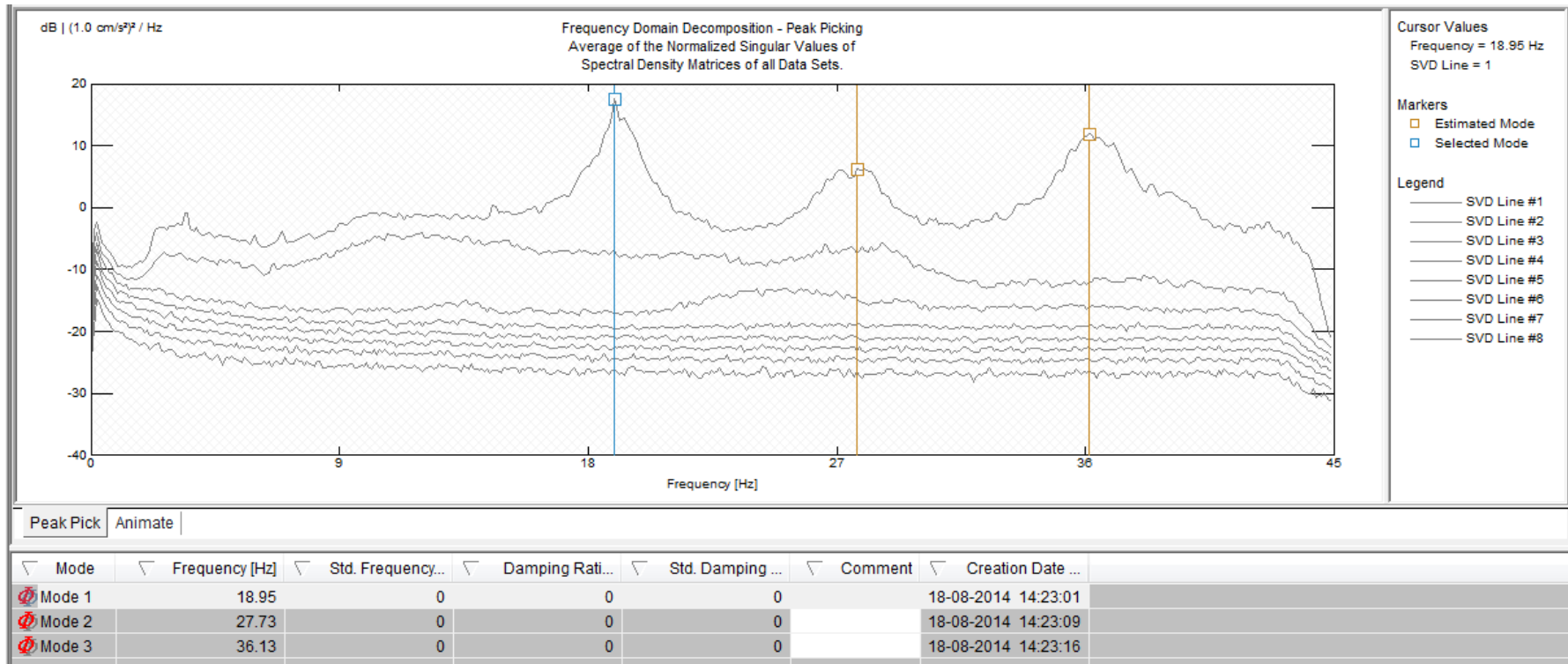


Figura 4.4. Imagen de la técnica de identificación modal (*FDD*) en el software ARTEMIS.

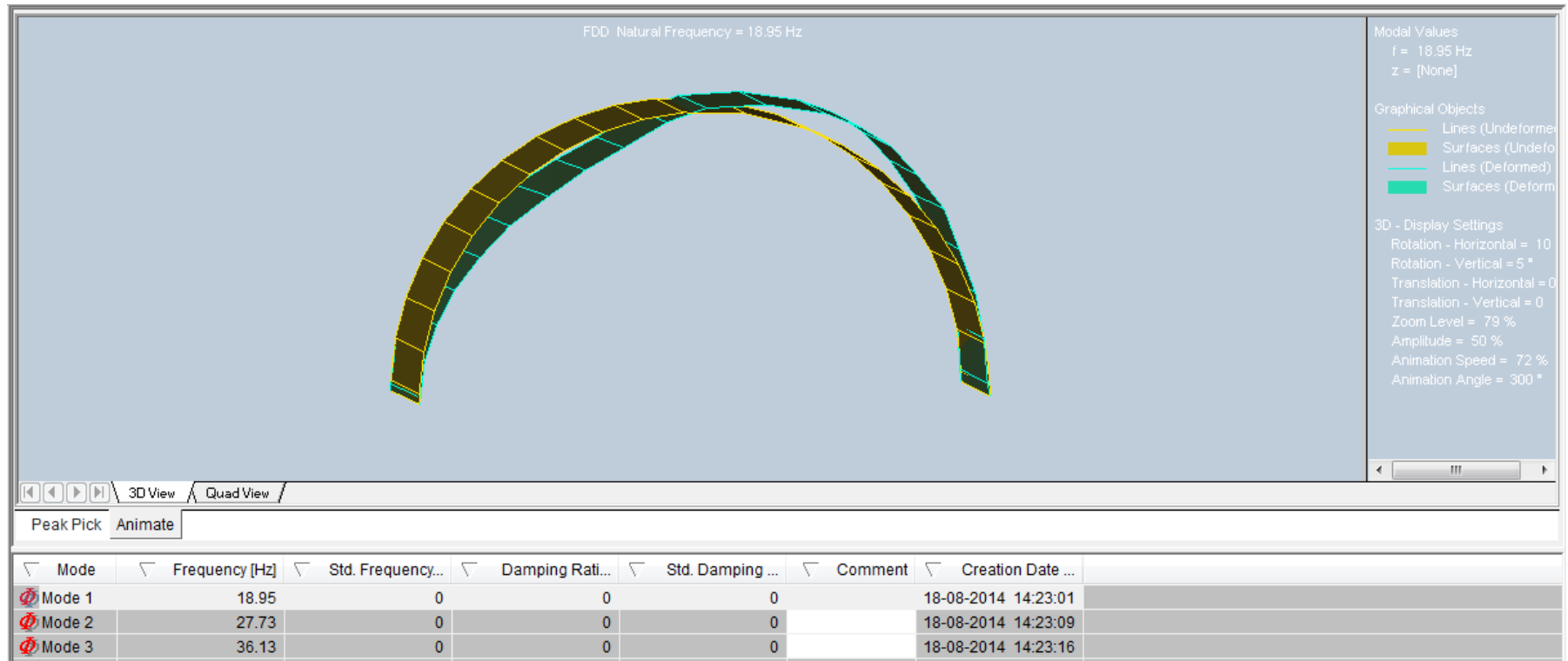


Figura 4.5. Imagen de la primera forma modal de un arco en el software ARTeMIS.



4.1.3. MÉTODO DE IDENTIFICACIÓN DE DAÑO BASADO EN CAMBIOS EN LA MATRIZ DE RIGIDEZ Y FLEXIBILIDADES

Partiendo del concepto de la ecuación de movimiento de un sistema de múltiples grados de libertad planteada en el capítulo 2, cuya finalidad práctica es obtener las frecuencias y formas modales de un sistema estructural, el principio fundamental de este método es hacer uso de los datos de las frecuencias y modos obtenidos de forma experimental para obtener la rigidez y flexibilidad del sistema estructural sin daño y después del daño, para finalmente restar la rigideces o flexibilidades respectivamente e identificar la zona afectada que sería donde se presenta la mayor pérdida de estas propiedades dinámicas. La principal razón por la que se decidió utilizar esta metodología basada en cambios en la matriz de rigidez y flexibilidad (*Vázquez, et al.*) medidas dinámicamente, fue que el método es no destructivo, además de lo versátil que resulta su aplicación en la práctica, también que no es necesaria demasiada información para su aplicación y que se contaba con el equipo necesario para registrar esa poca información (como lo son las propiedades dinámicas), ya que el objetivo es crear una metodología que pueda ser empleada en edificaciones históricas en las que es de vital importancia mantener intacta su forma original.

Antes de comenzar con el planteamiento del método es conveniente recordar las condiciones de ortogonalidad que satisface la matriz de modos de vibrar $[\Phi]$ de un sistema de n grados de libertad (*Vázquez, et al.*), donde los modos están normalizados respecto a la matriz de masas $[M]$:

$$[\Phi]^T [K] [\Phi] = [\omega^2] \quad 4.1$$

$$[\Phi]^T [M] [\Phi] = [I] \quad 4.2$$



En las expresiones anteriores $[\omega^2]$ es la matriz diagonal que contiene los n valores de las frecuencias naturales al cuadrado. Con el fin de facilitar la aplicación del método cuando se miden de forma experimental las frecuencias y modos, se consideró que los n grados de libertad sean solo los de traslación, es decir que se han condensado los grados de libertad rotacionales.

Si se conocen las n frecuencias y modos de vibración medidos experimentalmente utilizando n sensores (acelerómetros) distribuidos en la estructura, se podrá calcular la matriz de rigideces $[K]$ usando la ecuación 4.1 (Vázquez, *et al.*).

$$[K] = [\Phi]^{-T} [\omega^2] [\Phi]^{-1} \quad 4.3$$

Tomando en cuenta la ecuación 4.2, se puede reescribir la ecuación 4.3 evitando calcular la inversa de la matriz modal $[\Phi]$ (Vázquez, *et al.*), de la siguiente forma:

$$[K] = [M][\Phi][\omega^2][\Phi]^T[M] \quad 4.4$$

Si en la matriz modal $[\Phi]$ experimental se tiene un número de modos m menor que n , a la matriz de rigideces que se obtiene se le conoce como matriz de rigideces cruda $[K^*]$ (Vázquez, *et al.*):

$$[K^*] = [M]_{n \times n} [\Phi]_{n \times m} [\omega^2]_{m \times m} [\Phi]^T_{m \times n} [M]_{n \times n} \quad 4.5$$

De igual forma, de la ecuación 4.1 se puede obtener la matriz de flexibilidades $[F]$ en términos de las n frecuencias y modos, además si las n frecuencias y modos experimentales con los que se cuenta no son todos, sino sólo las m primeras formas modales, la matriz de flexibilidades que se obtiene se denominará matriz de flexibilidad cruda $[F^*]$ (Vázquez, *et al.*):

$$[F^*] = [\Phi]_{n \times m} \left[\frac{1}{\omega^2} \right]_{m \times m} [\Phi]^T_{m \times n} \quad 4.6$$

Tanto $[K^*]$ como $[F^*]$ son matrices de dimensiones $n \times n$ similares a las matrices de rigidez y flexibilidad de la estructura, pero son singulares. Es decir, no se cumple que



$[F^*] = [K^*]^{-1}$. Como es de esperarse, la similitud entre estas dos matrices con las matrices de rigidez y flexibilidad normales depende de cuántos modos y frecuencias naturales se usan en las ecuaciones 4.5 y 4.6 (Vázquez, *et al.*).

Si experimentalmente se lograran medir todas las n frecuencias y modos (o un número significativo de ellos) y obtener la matriz de rigideces, se puede realizar una comparación entre estas matrices antes y después de la aparición del daño, lo que en teoría resulta en una herramienta precisa para determinar la ocurrencia y la zona del daño. Así mismo se aplica para el uso de las matrices de flexibilidades para detectar en una estructura si hay o no un defecto. Resumiendo de la diferencia entre las matrices de rigideces o flexibilidades, resulta la matriz $[\Delta]$ (Vázquez, *et al.*):

$$[\Delta] = [\textit{matriz sin daño}] - [\textit{matriz con daño}] \quad 4.7$$

En el siguiente capítulo se presenta la aplicación de esta metodología, para lo cual se propuso que los casos en estudio sean en un ambiente controlado para así minimizar agentes externos que puedan afectar a la correcta ejecución del método. Los detalles y consideraciones necesarias para llevar a cabo la campaña experimental y sus resultados de igual manera se describirán en el próximo capítulo.



5. APLICACIONES DE IDENTIFICACIÓN DEL DAÑO EN ARCOS DE MAMPOSTERÍA

Para conocer los cambios en una estructura producidos por el daño en la misma, se puede recurrir a la identificación de las características dinámicas de la misma. Para lo anterior se han desarrollado métodos en los cuales se puede comparar las frecuencias y modos de vibración de la estructura.

Siguiendo esta premisa de forma experimental se puede identificar los cambios en una estructura durante diferentes etapas para establecer la variación de los mismos, procedimiento que conforma la conocida como anamnesis estructural, que es el principio básico de los estudios de salud estructural.

Con base en lo anterior y ante la imposibilidad de realizar estudios en arcos reales, se decidió usar como banco de pruebas experimental arcos representativos en un ambiente controlado, sobre los cuales fuera simple la instrumentación y captura de vibraciones ambientales durante diferentes etapas de carga, de cara a la identificación del daño inducido sobre los mismos.



5.1. ESTRUCTURA EN ESTUDIO

En estructuras de tipo histórico, el arco es un elemento muy recurrido por diferentes civilizaciones a lo largo de la historia debido a su simpleza y eficacia, ya que se ha comprobado que su peculiar forma puede ser de gran utilidad cuando se trata de salvar grandes claros, como lo son los puentes, acueductos o en los mismos edificios de carácter religioso y habitacional.

Conociendo que el arco es un elemento que comúnmente se encuentra presente en los distintos edificios de carácter histórico, se decidió usar este elemento para aplicar una metodología de detección de daño. Además, buscando abarcar las tipologías comunes en los arcos de mampostería contenidos en las estructuras históricas, se propusieron para su análisis dos tipos de arco, uno de medio punto y otro rebajado, con la finalidad de implementar la identificación de daño de forma experimental.

Para lo anterior es preciso definir qué es un arco, sus componentes, así como el trazado de las tipologías de arco seleccionadas.

QUÉ ES UN ARCO

Es un elemento que cierra superiormente un claro o abertura, de forma tal que la mayoría de las piezas que lo componen se comprimen entre sí. Dichas presiones son producidas por el peso propio de cada pieza y por las cargas que está soportando, las cuales son transmitidas a los extremos donde se encuentran los apoyos que lo sostienen. El arco nació de la necesidad arquitectónica de salvar claros o luz de mayores dimensiones que las que se pueden alcanzar con elementos constitutivos de construcciones de mampostería, cuyo material no resiste esfuerzos elevados y por ello no pueden trabajar a flexión (*Moreno, 2004*).



Desde su más remoto empleo, los arcos han adoptado variadas formas características de cada época o estilo, recibiendo distinto nombre según su diseño.

COMPONENTES DE UN ARCO

En un arco cabe distinguir una serie de características que se pueden agrupar en los siguientes apartados: elementos, dimensiones, líneas, superficies, juntas y molduras (ver Figura 5.1) (Moreno, 2004).

ELEMENTOS

- Estribos: macizos contruidos entre los que se apoya el arco.
- Arranques: puntos de nacimiento del arco.
- Riñones: zonas intermedios del arco comprendidas entre los arranques y la clave.
- Tímpano, enjuta o recalzado: parte de la construcción en la que descansa sobre los riñones del arco hasta la altura del trasdós de la clave.
- Dovelas: piezas que componen el arco.
- Clave: dovela central del arco.
- Contraclaves: dovelas adyacentes a la clave.
- Salmeres o almohadas: dovelas de arranque del arco.

DIMENSIONES

- Luz: distancia horizontal media entre los arranques.
- Flecha, monte o sagita: altura del arco respecto a la línea de arranque.
- Peralte: exceso de dimensión de la flecha sobre la semiluz.
- Profundidad o ancho: dimensión del arco en dirección normal a su plano. Por regla general, coincide con el ancho del muro correspondiente.
- Espesor o canto: distancia comprendida entre el intradós y el trasdós del arco.

LÍNEAS

- Línea de presiones: línea definida por los puntos de paso de las fuerzas que ejerce el arco.
- Línea de arranque: línea que une los puntos de arranque del arco.

SUPERFICIES

- Frente o plano del arco: plano definido por su paramento frontal.
- Intradós: superficie definida por el paramento inferior del arco. Su punto más alto recibe el nombre de vértice o ápice, y la línea de vértices, espinazo.



- Trasdós: superficie definida por el paramento superior del arco.
- Mocheta o telar: plano normal al frente del arco, que limita al estribo.

JUNTAS

- Tendeles: juntas horizontales, de espesor uniforme, que se acusan en el intradós y el trasdós del arco; en profundidad, es perpendicular al plano del arco.
- Llagas: juntas paralelas al plano del arco que se acusan entre piezas de una misma hilada-dovela.
- Escopetas: juntas de espesor variable que se acusan en el frente del arco.

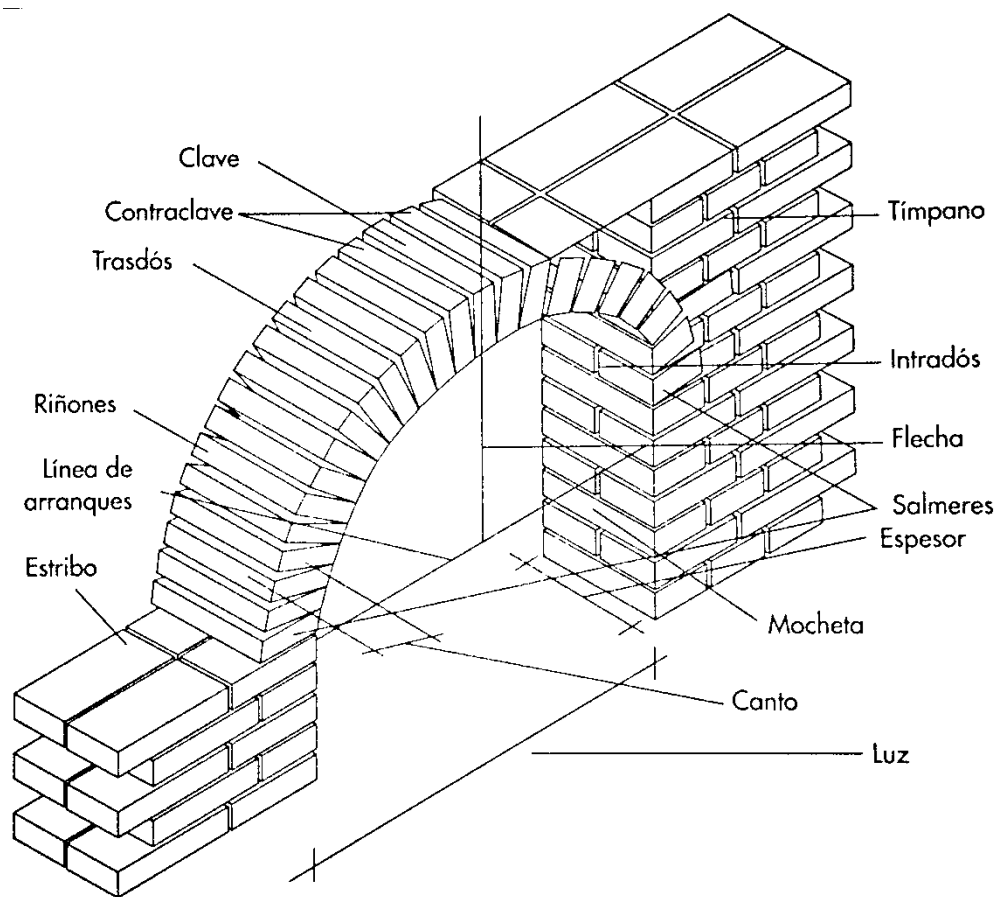


Figura 5.1. Partes de un arco (Moreno, 2004).

ARCO DE MEDIO PUNTO O REDONDO

Es una semicircunferencia, cuya flecha (OE) es igual a la mitad del claro (OA u OB).

Figura 5.2.

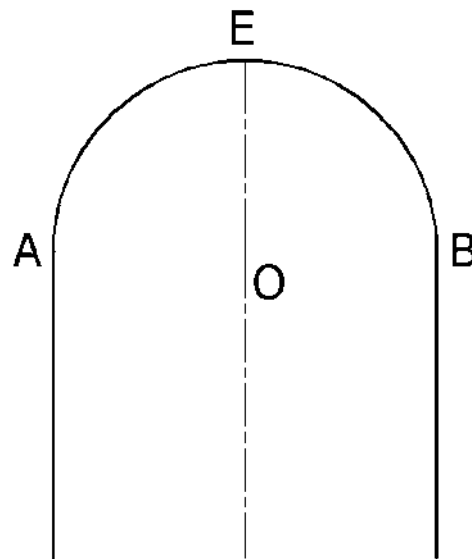


Figura 5.2. Arco de medio punto.

ARCO REBAJADO O DE SEGMENTO

Está formado por un arco de circunferencia de flecha menor a la mitad del claro. Por lo tanto, su centro estará siempre por debajo de la línea de arranque (AB). Figura 5.3.

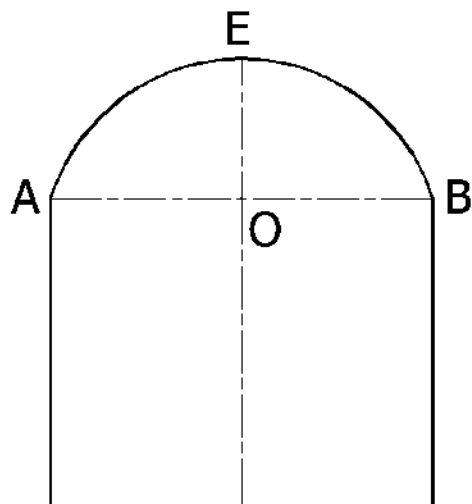


Figura 5.3. Arco rebajado.

Con base en las características mencionadas con anterioridad, las propiedades de los arcos utilizados como banco de pruebas son las que se detallan a continuación.



5.1.1. ARCO DE MEDIO PUNTO

Se utilizó un arco de mampostería construido con piezas de barro recocido con 9 x 4 x 18 cm, para el cual sus piezas fueron pegadas con un mortero con baja resistencia mecánica, de tal manera que se pudiera lograr infringir daño en el elemento con la aplicación de poco peso y sin que este alcanzara el colapso. En la Figura 5.4 se muestran algunas imágenes de las etapas de construcción del arco.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.4. Arco de medio punto: a) Cimbra; b) pegado de las piezas; c) arco terminado.



El arco con forma semicircular tiene una flecha de 75 cm, una luz de 150 cm, un ancho de 45 cm y el espesor es de 9 cm; el espesor de las juntas es de 1 cm aproximadamente. A los lados del arco se encuentran unos apoyos de concreto con el propósito de estos ayuden a que el arco no se abra al momento de aplicar la carga, por efecto de la fuerza de coceo. En la figura 5.5 se muestra los detalles de su geometría.

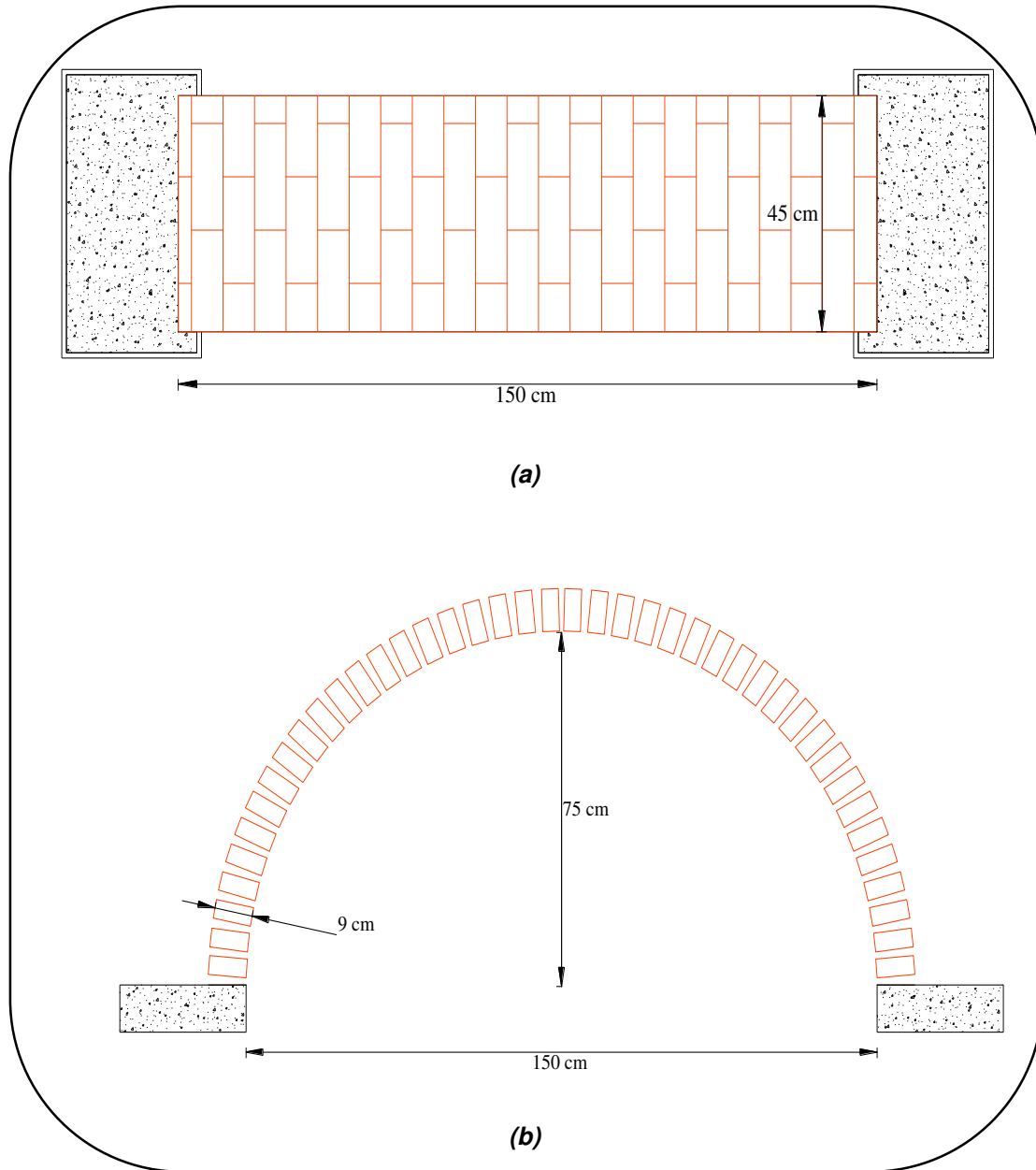
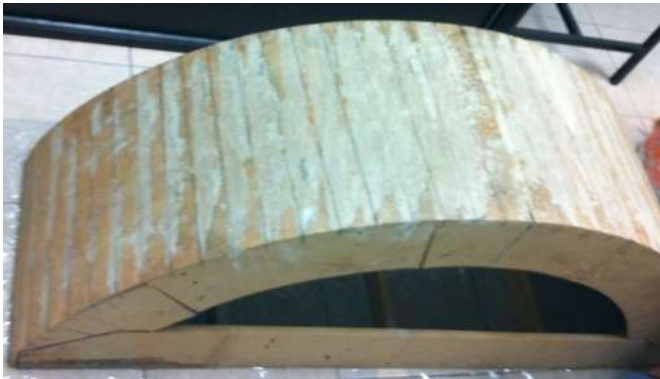


Figura 5.5. Geometría del arco de medio punto: a) Vista en planta; b) Vista lateral.



5.1.2. ARCO REBAJADO

Al igual que el arco de medio punto este arco de mampostería fue construido con piezas de barro recocido con 9 x 4 x 18 cm, las cuales fueron pegadas con un mortero con baja resistencia mecánica, de tal manera que se pueda lograr infringir daño en el elemento con la aplicación de poco peso y sin que este llegue al colapso. En la Figura 5.6 se muestran algunas imágenes de las etapas de construcción del arco.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.6. Arco rebajado: a) Cimbra; b) pegado de las piezas; c) proceso de construcción.



Este arco cuenta con una flecha de 55 cm, una luz de 150 cm, un ancho de 45 cm y el espesor es de 9 cm; el espesor de las juntas es de 1 cm aproximadamente. En la figura 5.7 se muestra los detalles de su geometría.

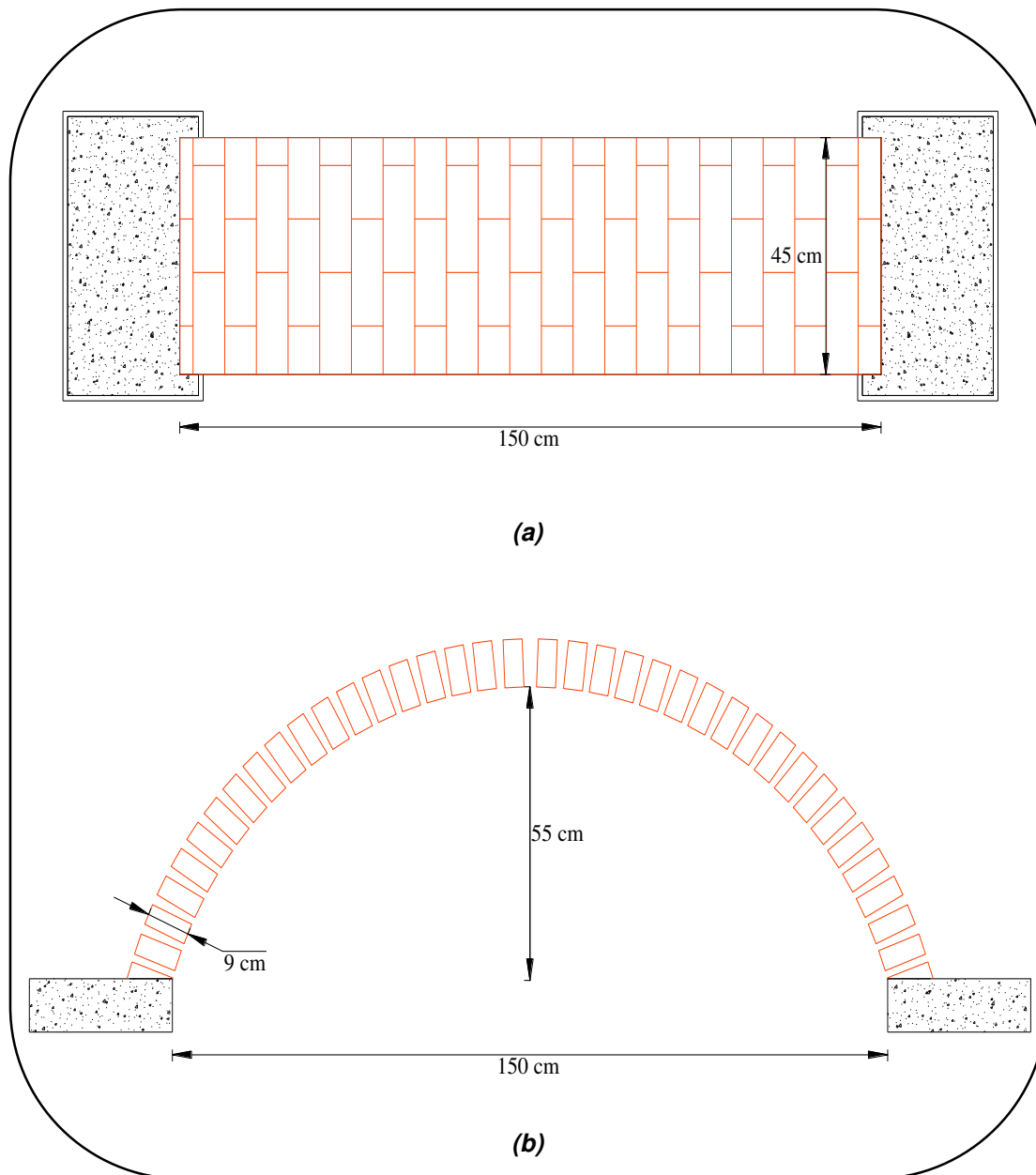


Figura 5.7. Geometría del arco de rebajado: a) Vista en planta; b) Vista lateral.



CAMPAÑA EXPERIMENTAL

Para realizar la campaña experimental se utilizaron ocho *episensores ES-U2 de Kinematics*, debido a la cantidad de sensores y a que la longitud de los arcos en estudio es demasiada como para ser cubierta en su totalidad por los mismos, se propuso hacer un “barrido” a lo largo de la superficie de los arcos con cuatro de los sensores (Figura 5.14 y Figura 5.20, en color negro), y los otros cuatro se colocaron en una posición fija (Figura 5.14 y Figura 5.20, en color rojo) con la finalidad de registrar correctamente sus propiedades dinámicas. Los registros se realizaron durante un periodo de cinco minutos a doscientas muestras por segundo en cada una de las posiciones, la configuración en la que se posicionaron los sensores y cada posición de los mismos para el arco de medio punto y el arco rebajado, se muestra en las siguientes imágenes:

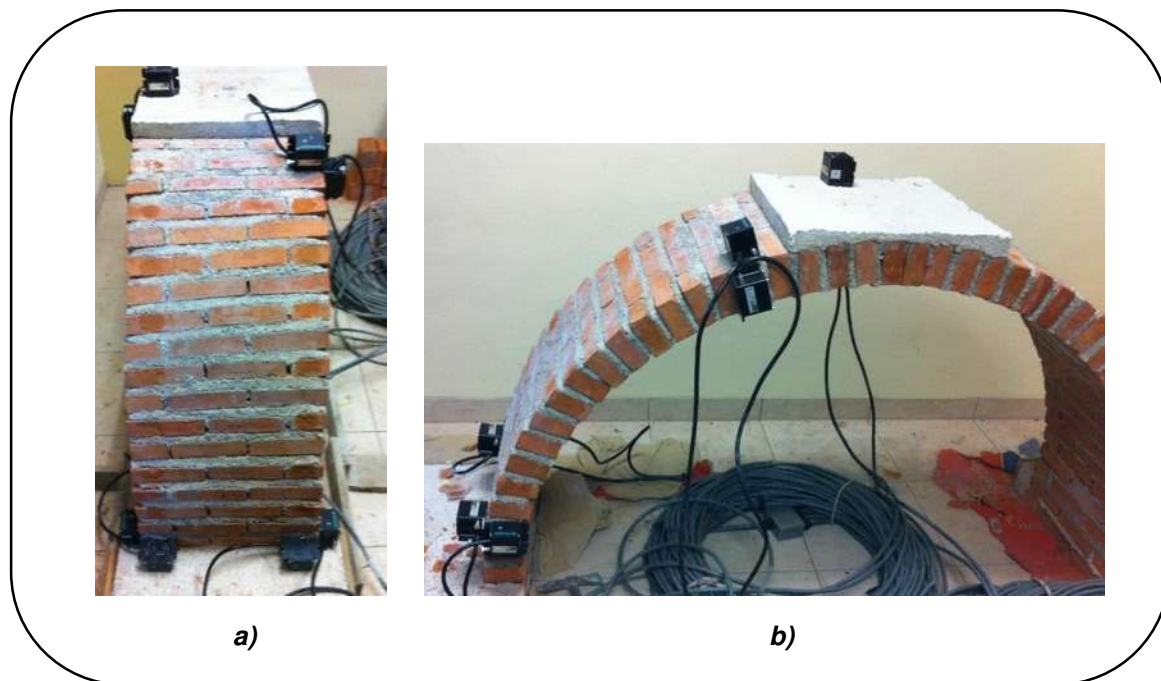


Figura 5.8. Arco Medio Punto: a) Posición 1 y b) Posición 2.

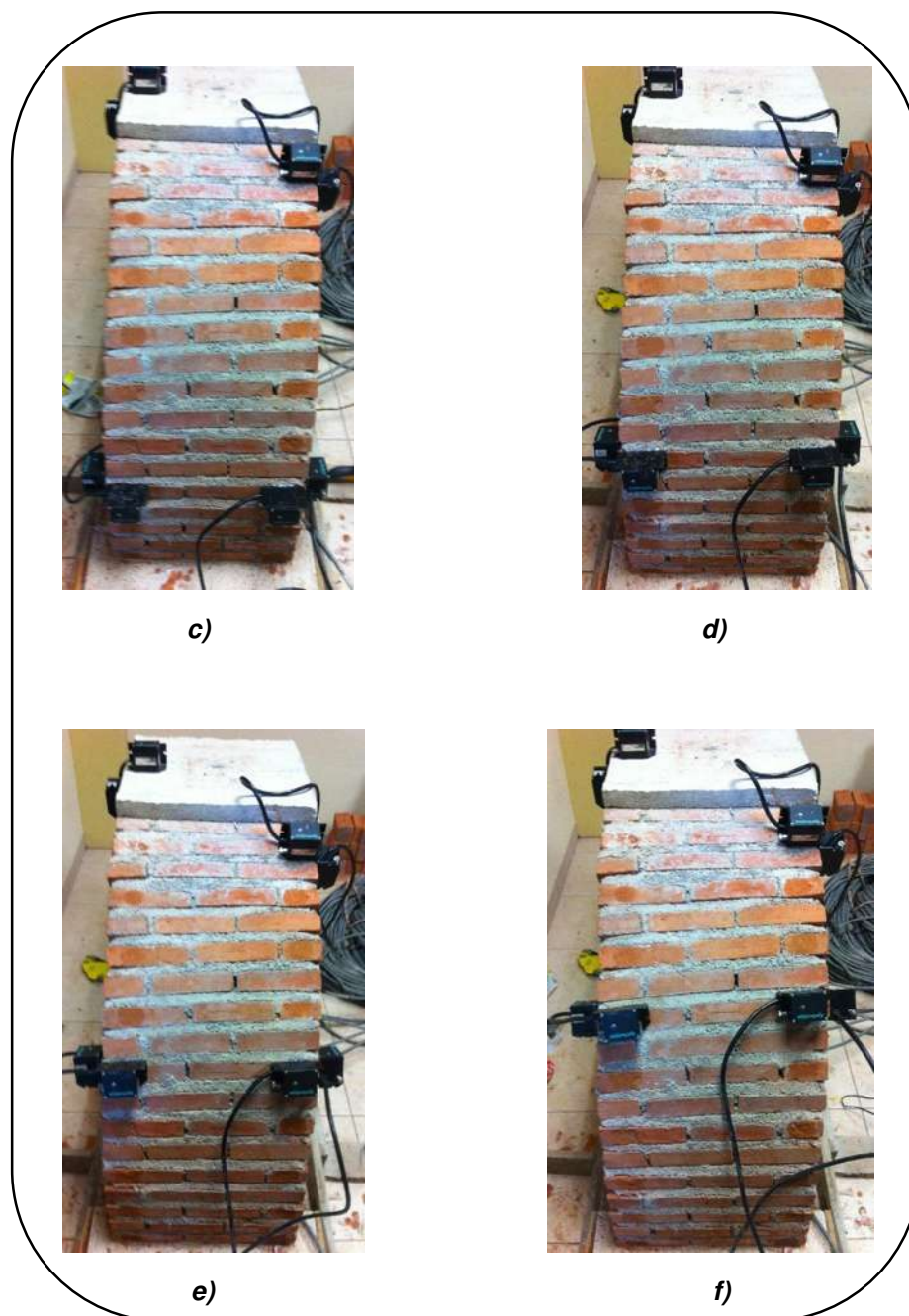


Figura 5.9. Arco Medio Punto: c) Posición 3; d) Posición 4; e) Posición 5 y f) Posición 6.



g)



h)



i)



j)

Figura 5.10. Arco Medio Punto: g) Posición 7; h) Posición 8; i) Posición 9 y j) Posición 10.

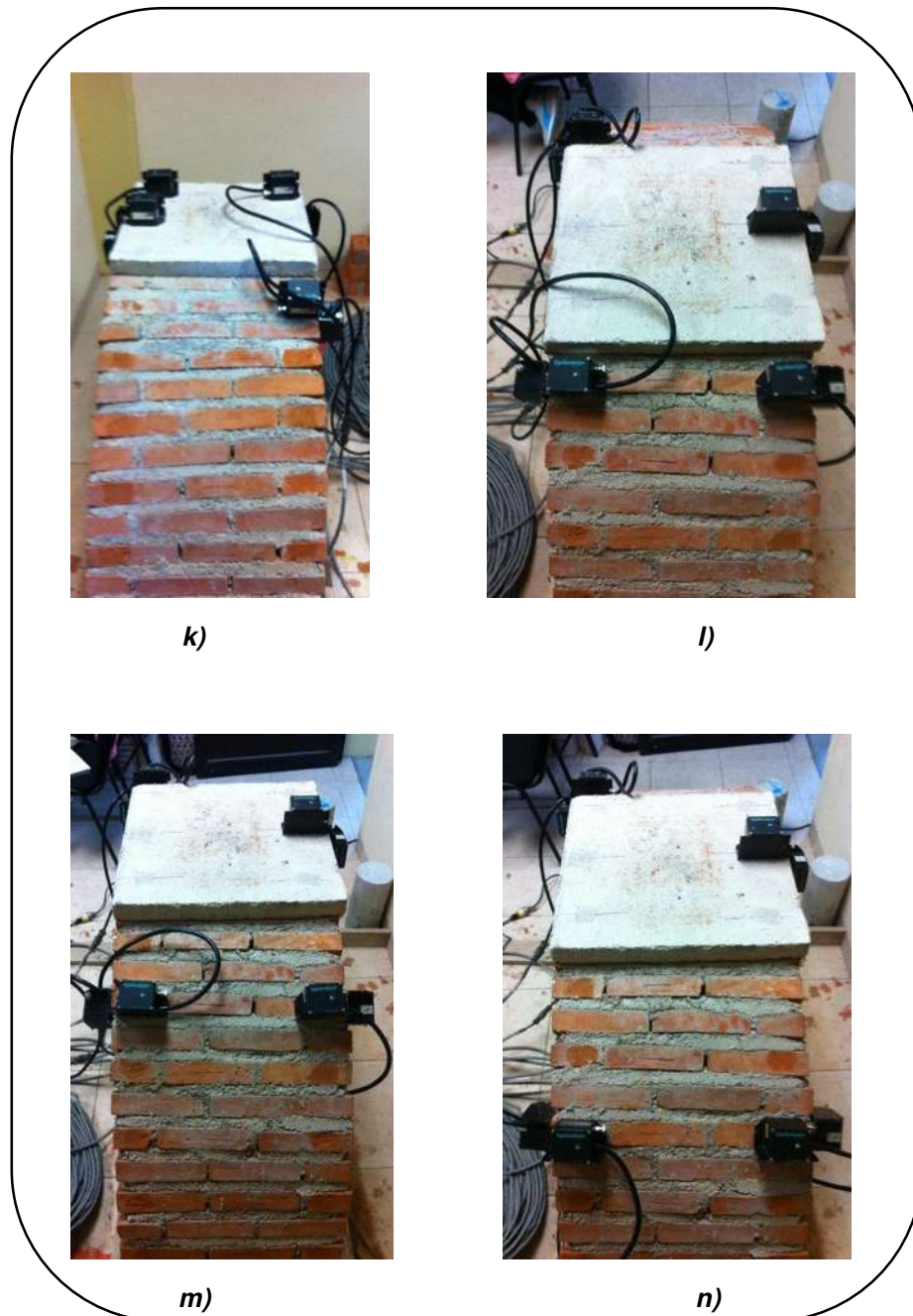


Figura 5.11. Arco Medio Punto: k) Posición 11; l) Posición 12; m) Posición 13 y n) Posición 14.

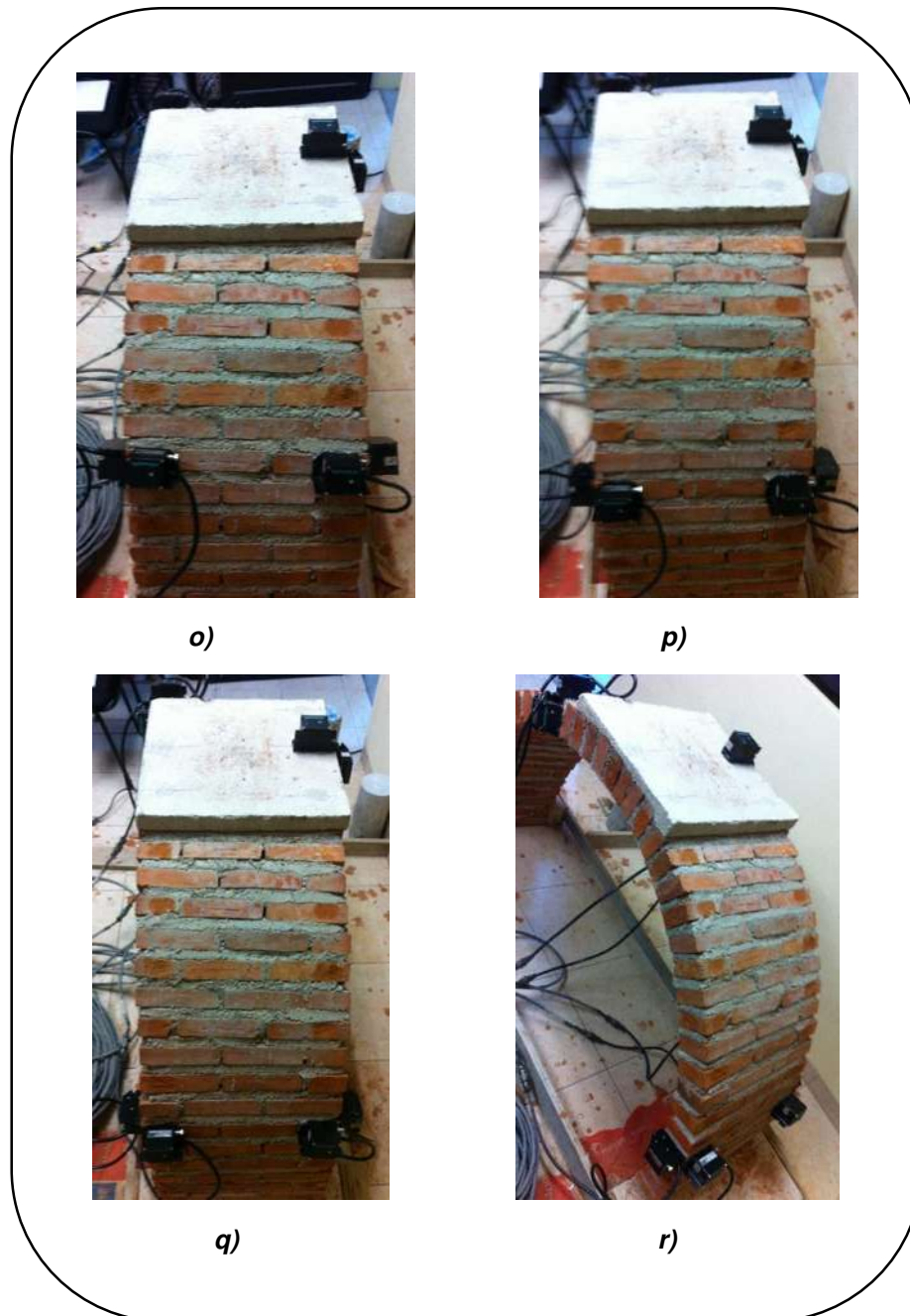


Figura 5.12. Arco Medio Punto: o) Posición 15; p) Posición 16; q) Posición 17 y r) Posición 18.

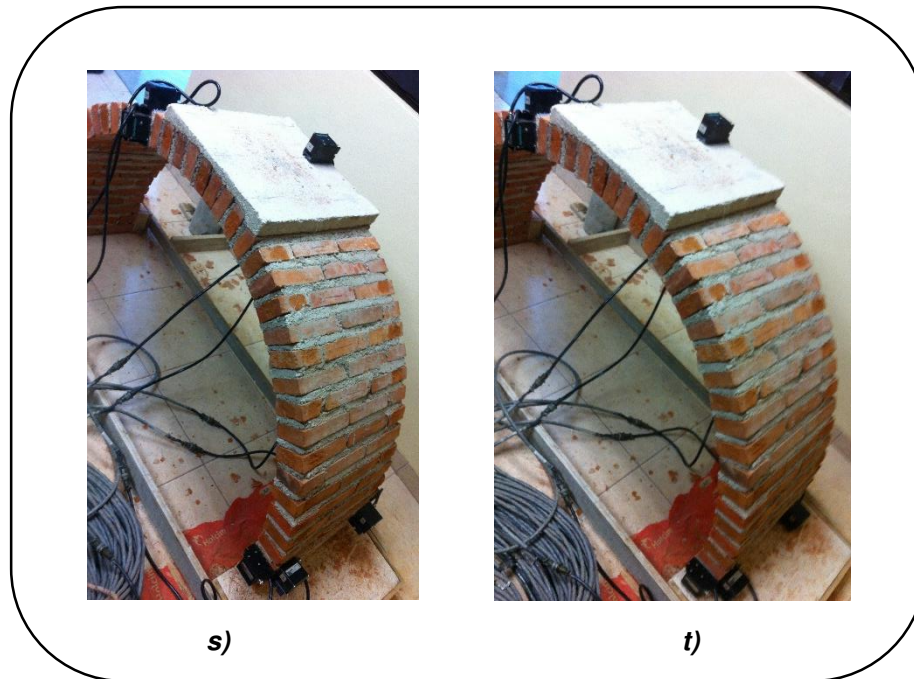


Figura 5.13. Arco Medio Punto: s) Posición 19 y t) Posición 20.

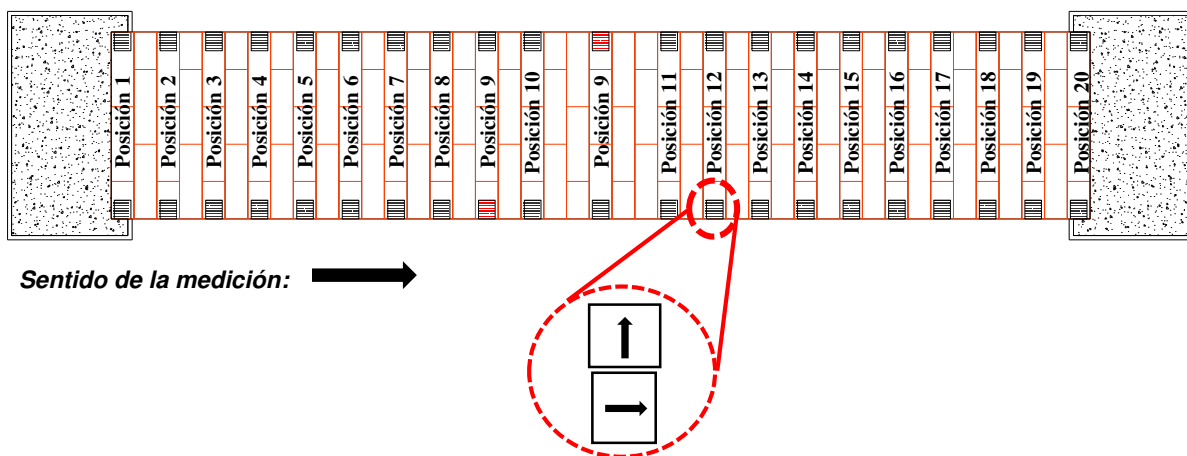


Figura 5.14. Resumen de las posiciones de los sensores en el arco de medio punto, las marcas en rojo representan los sensores fijos, en el círculo rojo se indica las direcciones de los sensores, la vertical corresponde a la cara superior mientras la horizontal a la cara lateral del arco.

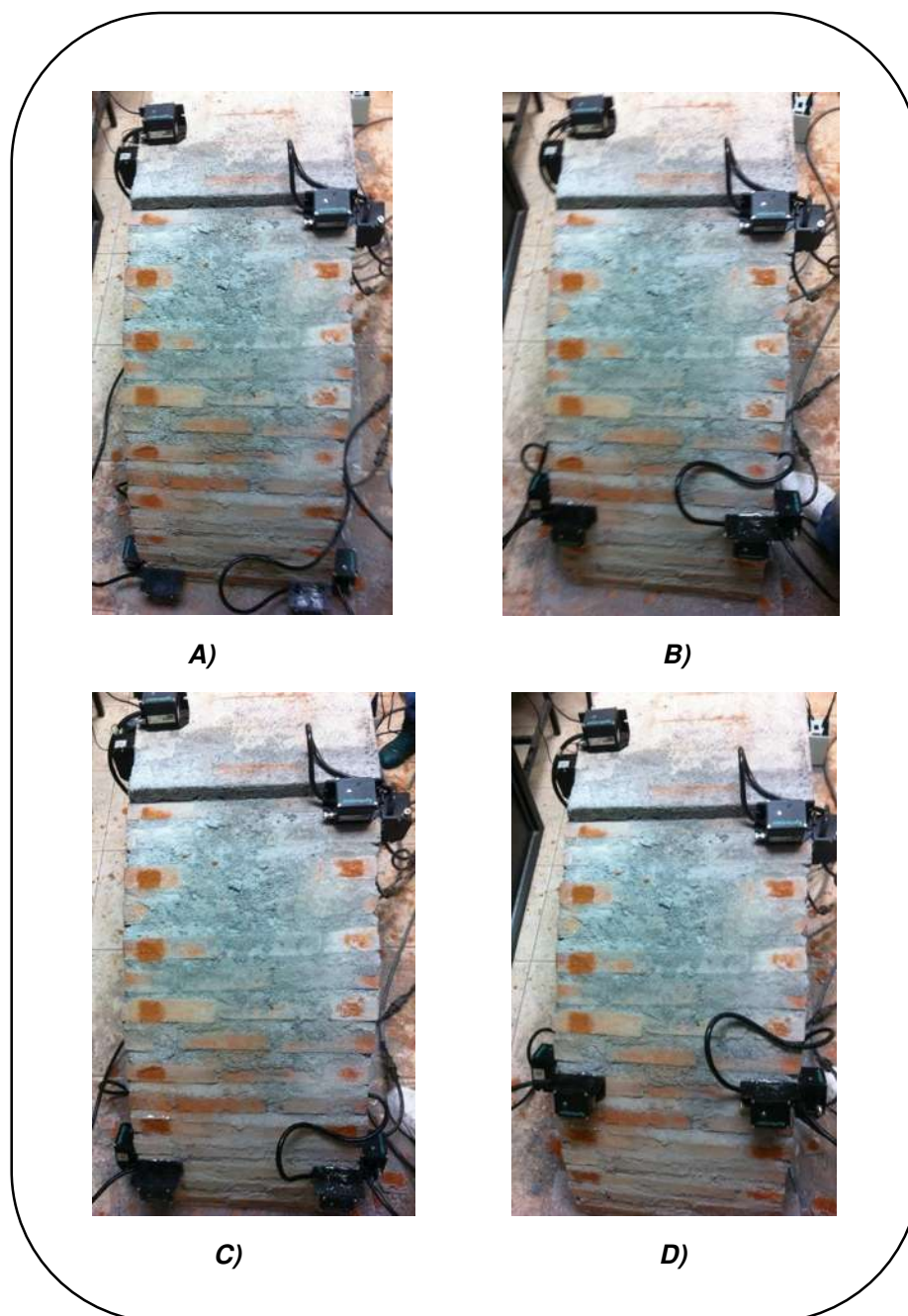


Figura 5.15. Arco Rebajado: A) Posición 1; B) Posición 2; C) Posición 3 y D) Posición 4.

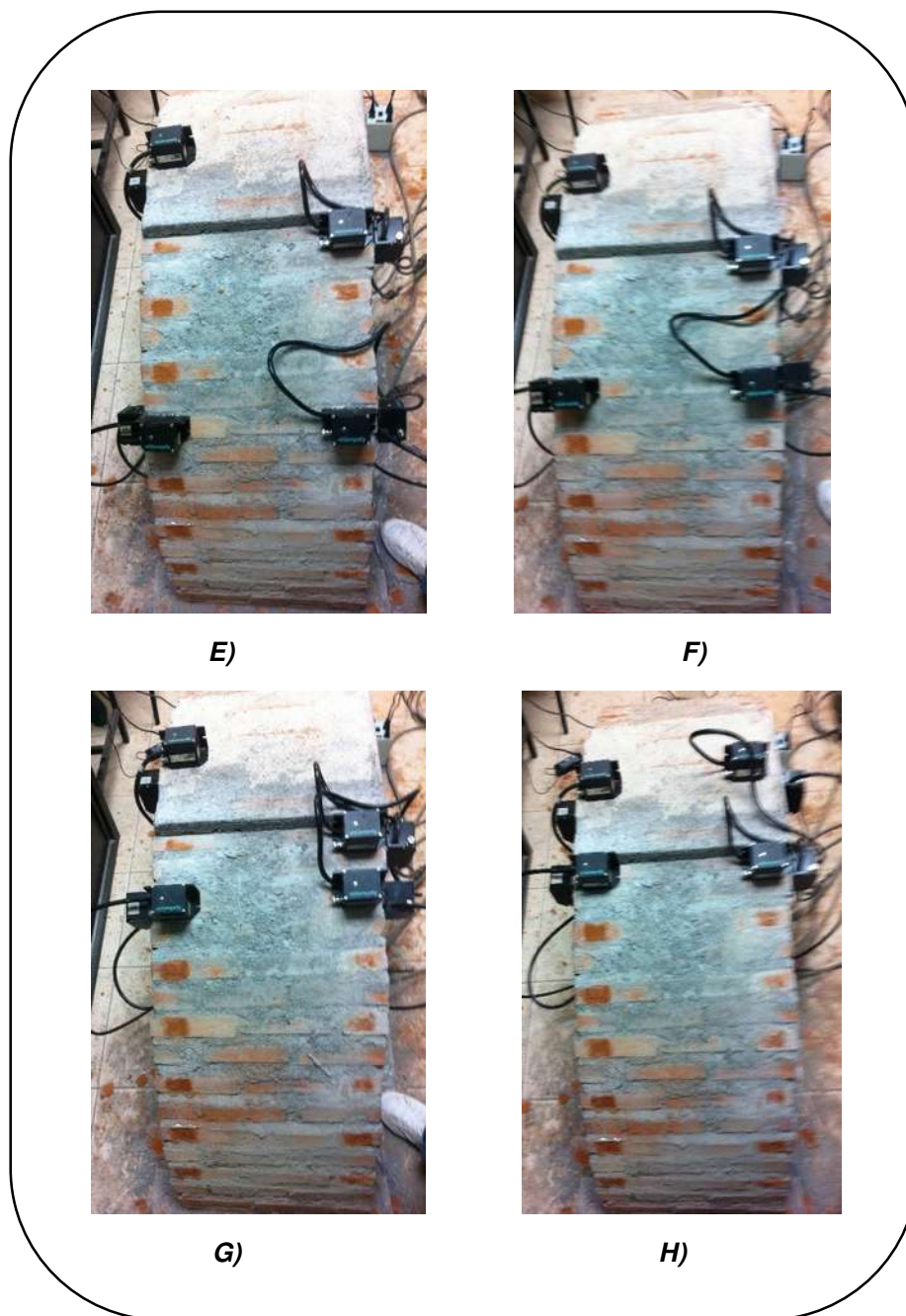


Figura 5.16. Arco Rebajado: E) Posición 5; F) Posición 6; G) Posición 7 y H) Ubicación 8.

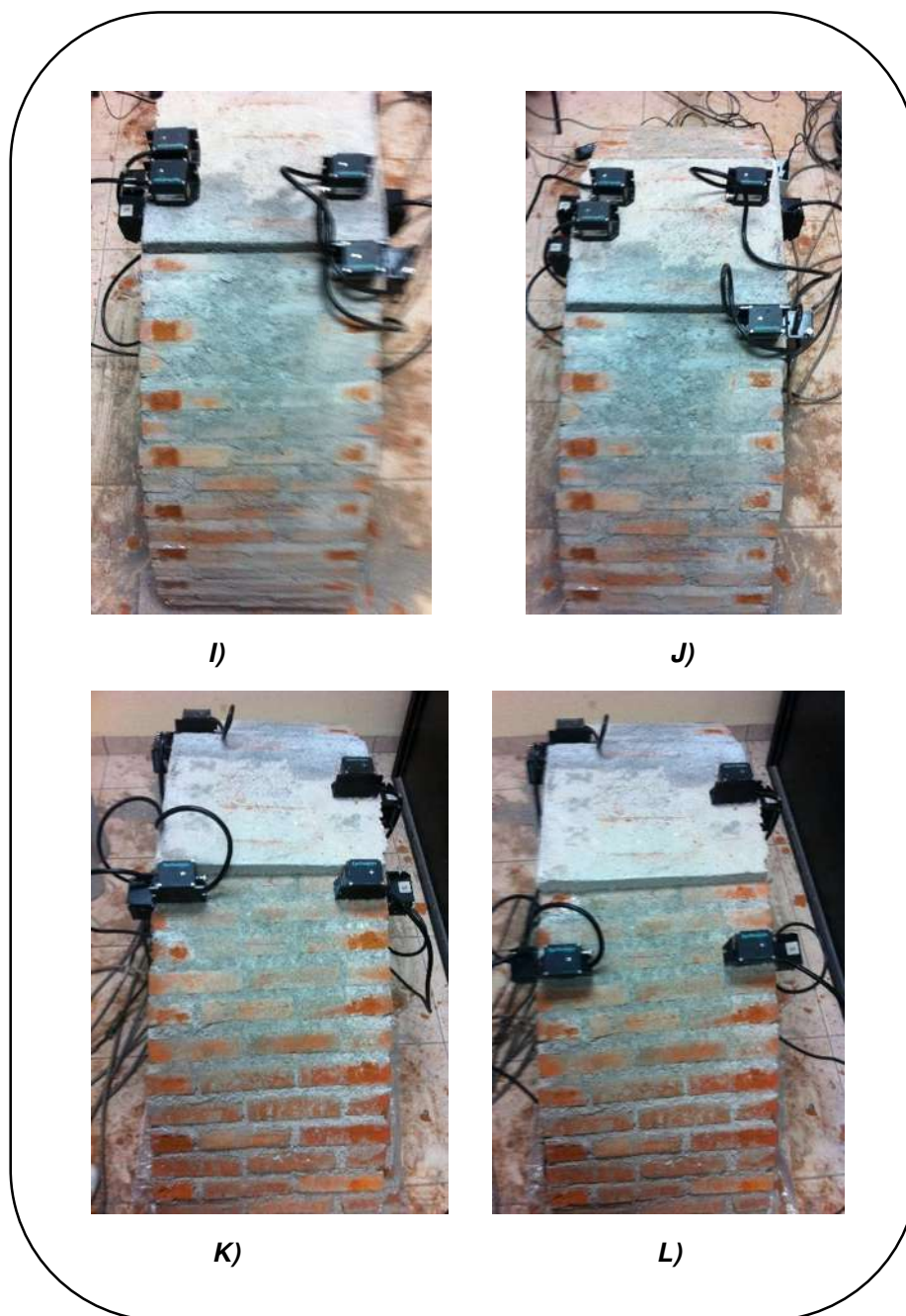


Figura 5.17. Arco Rebajado: I) Posición 9; J) Posición 10; K) Posición 11 y L) Posición 12.

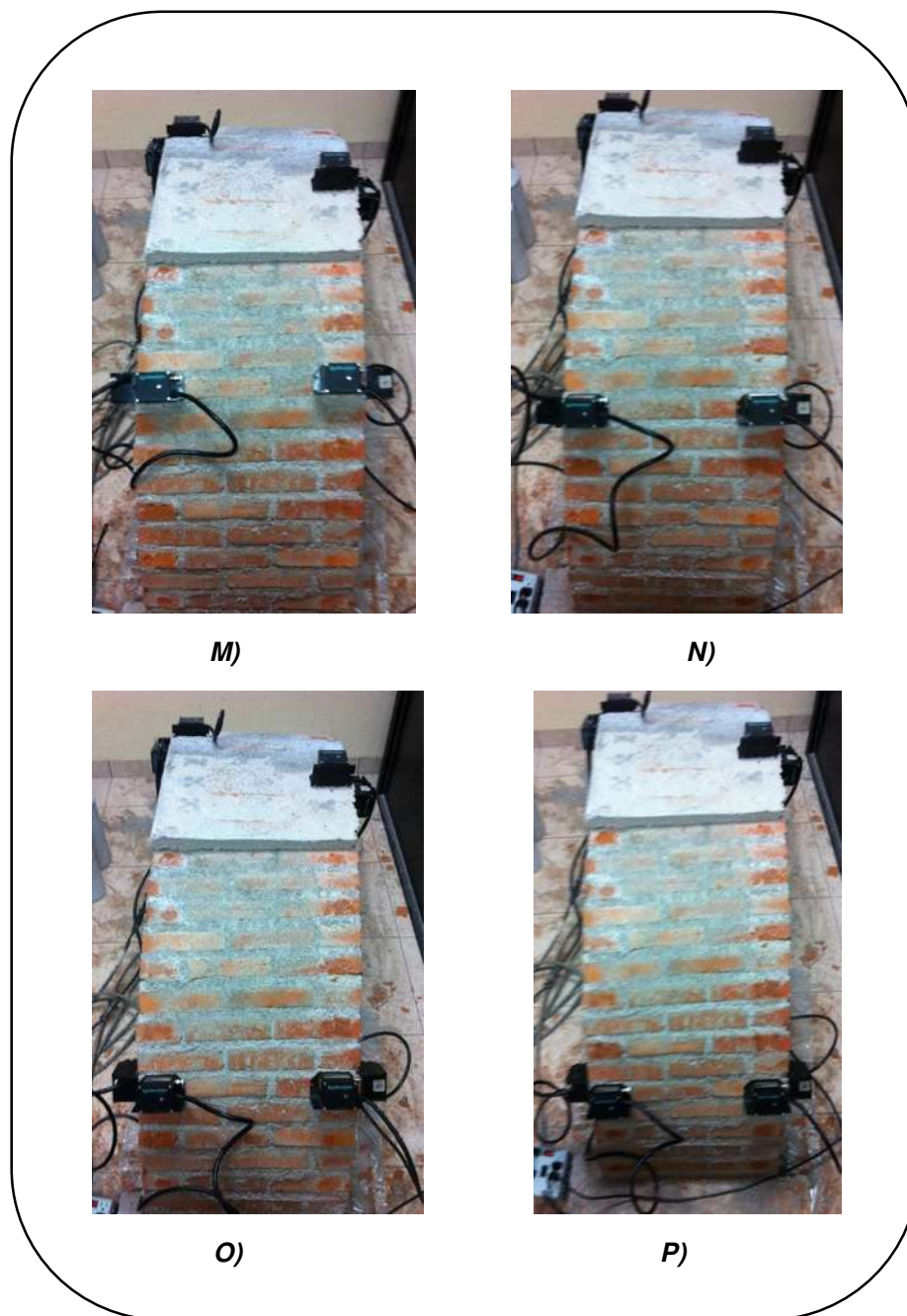


Figura 5.18. Arco Rebajado: M) Posición 13; N) Posición 14; O) Posición 15 y P) Posición 16.

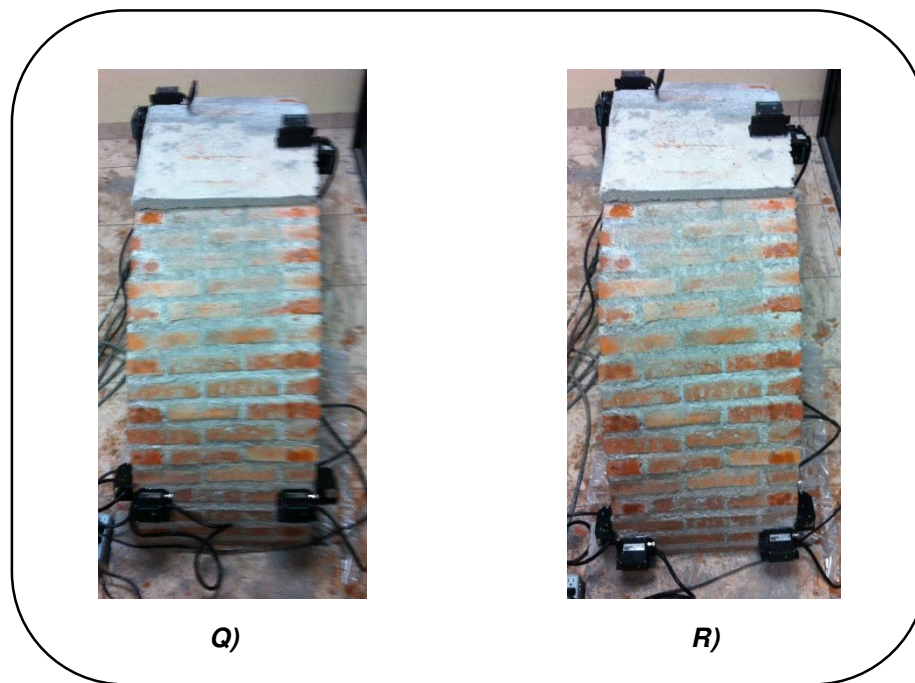


Figura 5.19. Arco Medio Punto: Q) Posición 17 y R) Posición 18.

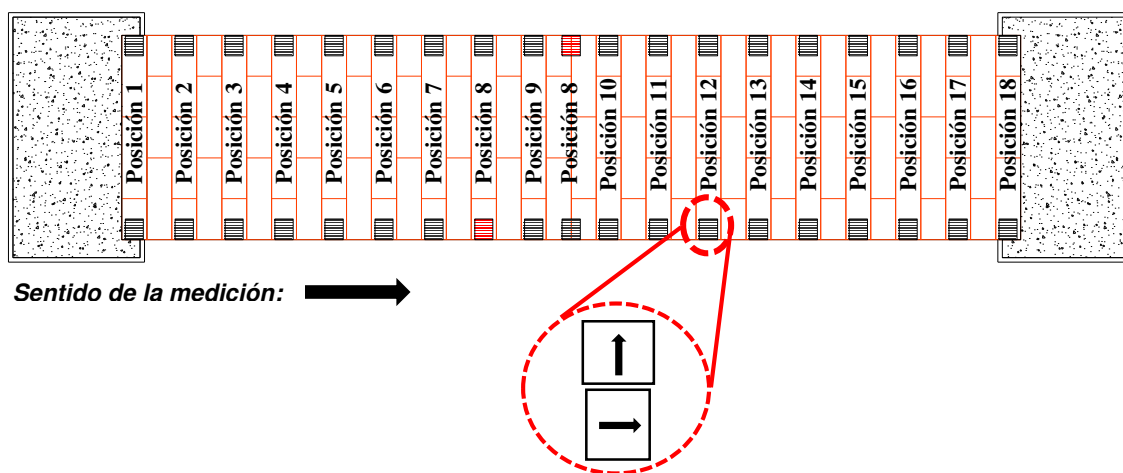


Figura 5.20. Resumen de las posiciones de los sensores en el arco rebajado, las marcas en rojo representan los sensores fijos, en el círculo rojo se indica las direcciones de los sensores, la vertical corresponde a la cara superior mientras la horizontal a la cara lateral del arco.



Una vez obtenidos los datos de los elementos sin daño, se procedió a cargar los elementos procurando que presenten grietas y que las mismas no excedan al número de articulaciones con el cual el elemento colapsaría. El peso se añadió de forma incremental con cilindros de concreto de 15 cm x 30 cm, con un peso aproximado de 47 kg cada uno. El registro de vibración ambiental se realizó siguiendo el procedimiento descrito anteriormente (cinco minutos de registro en las mismas posiciones), con la diferencia que los registros se realizaron con el peso de los cilindros sobre los arcos (ver Figura 5.21, Figura 5.22, Figura 5.23 y Figura 5.24).

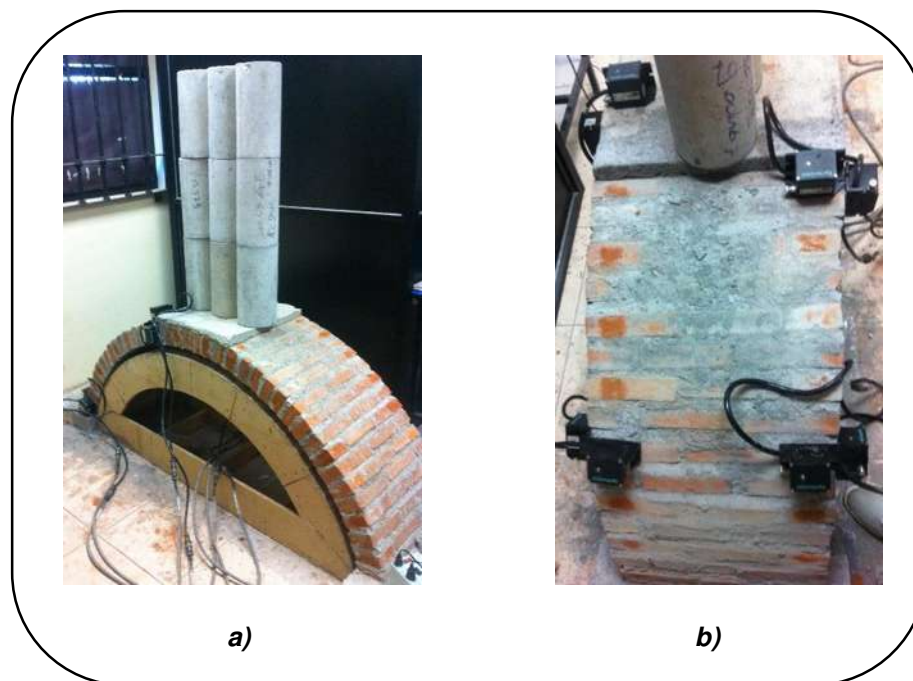


Figura 5.21. Resumen de las posiciones de los sensores en el arco rebajado cargado con los cilindros: a) Posición 1 y b) Posición 3.

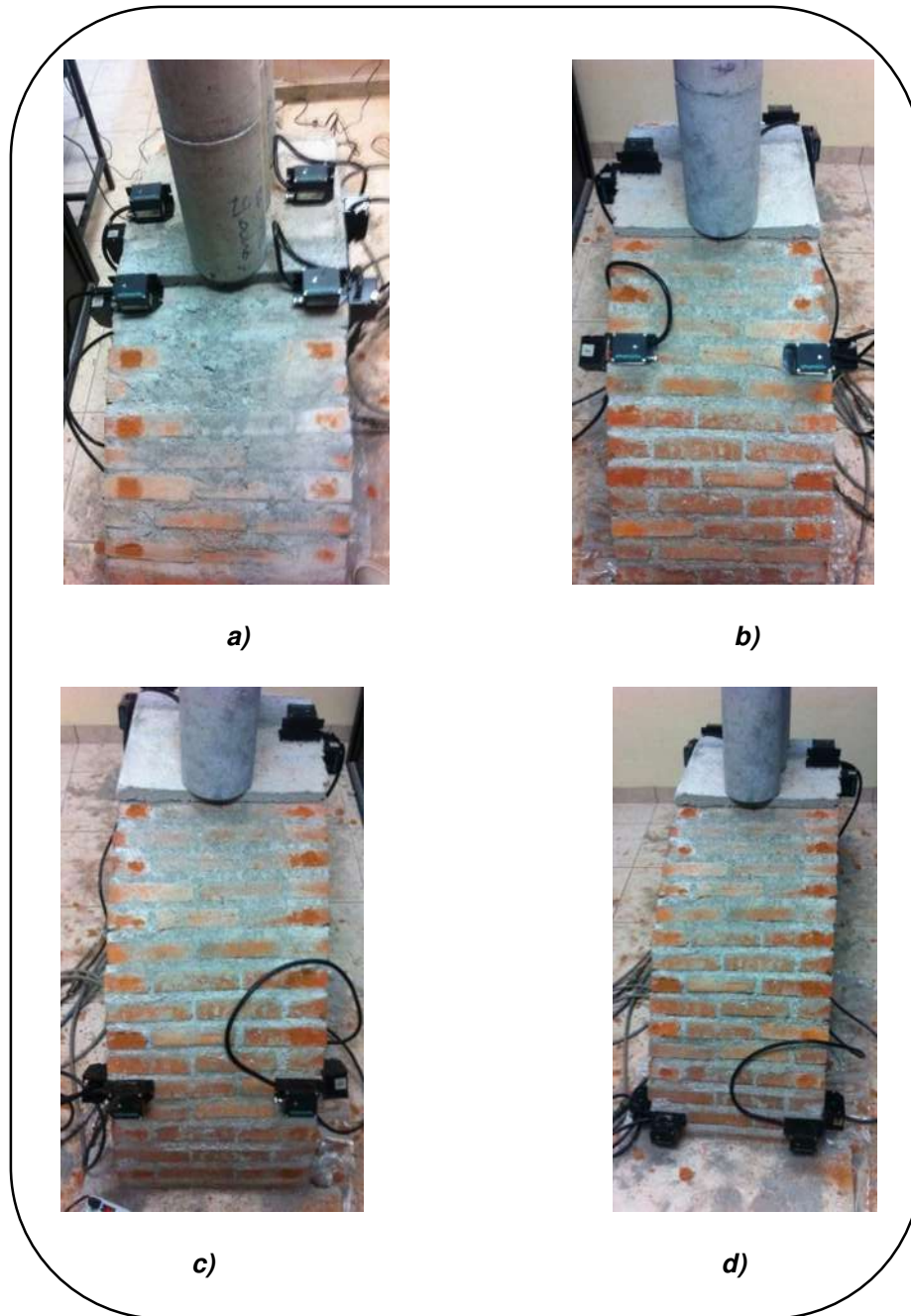
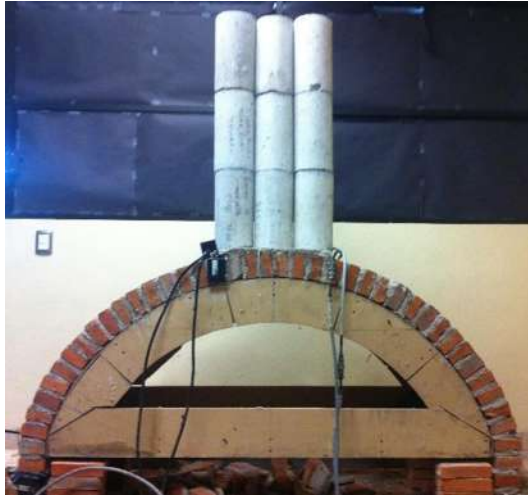


Figura 5.22. Resumen de las posiciones de los sensores en el arco rebajado cargado con los cilindros: a) Posición 8, b) Posición 13, c) Posición 16 y d) Posición 18.



a)



b)



c)



d)

Figura 5.23. Resumen de las posiciones de los sensores en el arco de medio punto cargado con los cilindros: a) Posición 1, b) Posición 4, c) Posición 8 y d) Posición 14.

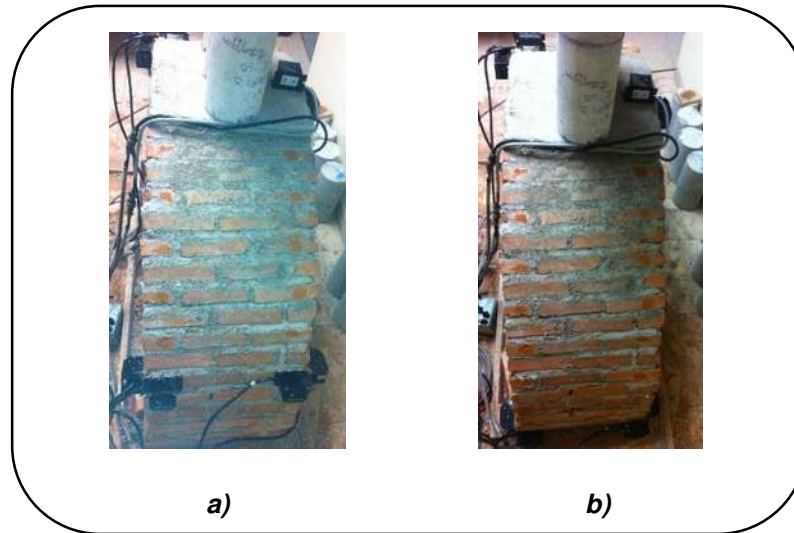


Figura 5.24. Resumen de las posiciones de los sensores en el arco de medio punto cargado con los cilindros: a) Posición 18 y b) Posición 20.

Finalmente se realizó un último registro sin la masa de los cilindros (cinco minutos de registro en posiciones de las Figuras 5.14 y Figura 5.20), el proceso de registro de vibración ambiental es el mismo que se describe para los elementos sin daño (ver Figura 5.25, Figura 5.26, Figura 5.27 y Figura 5.28). Esto se hizo con el fin de apreciar si en el método propuesto hay alguna variación en la identificación del daño por el efecto de la presencia de la masa adicional.

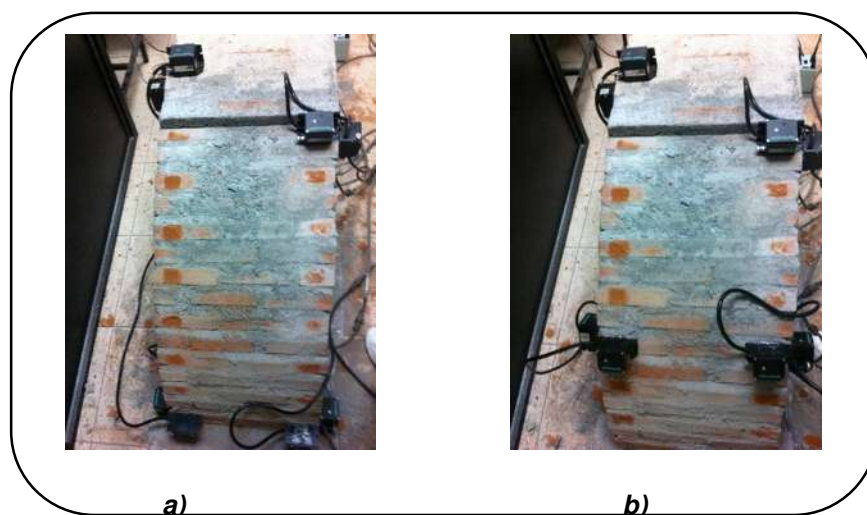


Figura 5.25. Resumen de las posiciones de los sensores en el arco rebajado después de la carga con los cilindros: a) Posición 1 y b) Posición 4.

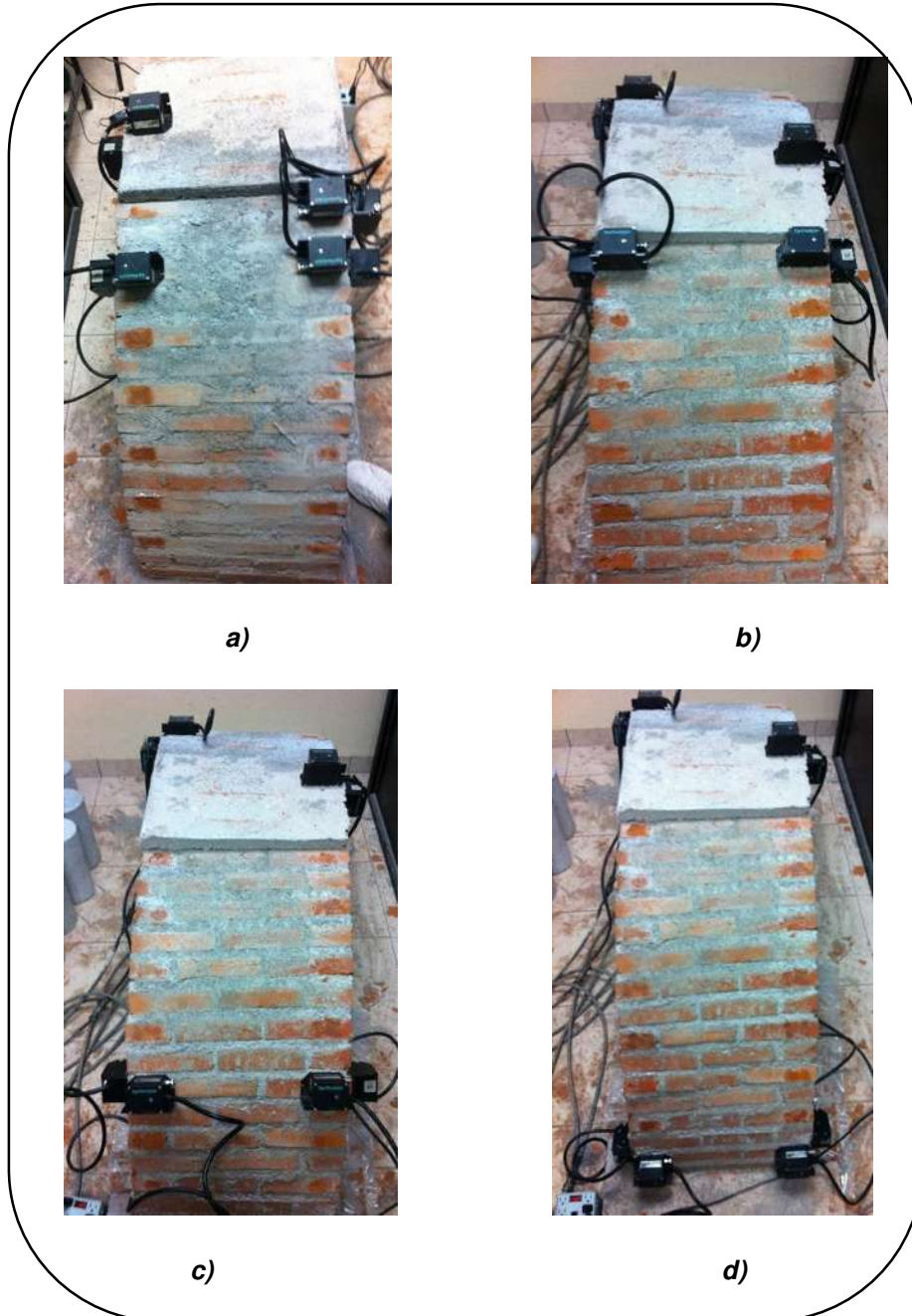


Figura 5.26. Resumen de las posiciones de los sensores en el arco rebajado después de la carga con los cilindros: a) Posición 7, b) Posición 11, c) Posición 15 y d) Posición 18.

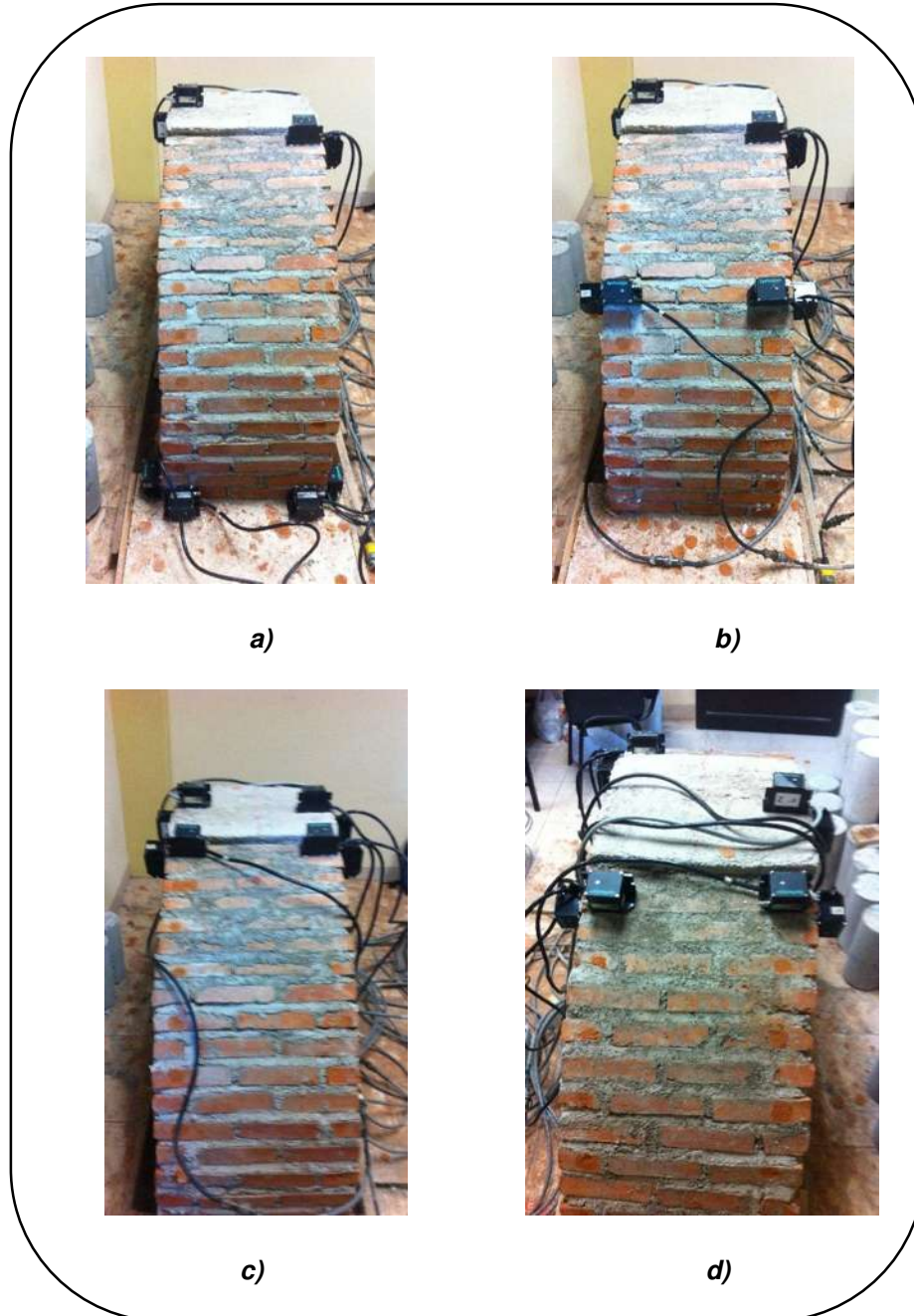


Figura 5.27. Resumen de las posiciones de los sensores en el arco de medio punto después de la carga con los cilindros: a) Posición 1, b) Posición 6, c) Posición 10 y d) Posición 13.

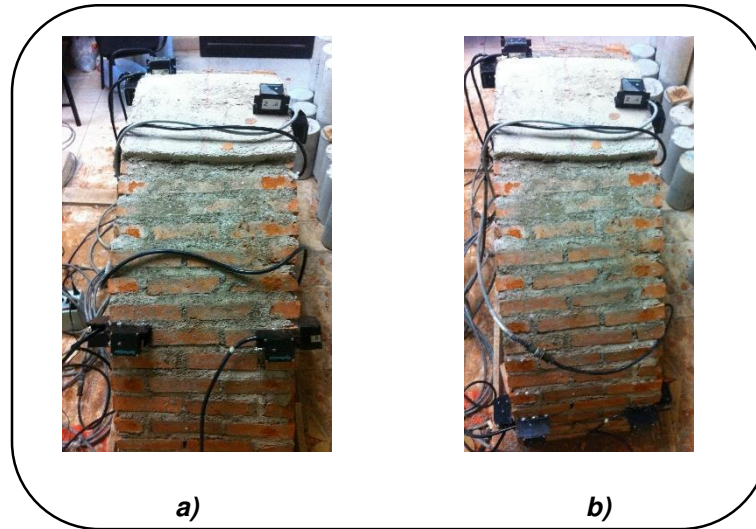


Figura 5.28. Resumen de las posiciones de los sensores en el arco de medio punto después de la carga con los cilindros: a) Posición 16 y b) Posición 19.

Para poder emplear el método de detección de daño es necesario contar con tres características de los elementos estudiados, las cuales son masa, frecuencia natural y amplitud modal. La primera se puede obtener mediante volúmenes tributarios (ver Tabla 1 y Tabla 2), las masas deben de coincidir con las posiciones de los sensores (ver Figura 5.29 y Figura 5.30) y las frecuencias y amplitudes modales se obtuvieron con la técnica FDD descrita en el capítulo 4 usando el software ARTeMIS Extractor (ver Figura 5.31 a Figura 5.36).

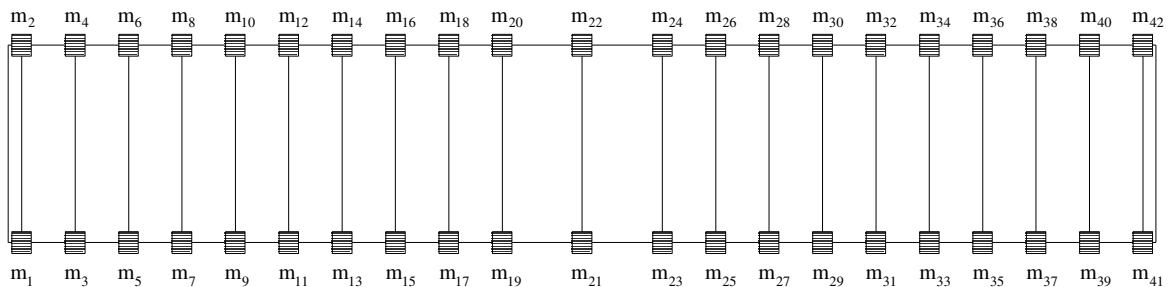


Figura 5.29. Concentración y distribución de masas para el análisis del método de detección de daño para el arco de medio punto.



Tabla 1. Valor numérico correspondiente a cada masa concentrada del arco de medio punto.

| NÚMERO | MASA (KG*S ² /M) |
|--|--------------------------------|
| m_1, m_2, m_{43}, m_{44} | 0.221387615 |
| m_{21} y m_{22} | 0.576949541 |
| m_3 a m_{20} y m_{23} a m_{42} | 0.295183486 |

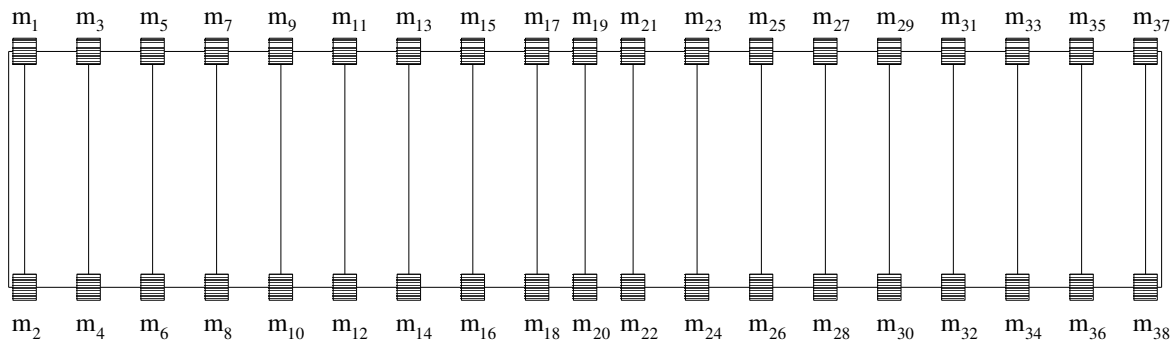


Figura 5.30. Concentración y distribución de masas para el análisis del método de detección de daño para el arco rebajado.

Tabla 2. Valor numérico correspondiente a cada masa concentrada del arco rebajado.

| NÚMERO | MASA (KG*S ² /M) |
|--|--------------------------------|
| m_1, m_2, m_{37}, m_{38} | 0.221387615 |
| m_{19} y m_{20} | 0.147591743 |
| m_3 a m_{18} y m_{21} a m_{38} | 0.295183486 |

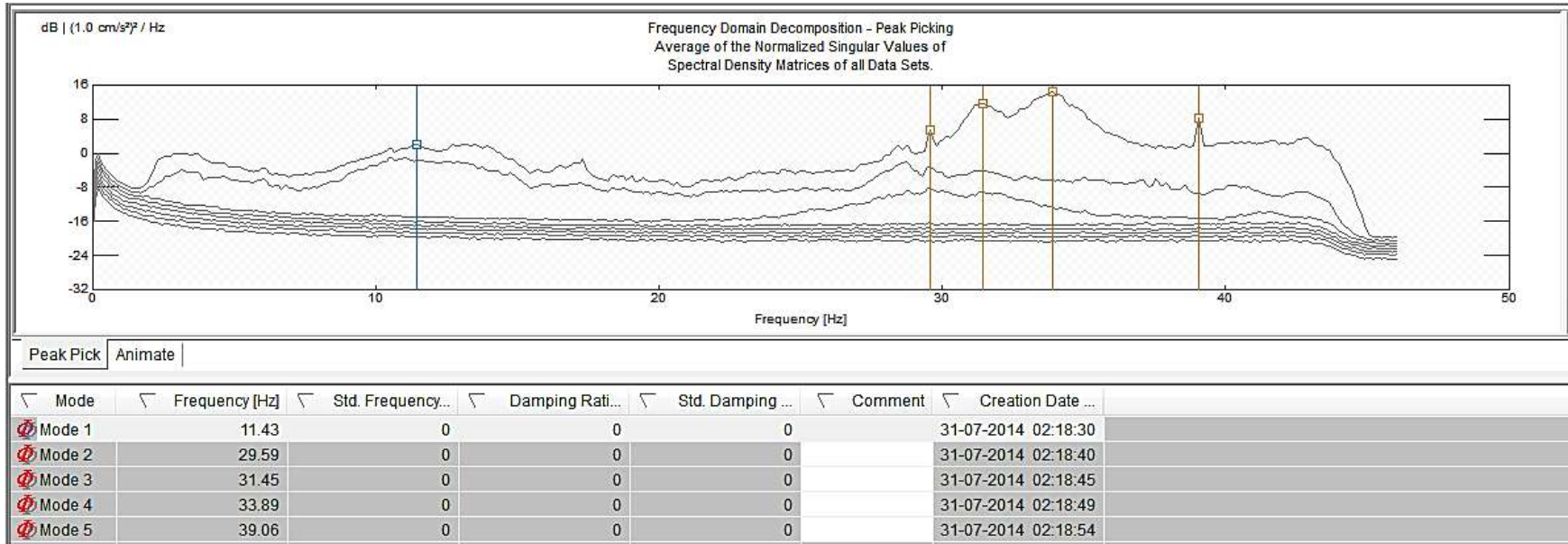


Figura 5.31. Grafico del software ARTEMIS Extractor para obtener las frecuencias del arco rebajado sin daño.

Tabla 3. Modos de vibrar y frecuencias del arco rebajado sin daño.

| MODDO | FRECUENCIA (Hz) |
|-------|-----------------|
| 1 | 11.43 |
| 2 | 29.59 |
| 3 | 31.45 |
| 4 | 33.89 |
| 5 | 39.06 |

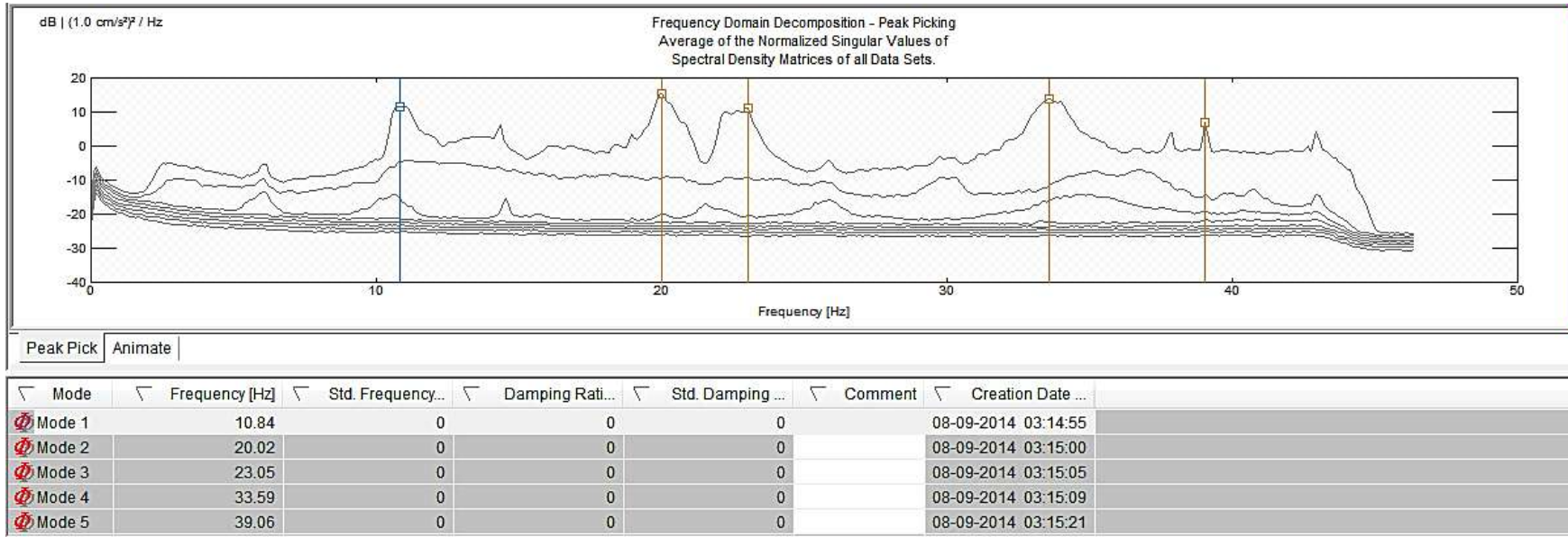


Figura 5.32. Grafico del software ARTeMIS Extractor para obtener las frecuencias del arco rebajado dañado (con masa adicional).

Tabla 4. Modos de vibrar y frecuencias del arco rebajado dañado (con masa adicional).

| MODDO | FRECUENCIA (HZ) |
|-------|-----------------|
| 1 | 10.84 |
| 2 | 20.02 |
| 3 | 23.05 |
| 4 | 33.59 |
| 5 | 39.06 |

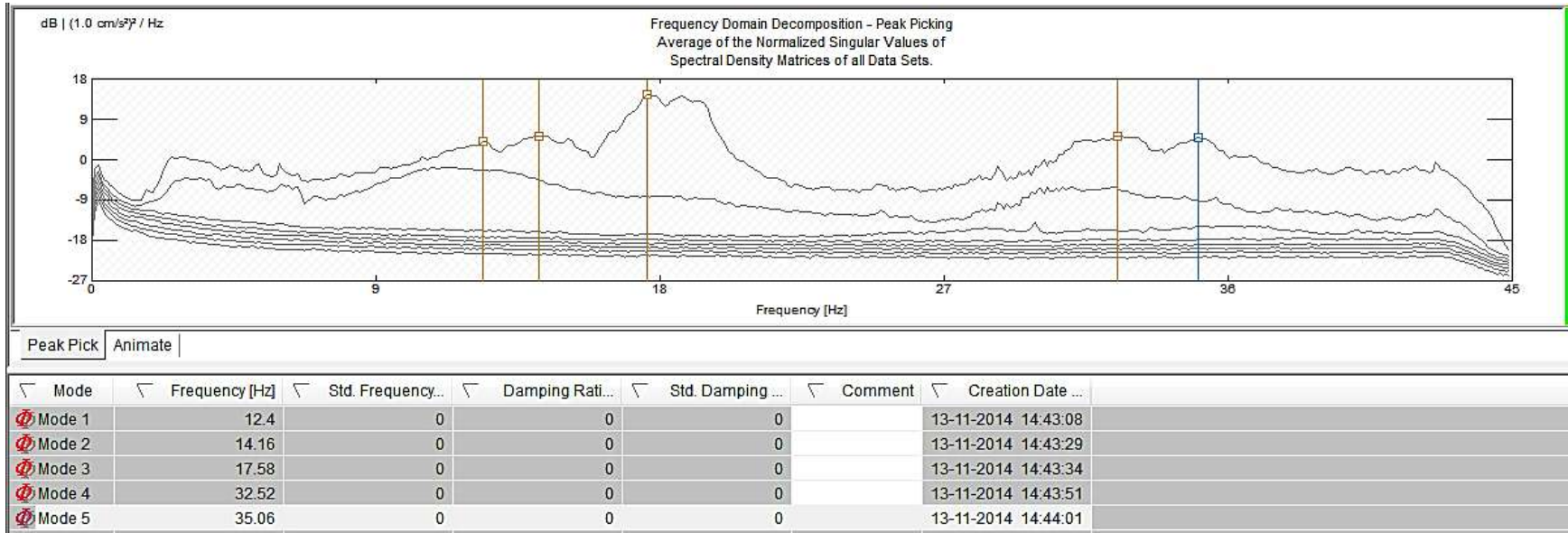


Figura 5.33. Grafico del software ARTEMIS Extractor para obtener las frecuencias del arco rebajado dañado (sin masa adicional).

Tabla 5. Modos de vibrar y frecuencias del arco rebajado dañado (sin masa adicional).

| MODDO | FRECUENCIA (HZ) |
|-------|-----------------|
| 1 | 12.4 |
| 2 | 14.16 |
| 3 | 17.58 |
| 4 | 32.52 |
| 5 | 35.06 |

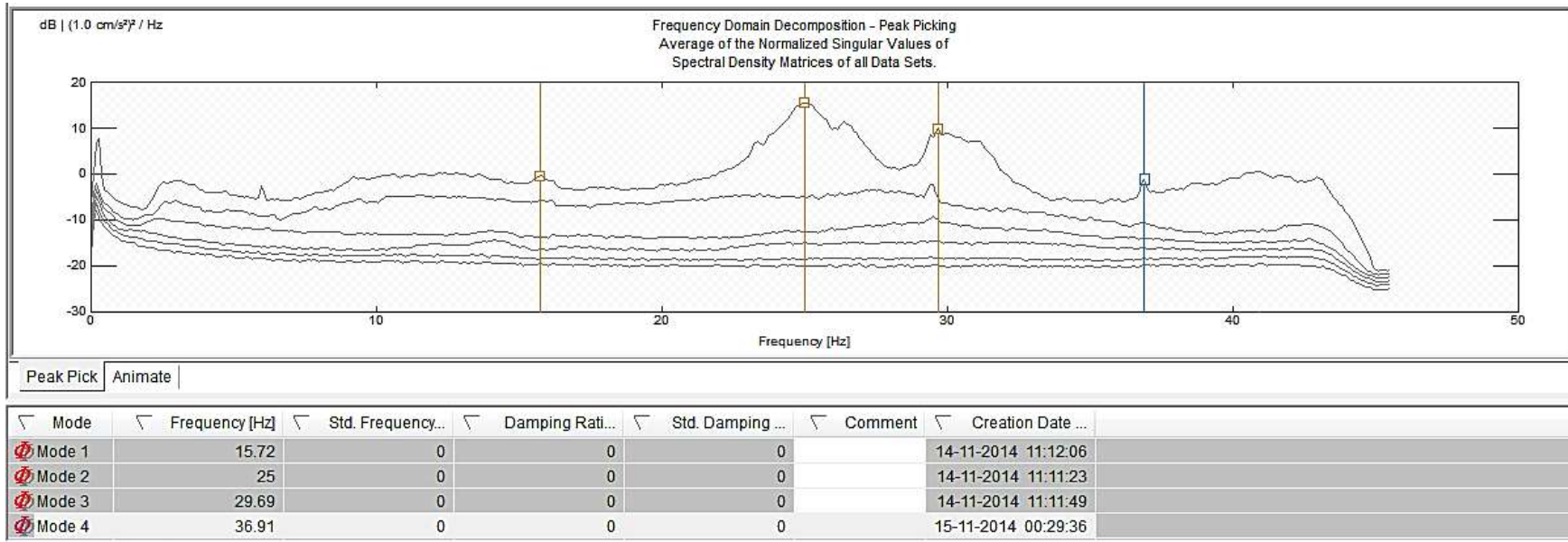


Figura 5.34. Grafico del software ARTEMIS Extractor para obtener las frecuencias del arco medio punto sin daño.

Tabla 6. Modos de vibrar y frecuencias del arco medio punto dañado sin daño.

| MODO | FRECUENCIA (Hz) |
|------|-----------------|
| 1 | 15.72 |
| 2 | 25.00 |
| 3 | 29.69 |
| 4 | 36.91 |

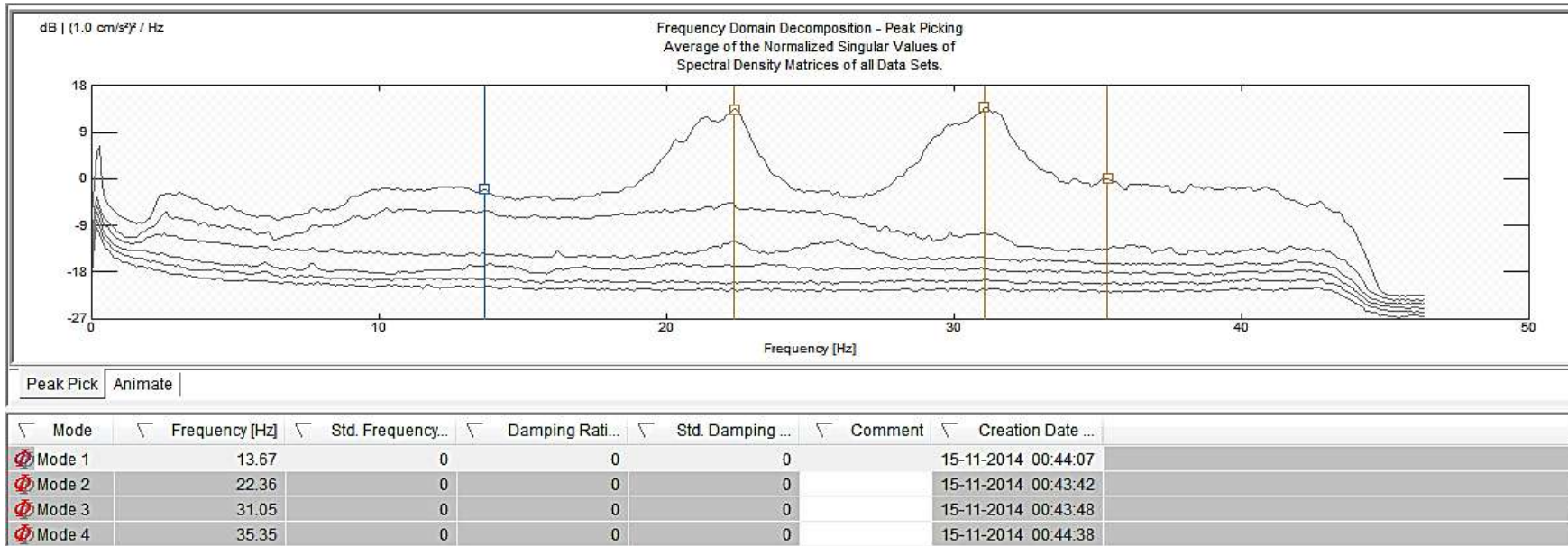


Figura 5.35. Grafico del software ARTEMIS Extractor para obtener las frecuencias del arco medio punto dañado (con masa adicional).

Tabla 7. Modos de vibrar y frecuencias del arco medio punto dañado (con masa adicional).

| MODO | FRECUENCIA (Hz) |
|------|-----------------|
| 1 | 13.67 |
| 2 | 22.36 |
| 3 | 31.05 |
| 4 | 35.35 |

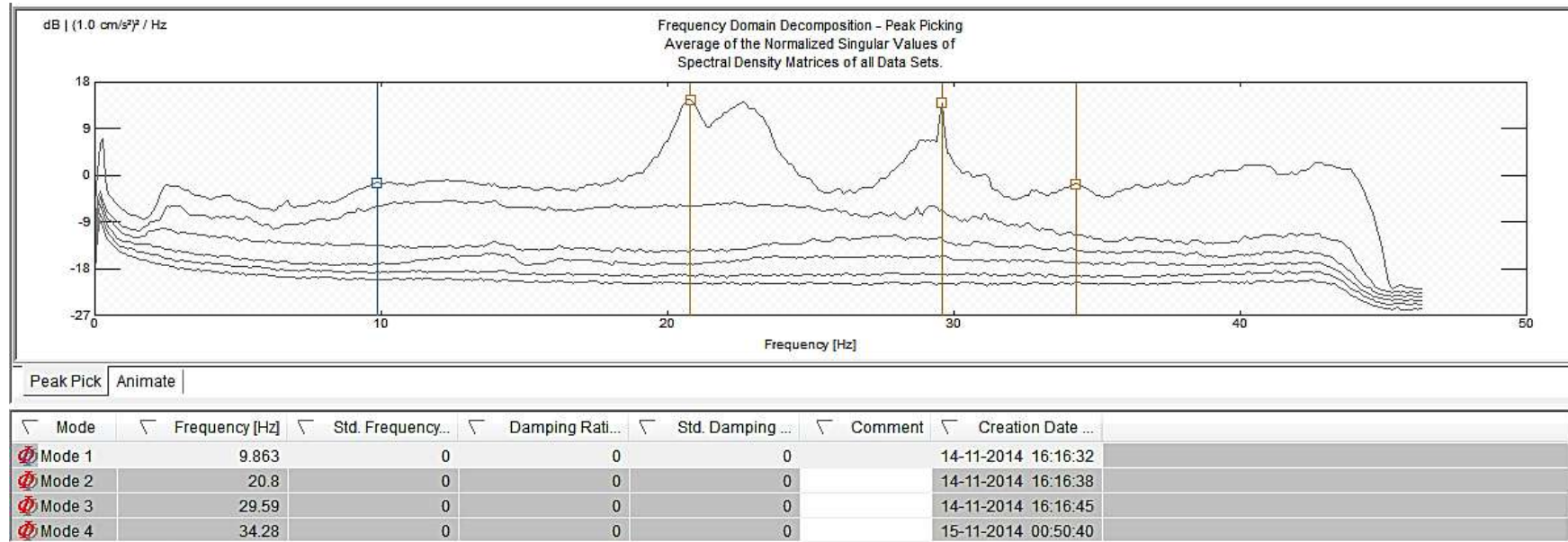



Figura 5.36. Grafico del software ARTeMIS Extractor para obtener las frecuencias del arco medio punto dañado (sin masa adicional).

Tabla 8. Modos de vibrar y frecuencias del arco medio punto dañado (sin masa adicional).

| MODDO | FRECUENCIA (HZ) |
|-------|-----------------|
| 1 | 9.863 |
| 2 | 20.8 |
| 3 | 29.59 |
| 4 | 34.28 |



Los valores de las amplitudes modales se obtienen del software ARTeMIS Extractor exportando los modos desde la opción File-Export-Modes-SVS Format o usando el icono SVS (), el cual arroja un archivo con cada uno de los modos de vibrar con sus frecuencias y sus respectivas amplitudes modales correspondientes a las masas de las Figura 5.29 y Figura 5.30. Debido a que se colocaron sensores en los bordes de los elementos se propuso tomar las amplitudes modales por líneas (Figura 5.37), para una mejor interpretación de los resultados en el método de identificación de daño.

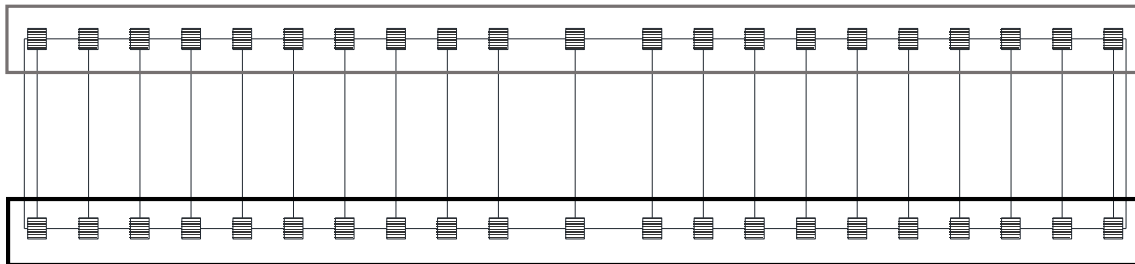


Figura 5.37. Los rectángulos indican las líneas que se tomaron para aplicar el método de detección del daño.

Una vez obtenidas las amplitudes modales de los elementos para cada uno de los casos que se estudiaron (sin daño, cargado y después de la carga), se tienen todos los elementos para poder aplicar el método de identificación planteado en el capítulo 4, para lo cual se decidió programar este método con la finalidad de tener una herramienta simple y rápida para la detección de daño.

Se realizó un programa que consta de un archivo ejecutable y unas hojas de Excel en las que se introducen los datos obtenidos en las mediciones, además se plasman operaciones y resultados. Los datos necesarios para el funcionamiento del programa son las masas, frecuencias y amplitudes modales que se escribirán cada uno en una diferente hoja del libro de Excel (no importando el orden de las hojas en el que estos se introduzcan), recordando que la matriz de masas y la matriz de frecuencias son matrices diagonales



como se planteó en el capítulo 2. Las hojas de Excel en las que se introducen la información de los elementos en su estado inicial y dañado son *Sin daño.xlsx* y *Con daño.xlsx* respectivamente, una vez que se tienen los datos en el menú de opciones del programa se selecciona el estado inicial (ver Figura 5.39) y se realizan los cálculos para ese estado (ver Figura 5.40), de igual forma se sigue el mismo procedimiento para el estado dañado (ver Figura 5.41).

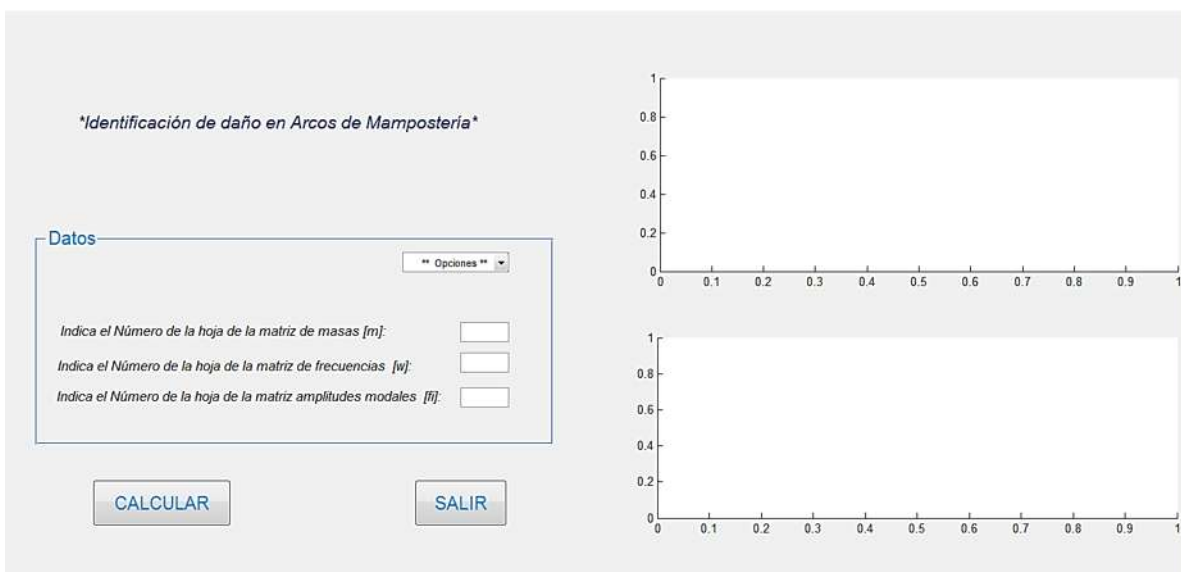


Figura 5.38. Programa para detección de daño en arcos de mampostería.

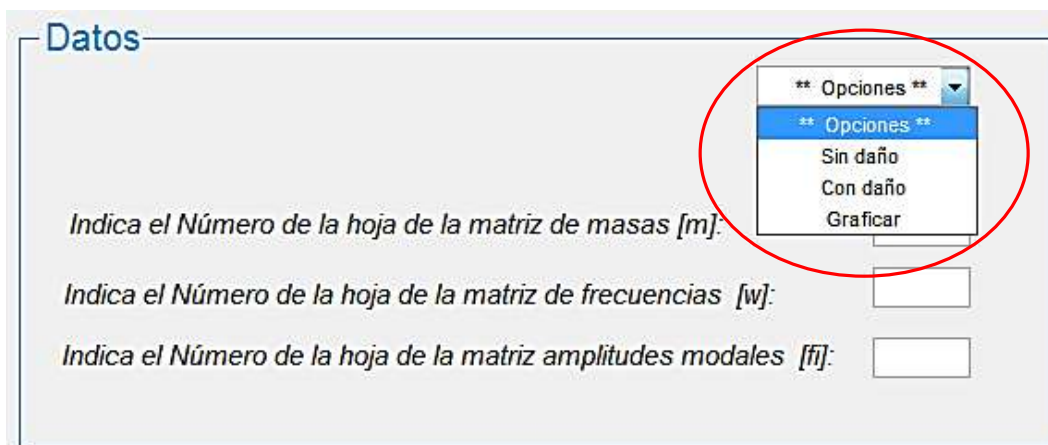


Figura 5.39. El círculo muestra el menú de opciones.

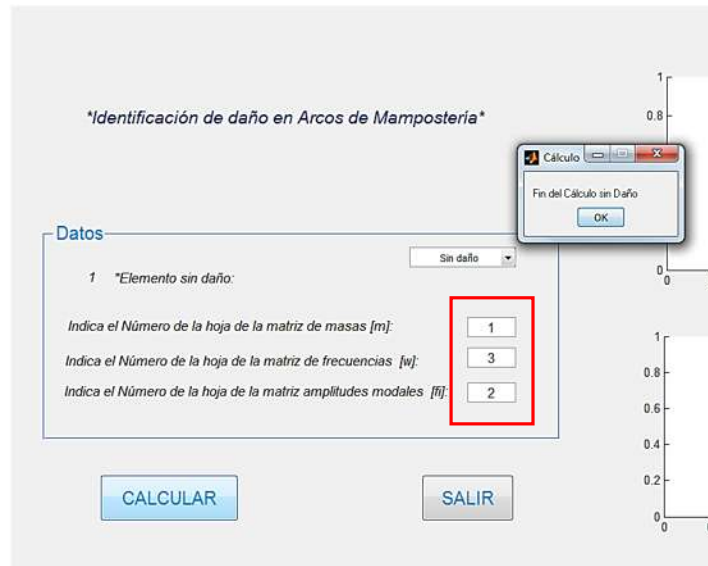


Figura 5.40. Programa después del cálculo para el estado sin daño, el recuadro muestra el número de la hoja donde se encuentra la información del libro *Sin daño.xlsx*.

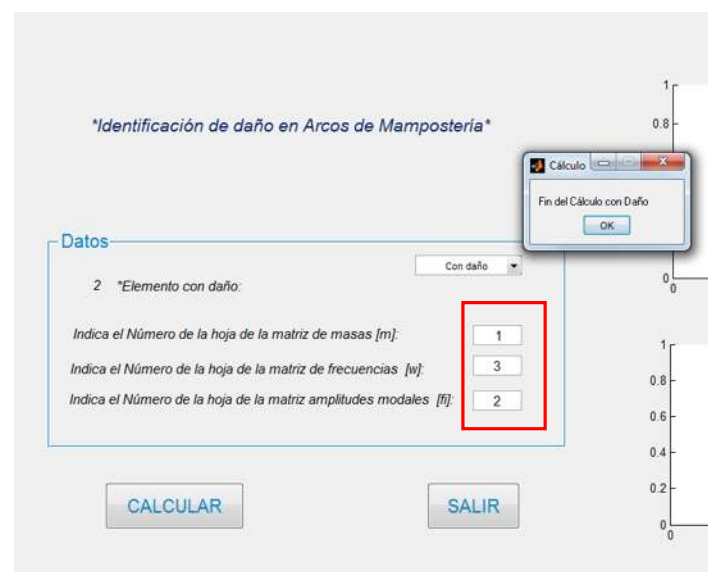


Figura 5.41. Programa después del cálculo para el estado dañado, el recuadro muestra el número de la hoja donde se encuentra la información del libro *Con daño.xlsx*.



Finalmente en el menú se elige la opción Graficar y con el botón “CALCULAR” se muestran los gráficos tanto de la rigidez como de la flexibilidad crudas (ver Figura 5.42) que se plantearon en el capítulo 4, siendo las amplitudes arriba o abajo del eje cero la zona donde se presentó el daño.

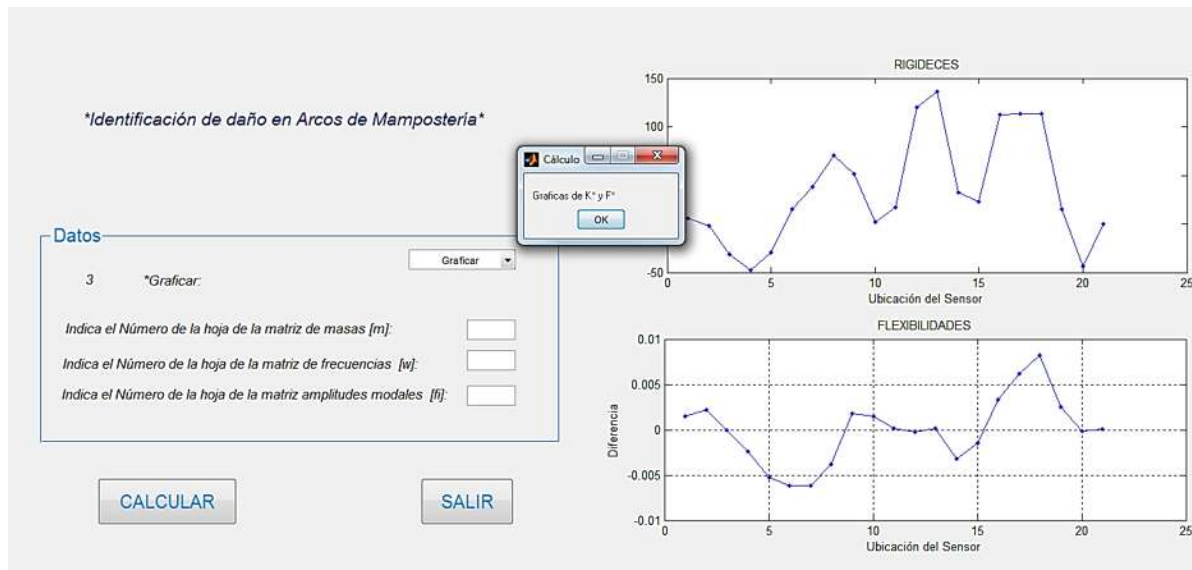


Figura 5.42. Resultado final del programa, los gráficos indican la conclusión del método de detección de daño.

Adicionalmente se tiene un libro de Excel con el nombre *Resultados.xlsx* en el que también se puede usar para graficar las matrices de rigidez y flexibilidad crudas, las cuales están en la hoja 1 y hoja 2 respectivamente, tomando solo la diagonal principal.

Para el caso del arco rebajado los resultados del método de detección de daño se presentaron como se puede observar en la Figura 5.45 a Figura 5.48, siendo este el caso donde la diferencia fue la del estado sin daño y dañado (con masa adicional) y en las Figuras 5.49 a Figura 5.52 las del caso del estado sin daño menos el dañado (sin masa adicional). Cada uno de ellos sobre las franjas planteadas de la Figura 5.37, para no crear un conflicto con la interpretación de los datos al momento de definir las posiciones donde se presentó el daño. Las posiciones de los sensores en las gráficas hacen referencia a la Figura 5.20.



Paralelamente se desarrolló un modelo analítico de los arcos estudiados, el análisis se realizó con elementos finitos en el rango elástico lineal para identificar las zonas en las que se presentan los mayores esfuerzos (ver Figura 5.45 y Figura 5.46), con la finalidad de contar con un parámetro con el cual se puedan tener un conocimiento previo del comportamiento esperado en los arcos estudiados, y así poderlos contrastar con los resultados obtenidos experimentalmente.

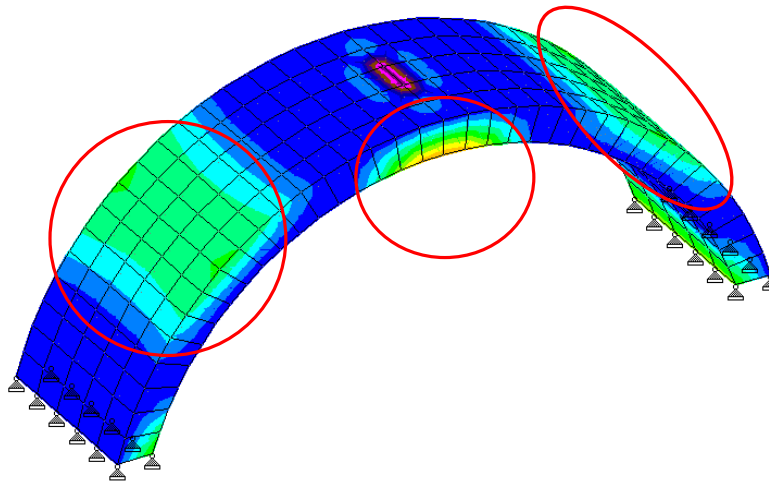


Figura 5.43. Modelo de elementos finitos del arco rebajado, los círculos indican las zonas de mayor esfuerzo.

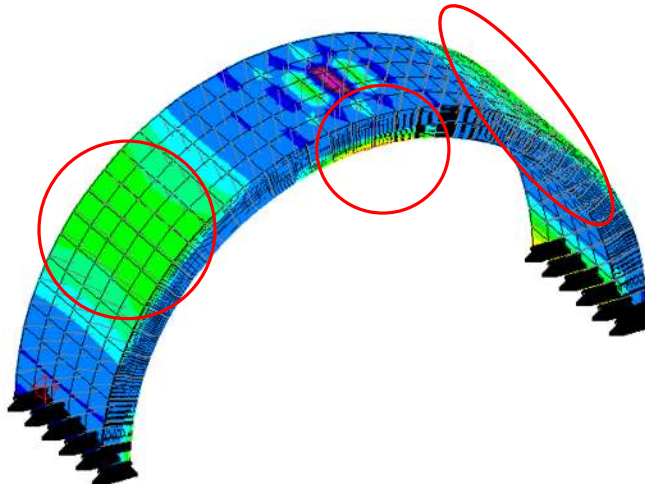


Figura 5.44. Modelo de elementos finitos del arco de medio punto, los círculos indican las zonas de mayor esfuerzo.



Las zonas en los modelos analíticos donde se muestran las concentraciones de esfuerzos representan la zona del arco donde se espera que el daño se presente. El estado de esfuerzos mostrado en las Figuras 5.45 y Figura 5.46 es el resultante de la aplicación de una carga (masa concentrada) al centro de la luz del arco, condición que también se estudió en los arcos construidos para la detección de daño experimental, y a continuación se muestran los resultados obtenidos experimentalmente aplicando el método de detección de daño presentado en el capítulo 4.

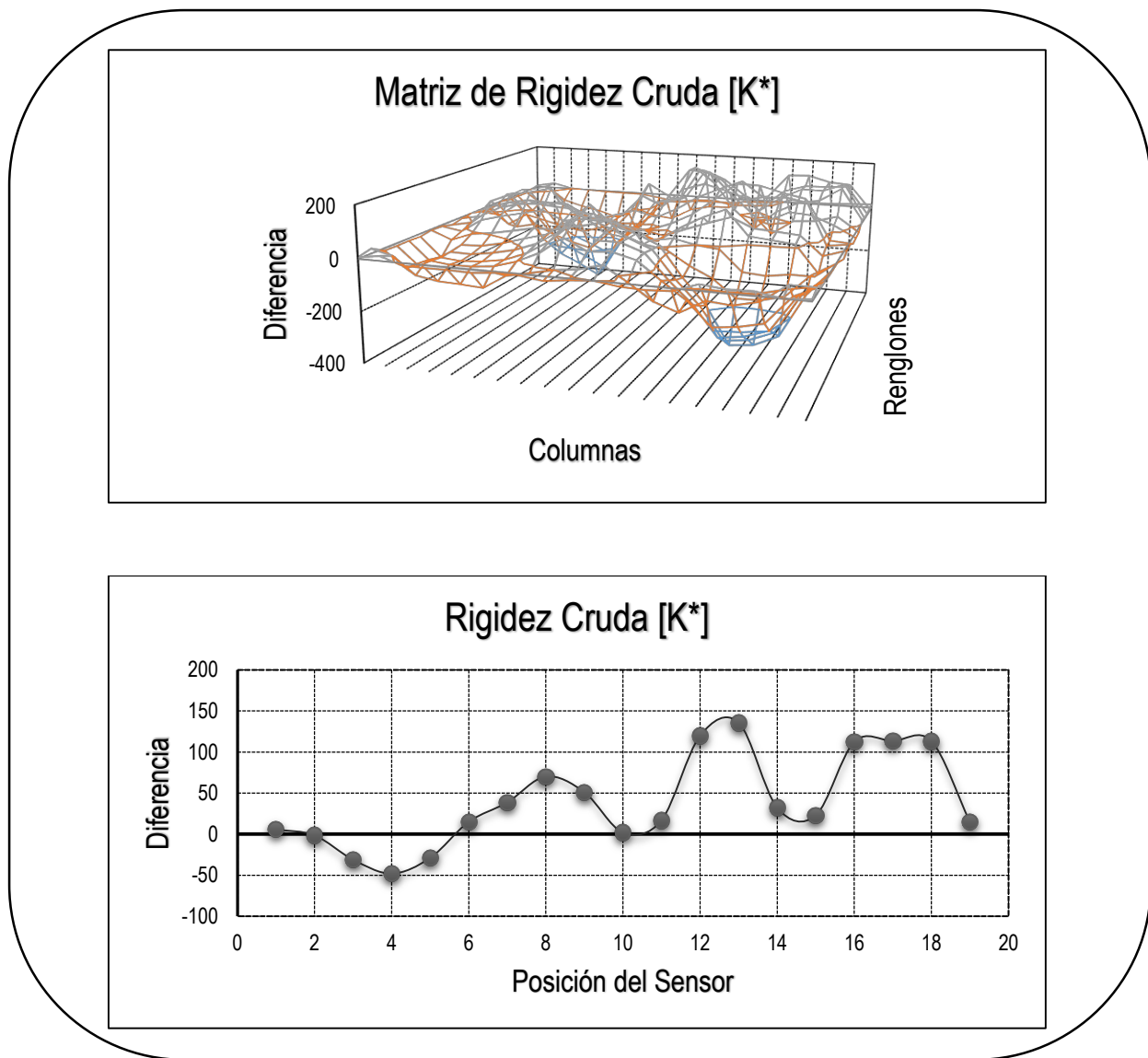


Figura 5.45. Detección de daño para la línea de masas pares de la Figura 5.30 del arco rebajado (con masa adicional).



Al comparar las zonas donde se concentran los esfuerzos en el modelo analítico de la Figura 5.43, y el gráfico de la diagonal principal de la matriz de rigidez cruda del arco rebajado con masa adicional correspondiente a la Figura 5.45, en las posiciones 4, 10 y 13, se observa que no es tan notoria la coincidencia con las zonas de las concentraciones de esfuerzos de la Figura 5.43, ya que en las posiciones 4, 16, 17 y 18 se aprecian unas amplitudes, los cuales no corresponden a las zonas dañadas.

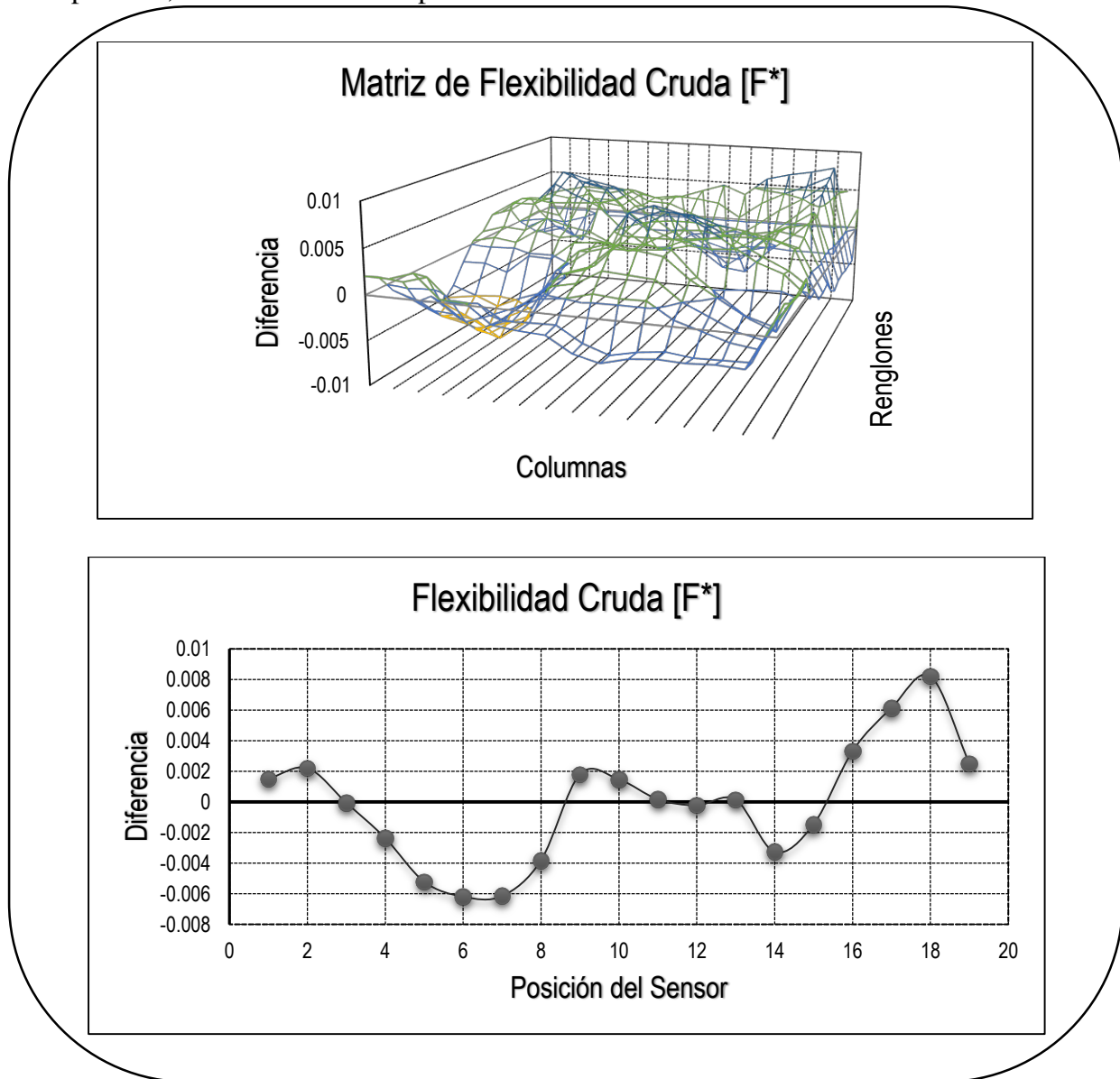


Figura 5.46. Detección de daño para la línea de masas pares de la Figura 5.30 del arco rebajado (con masa adicional).



Del gráfico de la diagonal principal de la matriz de flexibilidad cruda del arco rebajado con masa adicional correspondiente a la Figura 5.46, en las posiciones 6, 9 y 14, se observa que coinciden con las zonas donde se muestran las concentraciones de esfuerzos en la clave y los riñones en el arco del modelo analítico de la Figura 5.43, mientras que en la posición 2 y 18 las amplitudes no corresponden al daño en el arco.

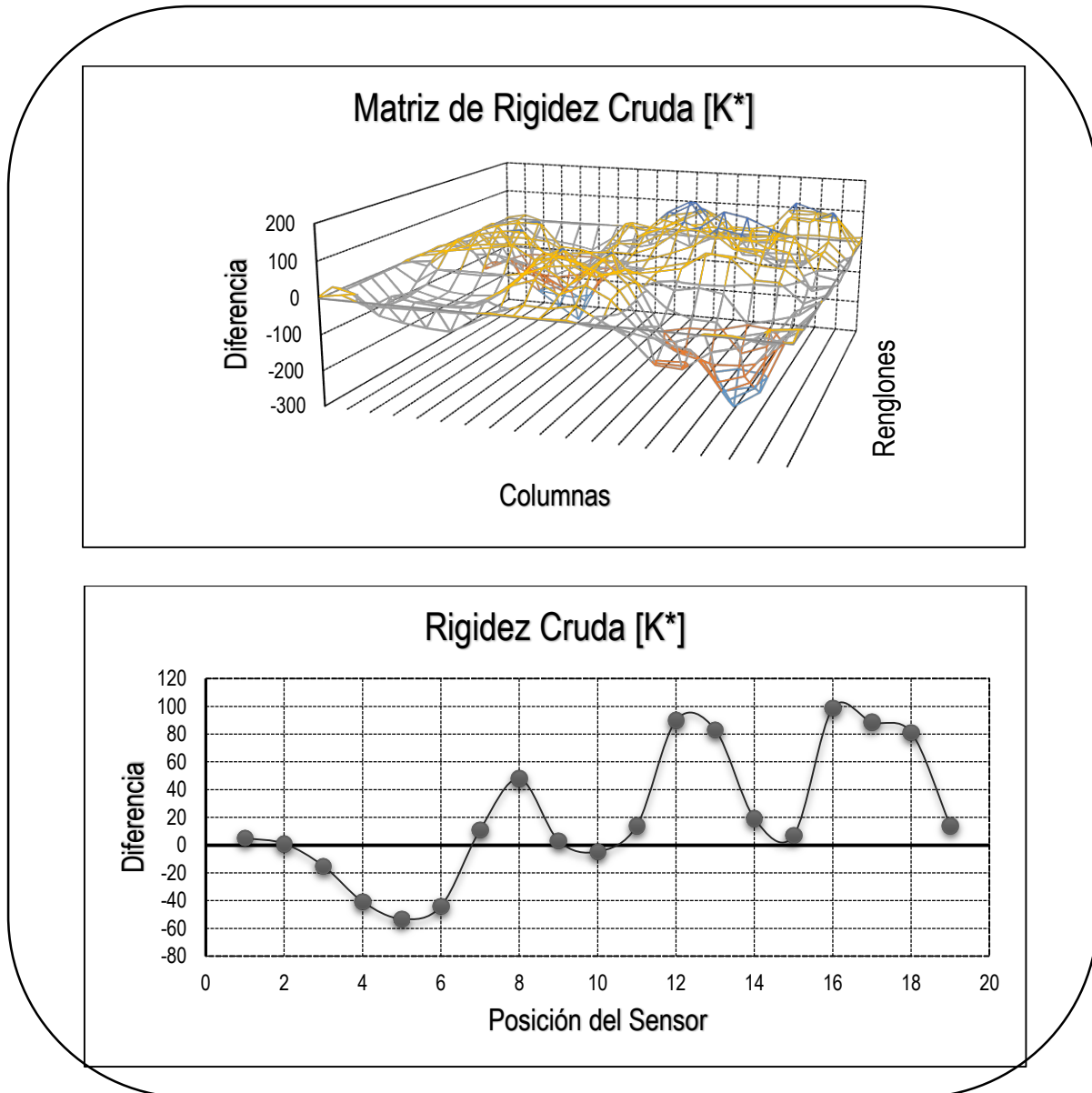


Figura 5.47. Detección de daño para la línea de masas impares de la Figura 5.30 del arco rebajado (con masa adicional).



En la Figura 5.47 que corresponde al gráfico de la diagonal principal de la matriz de rigidez cruda del arco rebajado con masa adicional, para las posiciones 8, 10 y 12, se observa que el daño corresponde a la zona del trasdós a diferencia del modelo analítico de la Figura 5.43 que se muestra en la clave y los riñones, en éste caso la matriz de rigidez cruda no funcionó de manera correcta para la detección del daño, debido a que las amplitudes en la posición 5, 16, 17 y 18 no corresponden a zonas dañadas.

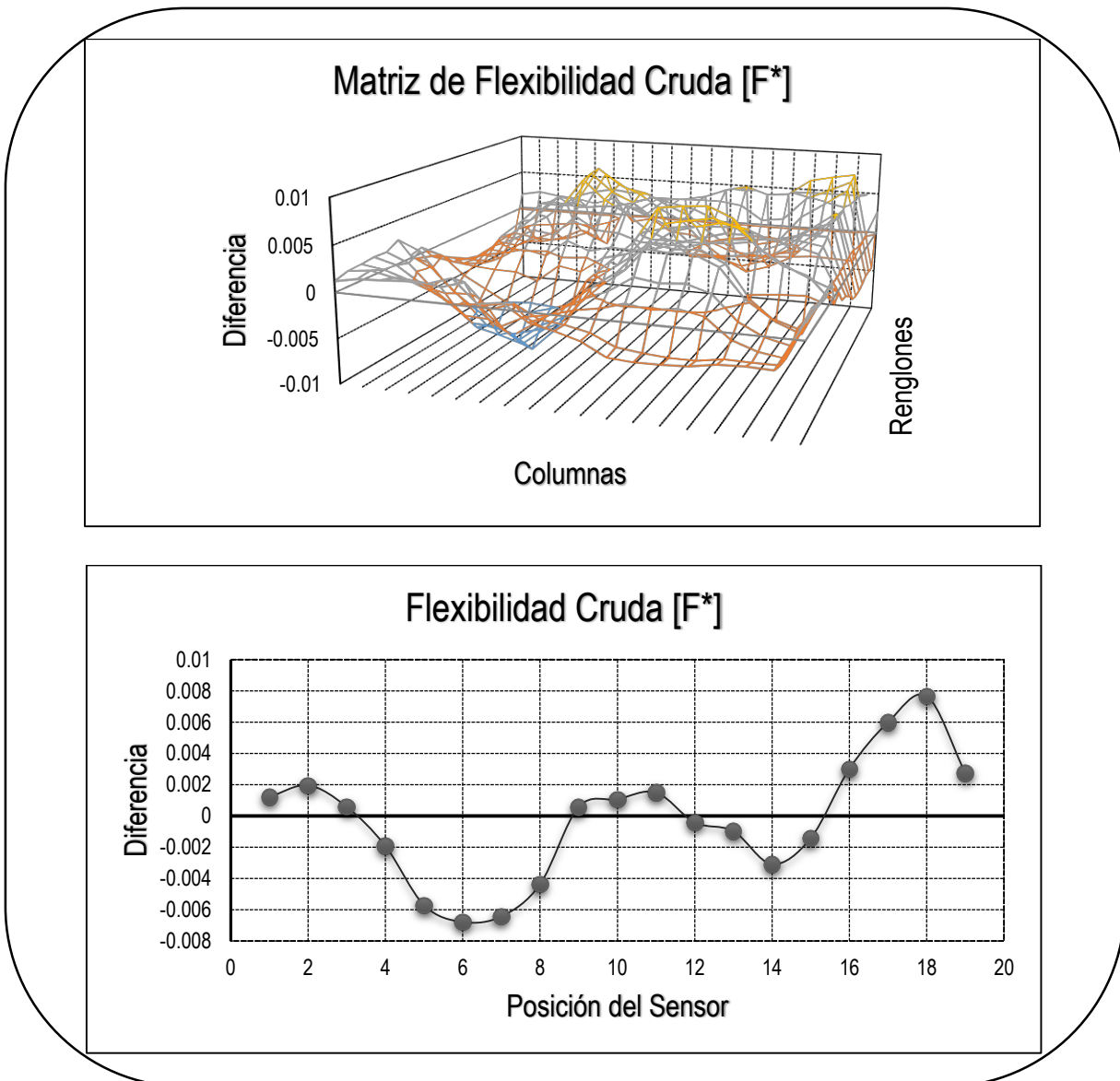


Figura 5.48. Detección de daño para la línea de masas impares de la Figura 5.30 del arco rebajado (con masa adicional).



En la Figura 5.48 se observa en las posiciones 6, 10 y 14, corresponde a la zona de daño en los riñones y clave al igual que el modelo analítico de la Figura 5.43, también se puede apreciar que en las posiciones 2 y 18 aparecen unas amplitudes que para este caso no representan daño, esto se debe al corte de las formas modales al llegar a los apoyos.

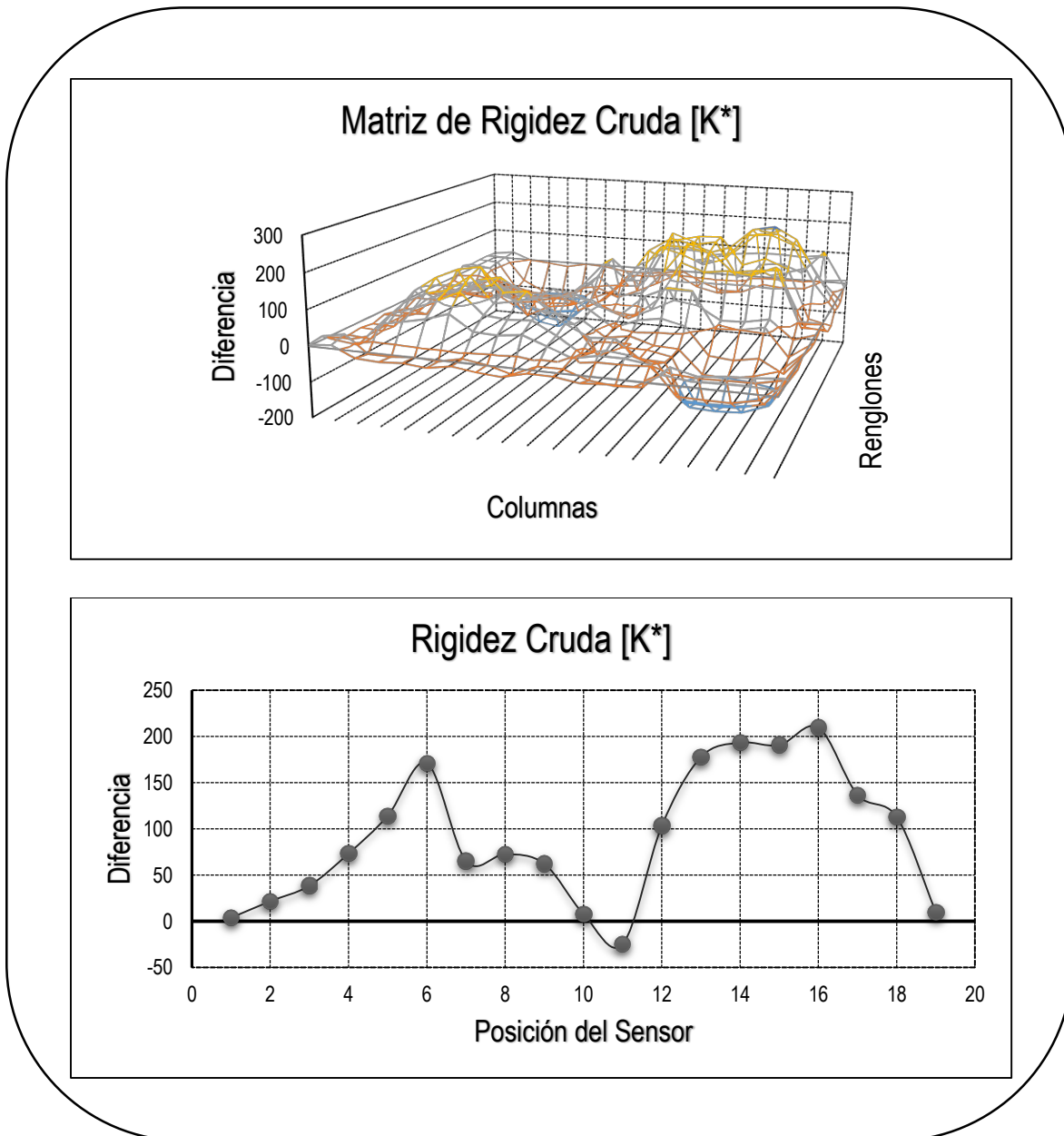


Figura 5.49. Detección de daño para la línea de masas pares de la Figura 5.30 del arco rebajado (sin masa adicional).



De la Figura 5.49 se observa en las posiciones 6, 10 y 14, una clara correspondencia con la zona de daño en los riñones y clave al igual que el modelo analítico de la Figura 5.43, para este caso la matriz de rigidez cruda presenta mejores resultados, ya que no se aprecia una correspondencia de las amplitudes con el daño en el arco.

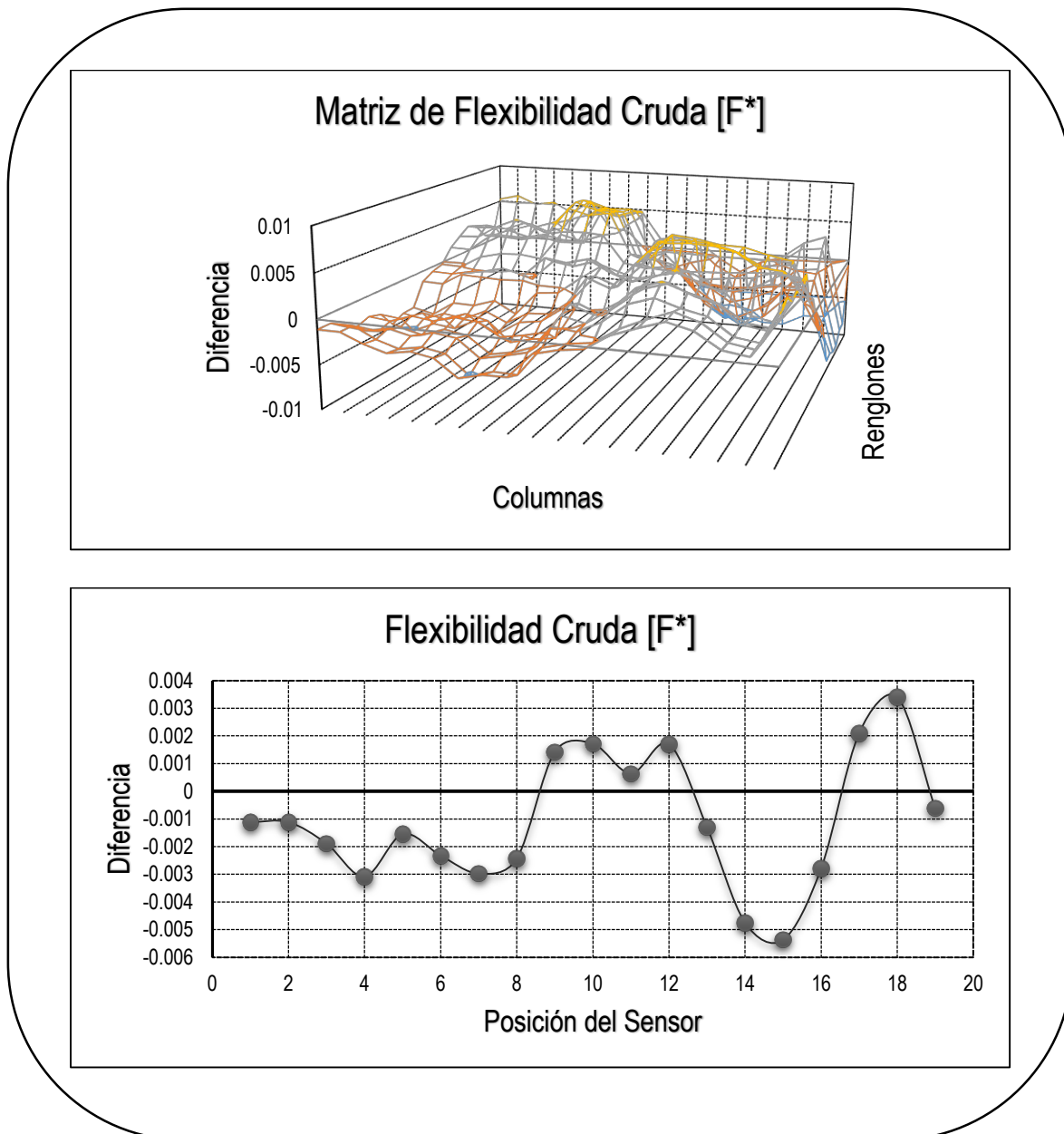


Figura 5.50. Detección de daño para la línea de masas pares de la Figura 5.30 del arco rebajado (sin masa adicional).



En el caso de la matriz de flexibilidad cruda de la Figura 5.50 se observa que los resultados no son los correspondientes al daño, debido a que la posición de las amplitudes no están definidas claramente y por lo tanto, no se pueden tomar como las pertinentes a la zona dañada.

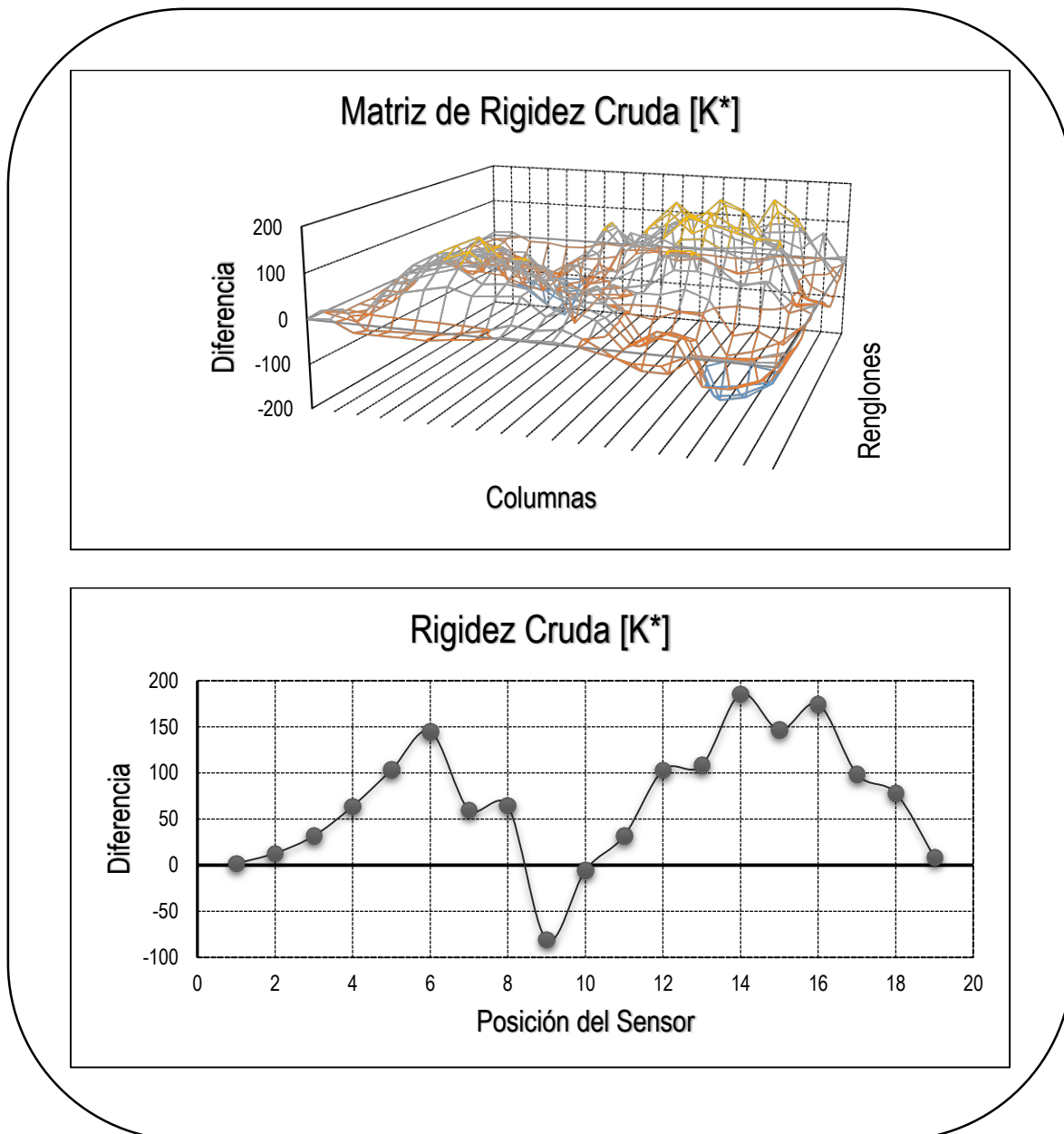


Figura 5.51. Detección de daño para la línea de masas impares de la Figura 5.30 del arco rebajado (con masa adicional).



Al igual que la Figura 5.49, la Figura 5.51 correspondiente a la matriz de rigidez cruda presenta buenos resultados, ya que las amplitudes definidas pertenecen a los riñones y clave del arco, correspondiéndose con las zonas de esfuerzos de la Figura 5.43.

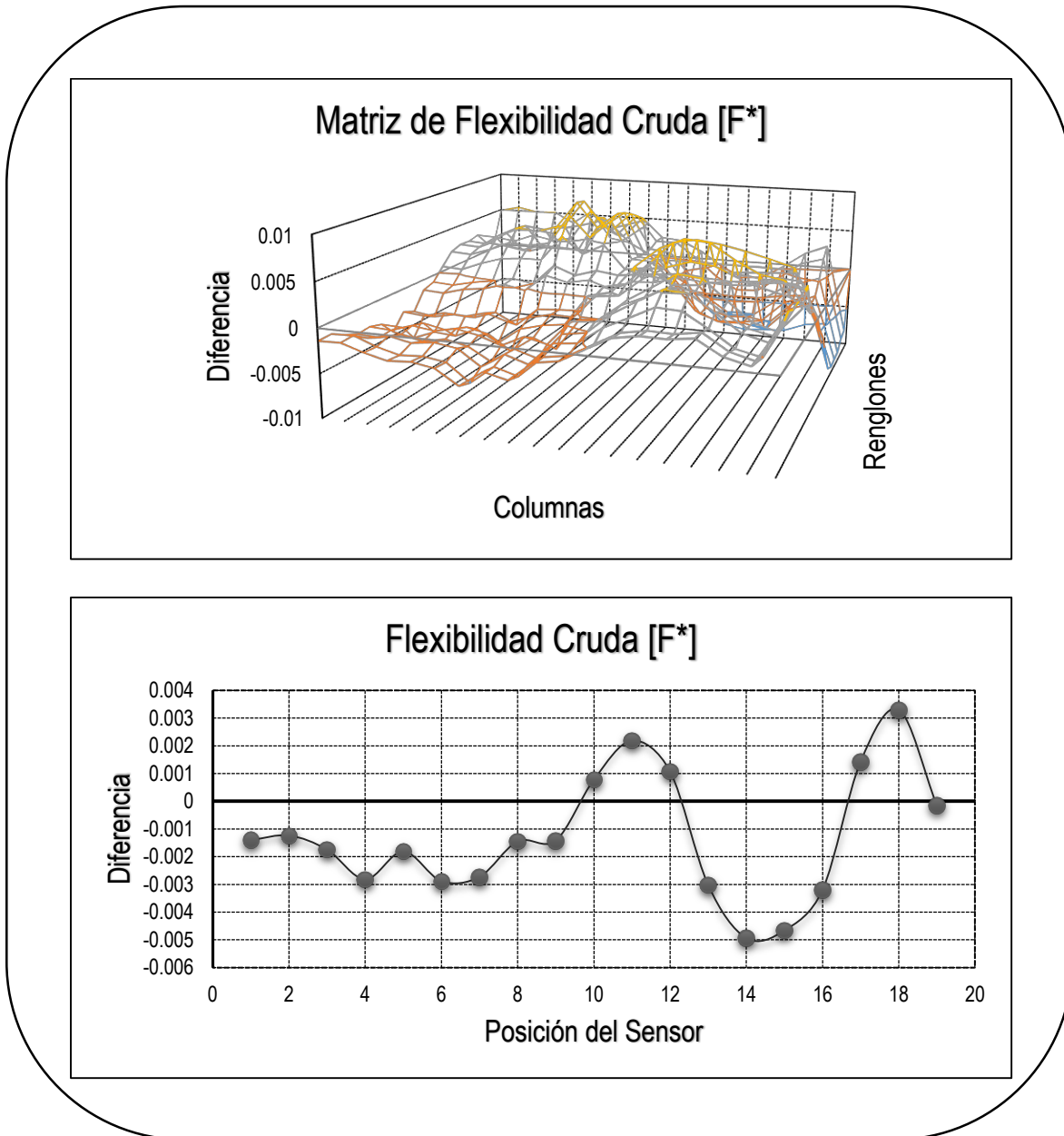


Figura 5.52. Detección de daño para la línea de masas impares de la Figura 5.30 del arco rebajado (con masa adicional).



Tomando de referencia los resultados del modelo analítico de la Figura 5.43, las gráficas que presentan los mejores resultados para el caso del arco rebajado (con masa adicional), corresponden a la *matriz de flexibilidad cruda* de la Figura 5.46 y Figura 5.48, mientras que para el caso del arco rebajado (sin masa adicional) los gráficos con las mejores amplitudes definiendo las zonas dañadas corresponden a los de la *matriz de rigidez cruda* de la Figura 5.49 y Figura 5.51, tal y como se puede apreciar en el resumen de la Figura 5.53 y las fotos de la Figura 5.54 y Figura 5.55 que conciernen a la zona dañada de los riñones del arco, mientras que la Figura 5.56 se encuentra en la zona de la clave.

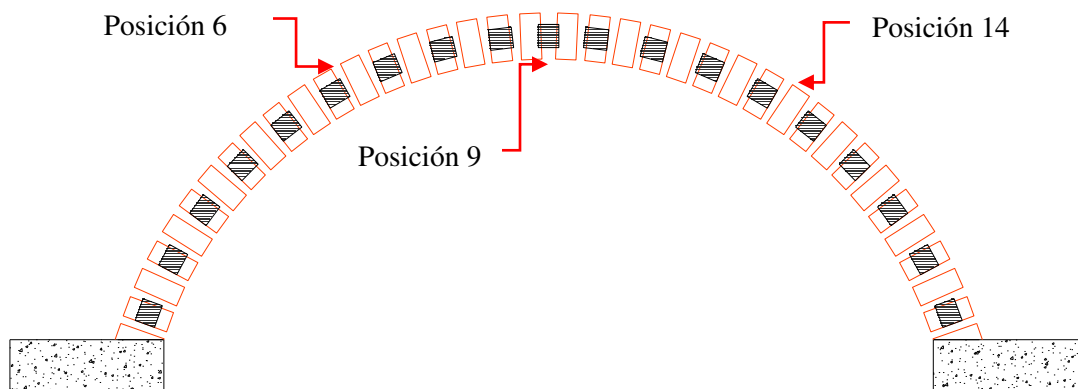


Figura 5.53. Resumen de las zonas del daño en el arco rebajado.

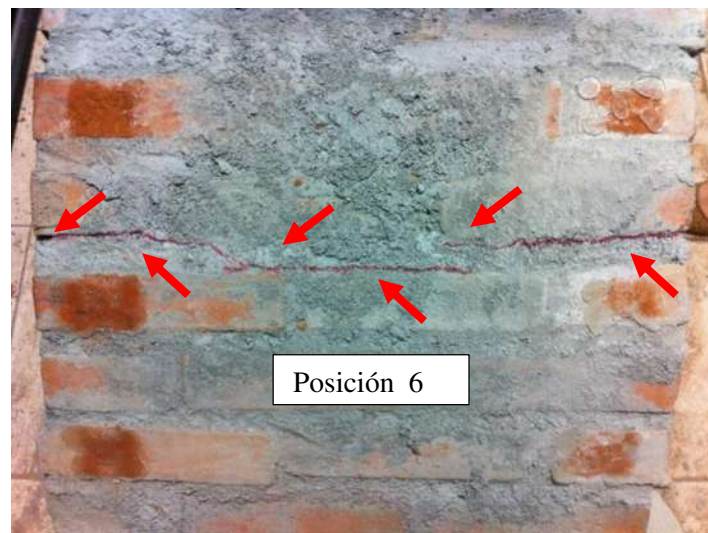


Figura 5.54. Zona del daño, Posición 6 de los sensores en la Figura 5.20.

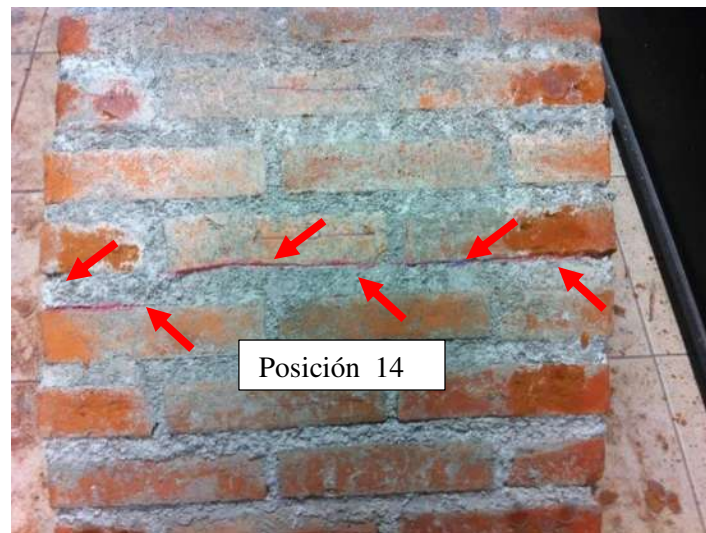


Figura 5.55. Zona del daño, Posición 14 de los sensores en la Figura 5.20.

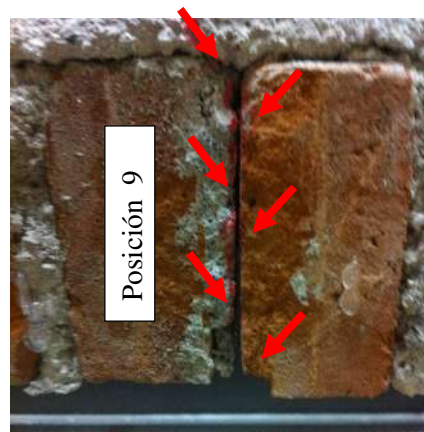


Figura 5.56. Zona del daño, Posición 9 de los sensores en la Figura 5.20.

Similarmente los resultados obtenidos en el método de detección de daño se pueden observar en las Figura 5.57 y Figura 5.58, que muestran el caso del arco de medio punto (con masa adicional) así como en las Figura 5.59 y Figura 5.60 donde se plasma el caso del arco de medio punto (sin masa adicional). Se observó que el resultado obtenido por el método de detección de daño no varía si se toma solo una de las líneas como se presentó en el caso anterior, por lo que para éste sistema se optó por tomar la línea de impares correspondiente a la Figura 5.29, debido a que se cambiaron los sensores en posición fija



en la línea de los pares de la Figura 5.29 localizada en la posición 9 de la Figura 5.14 los cuales estaban calibrados a una amplitud diferente. Las posiciones de los sensores en las gráficas para este arco hacen referencia a la Figura 5.14.

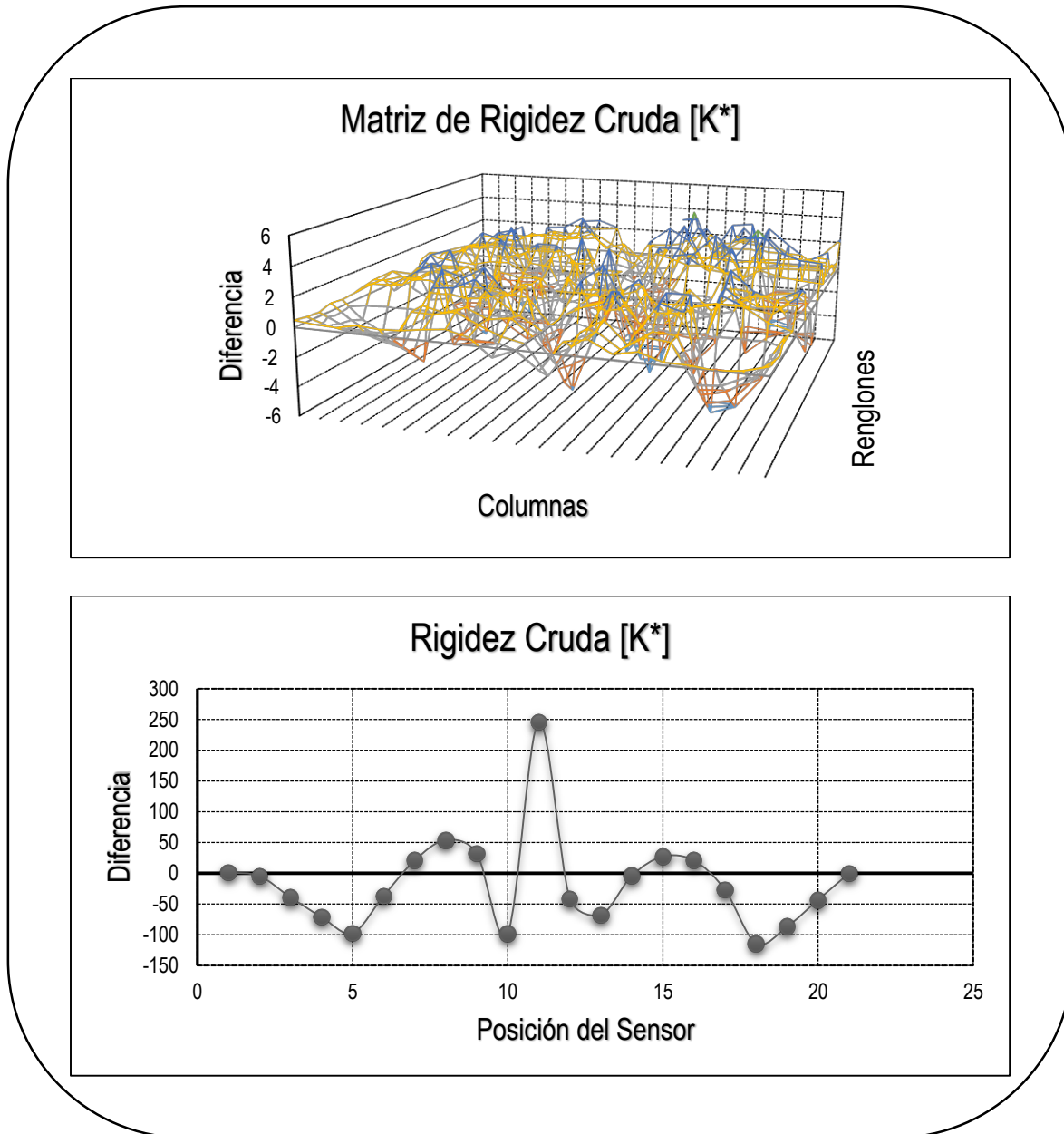


Figura 5.57. Detección de daño para la línea de masas impares de la Figura 5.29 del arco de medio punto (con masa adicional).



Los resultados en la Figura 5.57 correspondiente a la matriz de rigidez cruda no son tan claros, debido a que se observa un número de amplitudes mayor al que se esperaba de las concentraciones de esfuerzos de la Figura 5.44.

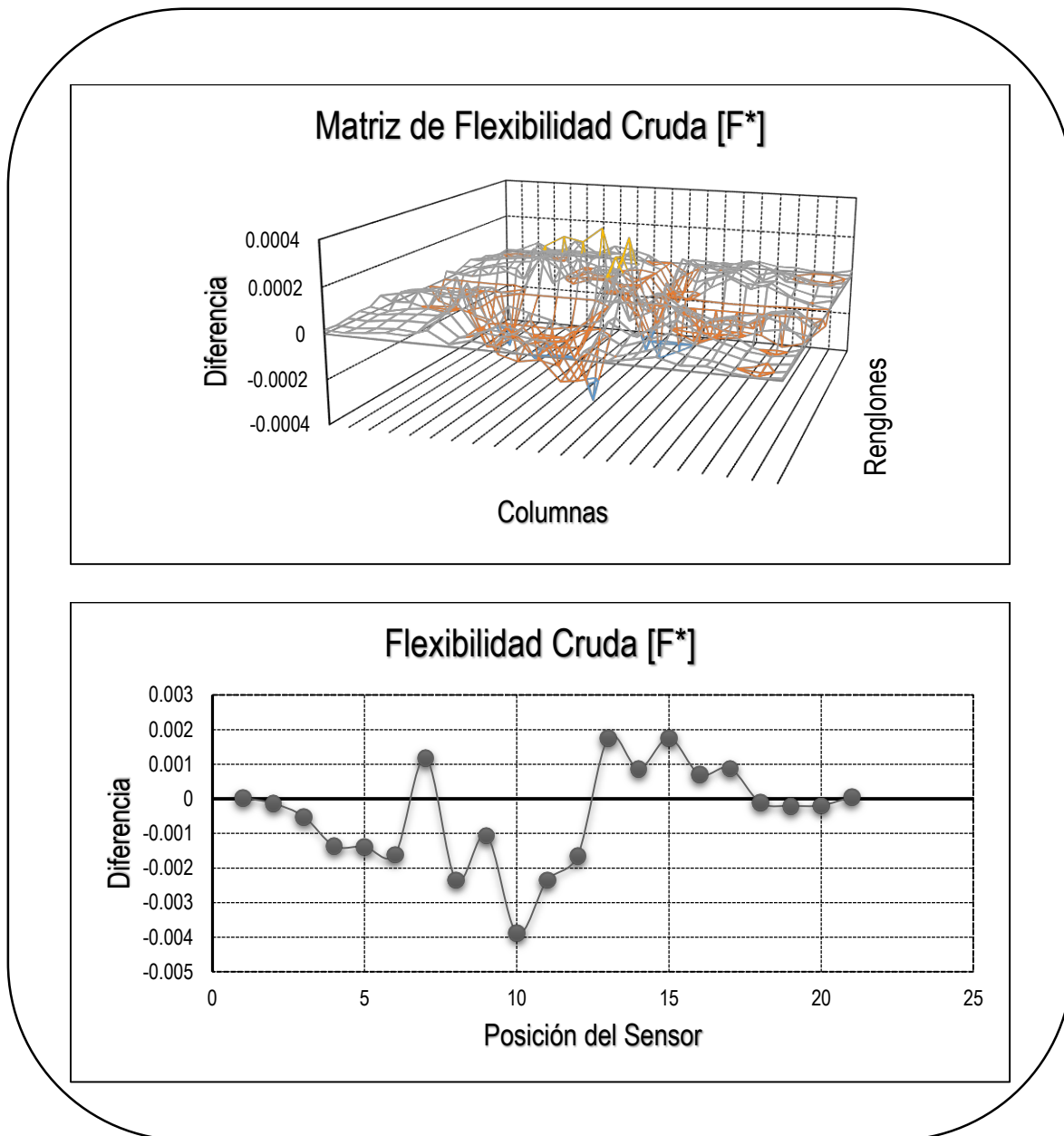


Figura 5.58. Detección de daño para la línea de masas impares de la Figura 5.29 del arco de medio punto (con masa adicional).



De la Figura 5.58 correspondiente a la matriz de flexibilidad cruda, se observa que las amplitudes de las posiciones 7, 10 y 15 corresponden a las zonas dañadas esperadas de las concentraciones de esfuerzos de la Figura 5.44.

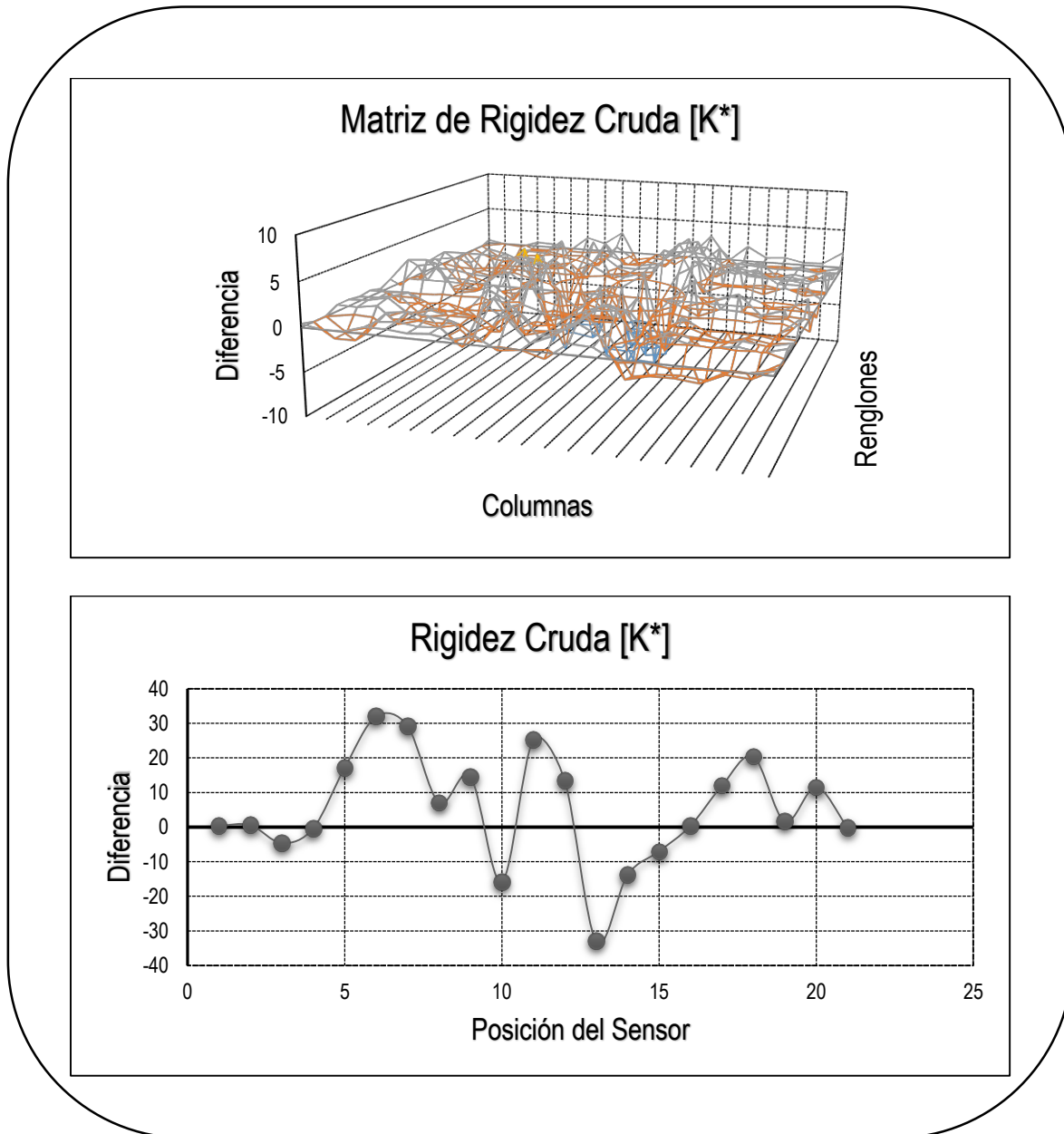


Figura 5.59. Detección de daño para la línea de masas impares de la Figura 5.29 del arco de medio punto (sin masa adicional).



De la Figura 5.59 que corresponde a la matriz de rigidez cruda, se aprecia que las amplitudes de las posiciones 6, 10 y 11 corresponden a una posición cercana a las zonas dañadas esperadas de las concentraciones de esfuerzos de la Figura 5.44, aunque en la posición 13 se observa una amplitud de la cual no se tiene la certeza si fue ocasionado por la presencia de un daño ocurrido al retirar la masa adicional.

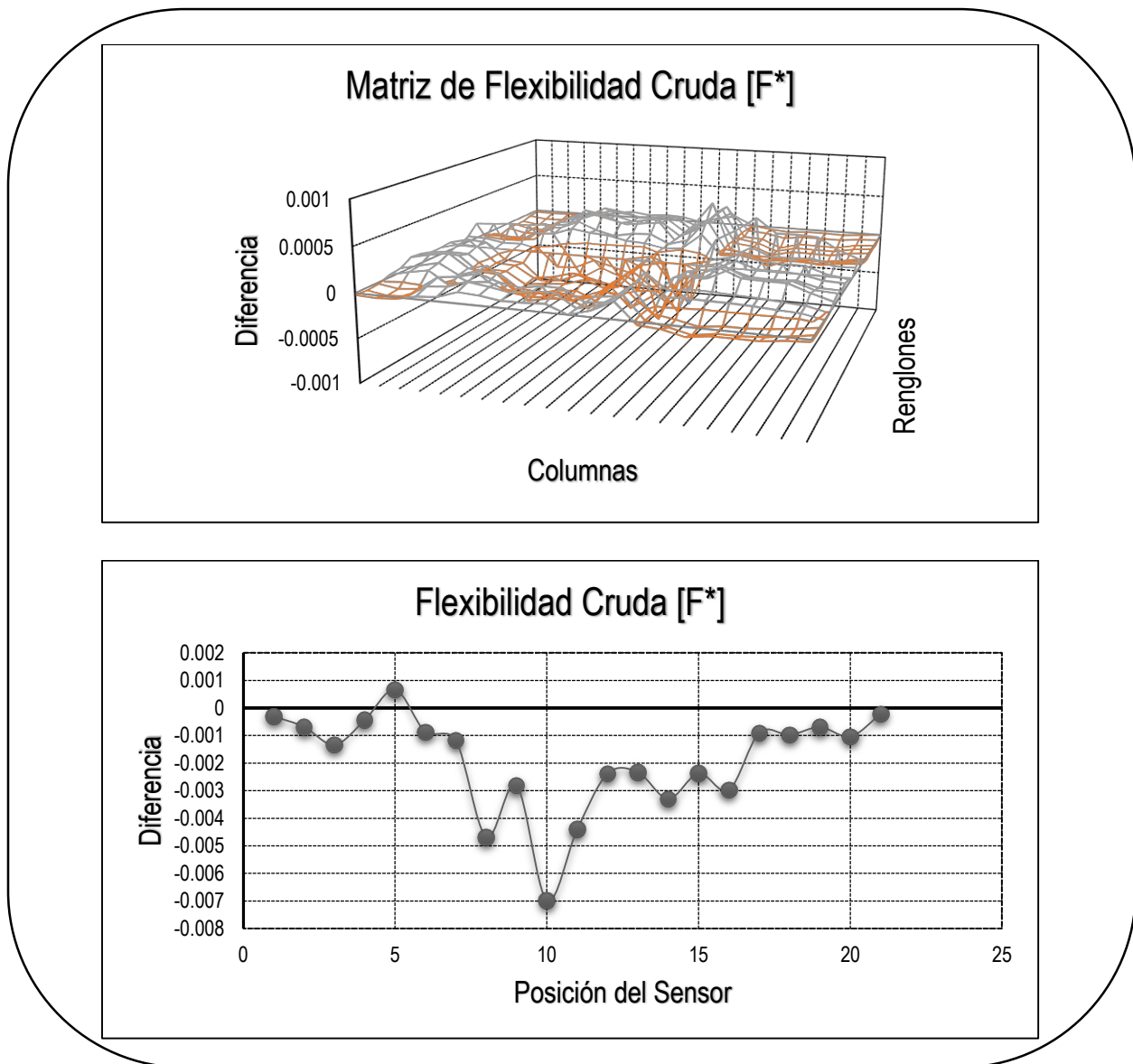


Figura 5.60. Detección de daño para la línea de masas impares de la Figura 5.29 del arco de medio punto (sin masa adicional).



En la Figura 5.60 que corresponde a la matriz de flexibilidad cruda, se observa que las amplitudes de las posiciones 5, 10 y 15 corresponden a una posición cercana a las zonas dañadas esperadas de las concentraciones de esfuerzos de la Figura 5.44, aunque las amplitudes en este gráfico se encuentran claramente definidos, ya que la amplitud de la posición 15 no cruza el eje correspondiente a las abscisas del valor 0.

En resumen de las gráficas de la Figura 5.57 y Figura 5.59 que corresponden a la *matriz de rigidez cruda*, fue la que presentó mejores resultados en la que corresponde al arco de medio punto *sin masa adicional*, mientras que Figura 5.58 y Figura 5.60 que compiten a la *matriz de flexibilidad cruda*, es la que cuenta con los mejores resultados es la correspondiente al arco de medio punto *con masa adicional*, donde las zonas de daño se localizan en los riñones y clave del arco que corresponden a la posición 7, posición 10 y la posición 13 (ver Figura 5.61). En la posición 7 y posición 13 el daño fue en el trasdós del arco (ver Figura 5.62 y Figura 5.63), mientras que en la posición 10 el daño se puede apreciar en intradós del arco (ver Figura 5.64).

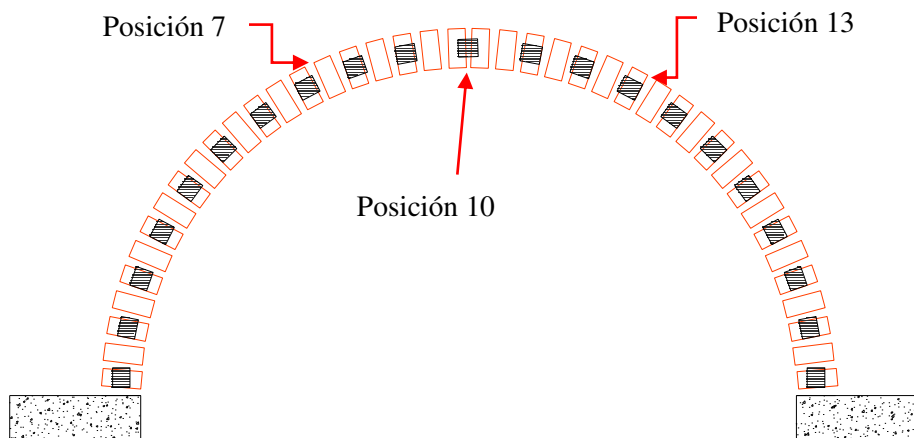


Figura 5.61. Resumen de las zonas del daño en el arco de medio punto.

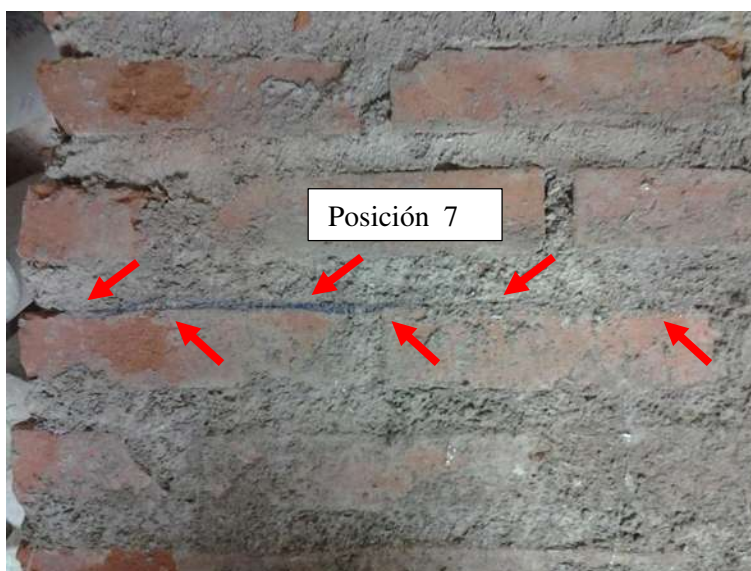


Figura 5.62. Zona del daño, Posición 7 de los sensores en la Figura 5.14.



Figura 5.63. Zona del daño, Posición 13 de los sensores en la Figura 5.14.

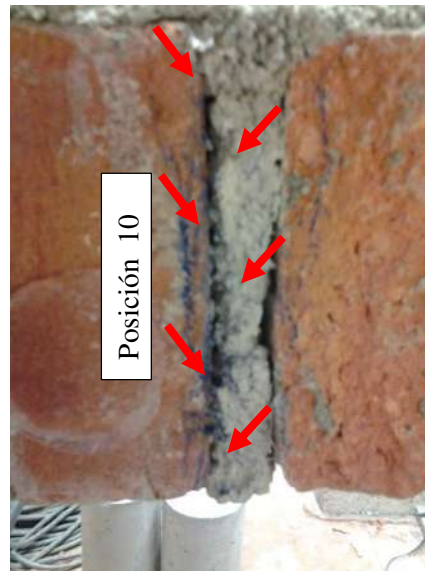


Figura 5.64. Zona del daño, Posición 10 de los sensores en la Figura 5.14.

Se observa que tanto los modelos analíticos como los experimentales coinciden al indicar las zonas donde se presenta el daño, además se identificó que las amplitudes mostradas al inicio y final de las posiciones de gráficos como los de las Figuras 5.46, Figura 5.48, Figura 5.50, Figura 5.52, Figura 5.59 y Figura 5.60 no representan un daño por deslizamiento de los apoyos, sino que se presentan porque al identificar las formas modales en el software ARTEMIS, éstas se cortaron al no alargarse la base de los arcos provocando dichas amplitudes.



6. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

Es muy importante mencionar que para poder realizar las mediciones todos los sensores empleados deben estar *calibrados a la misma amplitud*, ya que si alguno de ellos no lo está provocará variaciones que perjudican a las matrices de amplitudes modales, ocasionando una incorrecta interpretación de los datos en el método de identificación de daño. En cuanto al *acomodo y distribución de los sensores*, se comprobó que lo ideal es que se haga un barrido del elemento estudiado procurando registrar toda la superficie del mismo, ya que esto asegura que se cuente con la información necesaria para poder aplicar el método de identificación de daño. Se observó que en arcos con una configuración similar a la estudiada, el número mínimo de posiciones para garantizar una cantidad suficiente de modos de vibrar para detectar el daño deberá ser de 20, y con una duración de muestreo mínima de 5 minutos para obtener 4 modos de vibrar en arcos de medio punto, y de 18 posiciones también con un muestreo de 5 minutos como mínimo para obtener 5 modos en arcos rebajados, ya que el espaciado y la duración de la mediciones influye significativamente en la cantidad de modos de vibrar que se pueden identificar; se llegó a esta conclusión después de un proceso de calibración en el cual inicialmente se propusieron 10 posiciones y tan solo 1 minuto de registro, condición en la que solo se identificaron 3 modos de vibrar.

También se comprobó que se pueden *optimizar los registros* utilizando solo la componente de interés (para este caso la componente vertical “Z”, es decir la



correspondiente a la flexión), la cual dependerá del elemento estudiado; por ejemplo si se tratará de un muro las componentes de interés serán las horizontales. A su vez, en caso de que el elemento estudiado cuente con una gran superficie en la que las líneas de los sensores queden muy espaciadas, se podrá concentrar las posiciones de los sensores en las líneas de las zonas de interés con la finalidad de aproximar la ubicación al punto donde está la zona dañada.

Cabe aclarar que todo el proceso de identificación del daño se llevó a cabo con 8 sensores, 4 fijos y 4 móviles; sin embargo se llegó a la conclusión de que el número de posiciones es independiente del número de sensores, ya que se puede cumplir con el número mínimo de posiciones empleando al menos un sensor fijo y uno móvil.

Otro punto a destacar es que dependiendo del caso analizado el método presentó mejoras en los resultados, ya que en los gráficos donde se aprecian claramente el daño en los riñones y clave de los arcos estudiados, específicamente en el caso donde se comparó el estado inicial con dañado (con masa adicional), los mejores resultados se aprecian en las gráficas de la Figura 5.46, Figura 5.48 y Figura 5.58 las cuales corresponden a la matriz de flexibilidad, en cambio para el caso en el que se compara el estado saludable contra el dañado (sin masa adicional), los gráficos que muestran un mejor comportamiento son los de la Figura 5.45, Figura 5.47 y Figura 5.59 que son los correspondientes a la matriz rigidez. Este comportamiento se puede explicar gracias al concepto de frecuencia natural ($\omega^2 = k/m$), al aumentar la masa la frecuencia disminuye y en consecuencia el periodo por ser la operación inversa de la frecuencia ($T = 1/\omega$) aumenta; ahora si el periodo aumenta la rigidez disminuye y por lo tanto entonces la flexibilidad crece, por esa razón cuando los arcos estaban con la masa adicional las amplitudes en los gráficos se apreciaban mejor para el caso de la matriz de flexibilidad cruda, físicamente esto se puede observar debido a que la rigidez se pierde al abrirse las grietas en las zonas dañadas a causa de la masa adicional. De igual forma cuando no se aumenta la masa la frecuencia natural permanece sin cambio, por lo tanto la rigidez no se ve disminuida justificando los resultados en los



arcos estudiados para el caso sin la masa adicional, siendo los gráficos de la matriz de rigidez cruda en los que se observan los mejores resultados.

Dicho lo anterior en un caso de identificación de daño en una estructura real la mejor opción para detectar el daño será la correspondiente a la rigidez cruda, ya que no se cuenta con una masa adicional sobre la misma; aunque se recomienda también usar la matriz de flexibilidad cruda para tener una referencia adicional con la cual poder comparar los resultados obtenidos.

Cabe recordar que el método no especifica si la amplitud de los gráficos es proporcional al nivel del daño, y tampoco especifica el lecho donde se encuentra ubicado dicho daño.

Adicionalmente es importante hacer notar que la convención de signos de la matriz de formas modales no influye en el resultado final.

Por último es conveniente destacar la efectividad del método, ya que en el arco rebajado el gráfico ayudó a localizar la zona dañada, puesto que al realizar una primera inspección no se logró apreciar a simple vista el daño en esa zona; el gráfico al que se hace referencia fue el de la Figura 5.46 y Figura 5.48, donde el daño que se consiguió ubicar fue el presentado en la Figura 5.55, que corresponde a la posición 14 del acomodo de los sensores de la Figura 5.20.

Aunque los resultados obtenidos en la presente investigación fueron satisfactorios, deberán de ser corroborados mediante otro tipo de técnicas de procesamiento para las vibraciones, de cara inclusive para estar en condiciones de avanzar de un nivel mediante la estimación de severidad del daño, con la finalidad de poder reforzar la etapa de diagnóstico necesaria para la correcta conservación de este tipo de estructuras. Adicionalmente resulta necesaria la aplicación de los resultados obtenidos a estructuras de tipo real, lo cual implicará la consideración de factores medio-ambientales, que sin duda incidirán en los resultados finales, ya que se podrían considerar en este tipo de edificaciones como una acción ligada al daño ya que modifica las propiedades dinámicas del sistema.



ANEXO I

A continuación para el caso del arco rebajado, se muestran todas las matrices utilizadas en el programa para la detección del daño, comparando los resultados obtenidos del estado sin daño y el dañado (sin masa adicional), para ejemplificar el acomodo y forma de las matrices en los libros de EXCEL empleados en el programa.

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|---|
| 0.22138761 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0.29518349 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0.29518349 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0.29518349 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0.29518349 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.29518349 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.22138761 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.29518349 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.29518349 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.14759174 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.29518349 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.29518349 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.29518349 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.29518349 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.29518349 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.29518349 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.29518349 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.29518349 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.22138761 | 0 |

Figura I.1. Matriz de masas para el arco rebajado en su estado original o sin daño.



| | | | | |
|----------|----------|----------|----------|----------|
| -0.52687 | -0.46666 | -0.21609 | 0.09529 | 0.05267 |
| -0.59229 | -0.46938 | -0.33421 | 0.01433 | 0.02107 |
| -0.54180 | -0.50908 | -0.43552 | 0.06418 | -0.08626 |
| -0.63258 | -0.60465 | -0.54541 | 0.13693 | -0.12630 |
| -0.44742 | -0.51194 | -0.60697 | -0.26287 | -0.27511 |
| -0.60355 | -0.69602 | -0.71397 | -0.35678 | 0.32473 |
| -0.53452 | -0.55752 | -0.71376 | -0.38206 | 0.06940 |
| -0.42151 | -0.50512 | -0.64645 | 0.22053 | 0.11729 |
| -0.21092 | -0.31176 | -0.44573 | -0.29342 | 0.47495 |
| 0.08895 | 0.11532 | 0.23001 | 0.14638 | 0.77816 |
| 0.19322 | 0.19483 | 0.04750 | 0.53718 | 1.00000 |
| 0.38281 | 0.42320 | 0.44040 | 0.48611 | 0.61706 |
| 0.73633 | 0.79424 | 0.71639 | -0.06220 | -0.28558 |
| 0.82522 | 0.80255 | 0.88690 | 0.26582 | -0.13872 |
| 0.87558 | 0.96646 | 1.00000 | 0.12606 | -0.36452 |
| 0.87776 | 0.88790 | 0.77410 | 0.15341 | -0.36815 |
| 0.60906 | 0.68410 | 0.58777 | 0.13690 | -0.65232 |
| 0.66156 | 0.59494 | 0.38467 | 0.16334 | -0.43884 |
| 0.54808 | 0.46302 | 0.21467 | 0.07260 | -0.24984 |

Figura I.2. Matriz de amplitudes modales para el arco rebajado en su estado original o sin daño.

| | | | | |
|------------|------------|------------|------------|------------|
| 12.4023400 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 14.1601600 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 17.5781300 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 32.5195300 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 35.0585900 |

Figura I.3. Matriz de frecuencias para el arco rebajado en su estado original o sin daño.

IDENTIFICACIÓN DE DAÑO EN ARCOS DE MAMPOSTERÍA



| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|---|
| 0.22138761 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0.29518349 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0.29518349 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0.29518349 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0.29518349 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.29518349 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.22138761 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.29518349 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.29518349 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.14759174 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.29518349 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.29518349 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.29518349 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.29518349 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.29518349 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.29518349 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.29518349 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.29518349 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.22138761 | 0 |

Figura I.4. Matriz de masas para el arco rebajado en su estado dañado (sin masa adicional).

| | | | | |
|-----------|------------|------------|------------|------------|
| 8.7890630 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 20.6054700 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 24.5117200 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 29.5898400 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 36.2304700 |

Figura I.5. Matriz de frecuencias para el arco rebajado en su estado dañado (sin masa adicional).



| | | | | |
|----------|----------|----------|----------|----------|
| 0.11455 | 0.07889 | -0.02280 | 0.06095 | -0.10651 |
| 0.17279 | 0.07635 | -0.06144 | 0.29727 | -0.16083 |
| 0.19267 | 0.50266 | -0.06001 | 0.49740 | -0.51108 |
| 0.35888 | 0.59418 | -0.15340 | 0.69958 | -0.44005 |
| 0.52583 | 0.41800 | -0.24960 | 0.64796 | -0.31786 |
| 0.71567 | 0.42212 | -0.35209 | 0.51253 | 0.14215 |
| 0.92140 | 0.38083 | -0.49589 | -0.11569 | 0.67630 |
| 0.97954 | 0.31658 | -0.51729 | -0.26835 | 0.96524 |
| 0.52911 | 0.34873 | -0.59668 | -0.40840 | 0.51972 |
| 0.09469 | -0.59015 | -0.45314 | -0.18007 | 0.17764 |
| -0.33600 | 1.00000 | -0.61306 | 0.14765 | 0.40625 |
| -0.95192 | 0.52590 | -0.72625 | 0.97522 | 0.79999 |
| -0.95154 | 0.39283 | -0.44044 | 0.39031 | 0.71391 |
| -0.77806 | 0.21941 | -0.32823 | -0.14461 | 0.29054 |
| -0.65168 | 0.38438 | 0.00288 | -0.45708 | 0.20702 |
| -0.48078 | 0.41147 | 0.04228 | -0.01085 | 0.63594 |
| -0.27486 | 0.37057 | 0.14432 | 0.26817 | 0.68257 |
| -0.06909 | 0.46104 | 0.39824 | -0.78442 | 0.90007 |
| -0.03204 | 0.24022 | 0.24527 | -0.40132 | 0.30193 |

Figura I.6. Matriz de amplitudes modales para el arco rebajado en su estado dañado (sin masa adicional).

Las matrices antes presentadas son el resultado de las campañas de medición para el arco rebajado, las cuales se utilizan para realizar las operaciones matriciales planteadas en el Capítulo 4 y empleadas en el programa mostrado en el Capítulo 5.

Las siguientes figuras muestran tanto la matriz de rigidez, como la flexibilidad cruda, de las cuales se toma la diagonal principal la cual representa las posiciones en el arco y cuyos picos indican la posición donde se presenta el daño.



IDENTIFICACIÓN DE DAÑO EN ARCOS DE MAMPOSTERÍA

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 4.49419794 | 4.82075369 | 0.27111044 | 1.68932649 | -1.35271354 | 7.45019355 | 8.92774418 | 18.1221233 | 9.61409315 | 2.57916669 | 5.99918661 | 1.9319582 | -9.0426727 | -9.14957481 | -12.5988837 | -8.73986787 | -7.05361977 | 0.74503344 | -2.53442949 |
| 4.82075369 | 1.31035584 | -10.2338529 | -11.7656763 | -10.8933521 | 5.01928502 | 19.6587192 | 34.0050654 | 24.2288731 | 2.83919565 | -0.87405655 | -18.5528781 | -16.6700686 | -13.2210259 | -10.6746887 | -10.3658647 | -10.8137027 | 20.038899 | 3.19172777 |
| 0.27111044 | -10.2338529 | -43.7902248 | -45.9231781 | -36.5013719 | -7.18850901 | 36.2978206 | 73.1774417 | 40.2400944 | 7.9763316 | -11.6963276 | -15.6035557 | 0.92478923 | -2.30757741 | 0.58597468 | 11.6502093 | 13.0788545 | 65.5610076 | 16.0091313 |
| 1.68932649 | -11.7656763 | -45.9231781 | -51.4495435 | -44.5248616 | -19.9751617 | 30.5824562 | 69.022066 | 35.7195337 | 6.81361865 | -24.6692398 | -43.2736911 | -16.8483341 | -6.50596533 | 2.16605074 | 3.768518 | 3.24809651 | 70.8510395 | 18.7402033 |
| -1.35271354 | -10.8933521 | -36.5013719 | -44.5248616 | -23.519953 | -13.2430653 | 31.3057318 | 42.0468163 | 28.4717938 | -6.78376115 | -60.9675689 | -76.6107122 | -15.1083051 | -16.1885467 | 3.97165142 | 0.82245096 | 5.21389379 | 63.2160352 | 18.8142408 |
| 7.45019355 | 5.01928502 | -7.18850901 | -19.9751617 | -13.2430653 | 11.2128103 | 10.3498914 | -5.59048697 | 28.7556187 | 10.1333434 | -25.4044424 | -79.3824655 | -73.809981 | -51.8443788 | -43.1833071 | -63.8697079 | -75.1163453 | -24.1005346 | -10.1694161 |
| 8.92774418 | 19.6587192 | 36.2978206 | 30.5824562 | 31.3057318 | 10.3498914 | -22.6941536 | -65.6437243 | -30.388164 | -9.34375969 | -55.2862347 | -76.1158754 | -67.1666274 | -53.7739182 | -47.5480175 | -66.7153524 | -61.6426697 | -74.4090451 | -22.8881057 |
| 18.1221233 | 34.0050654 | 73.1774417 | 69.022066 | 42.0468163 | -5.59048697 | -65.6437243 | -112.184961 | -77.7653717 | -11.0278683 | -48.0866471 | -83.8373483 | -109.56729 | -64.8855743 | -65.2372385 | -98.7072611 | -93.6039619 | -127.46083 | -37.568277 |
| 9.61409315 | 24.2288731 | 40.2400944 | 35.7195337 | 28.4717938 | 28.7556187 | -30.388164 | -77.7653717 | -28.9052512 | 4.46794988 | -16.2394009 | -33.6781047 | -73.5624661 | -63.6797821 | -70.785584 | -79.8964977 | -80.8960561 | -107.670425 | -35.320652 |
| 2.57916669 | 2.83919565 | 7.9763316 | 6.81361865 | -6.78376115 | 10.1333434 | -9.34375969 | -11.0278683 | 4.46794988 | 9.70263659 | 46.3893397 | 27.0103334 | -14.0660915 | -5.13613161 | -10.5521322 | -11.8792476 | -22.6333824 | -19.7523527 | -6.55893819 |
| 5.99918661 | -0.87405655 | -11.6963276 | -24.6692398 | -60.9675689 | -25.4044424 | -55.2862347 | -48.0866471 | -16.2394009 | 46.3893397 | 56.9387569 | 0.06683305 | -96.5250764 | -27.9780874 | -46.035941 | -69.927116 | -102.861886 | -72.0993416 | -22.8676107 |
| 1.9319582 | -18.5528781 | -15.6035557 | -43.2736911 | -76.6107122 | -79.3824655 | -76.1158754 | -83.8373483 | -33.6781047 | 27.0103334 | 0.06683305 | -116.832325 | -128.360326 | -14.1350521 | 8.57199945 | -64.0690175 | -107.713351 | -27.5955574 | 1.64982598 |
| -9.0426727 | -16.6700686 | 0.92478923 | -16.8483341 | -15.1083051 | -73.809981 | -67.1666274 | -109.56729 | -73.5624661 | -14.0660915 | -96.5250764 | -128.360326 | -50.6785685 | 3.94836207 | 38.7783696 | -13.3935468 | -21.5309516 | -13.406778 | 9.34120506 |
| -9.14957481 | -13.2210259 | -2.30757741 | -6.50596533 | -16.1885467 | -51.8443788 | -53.7739182 | -64.8855743 | -63.6797821 | -5.13613161 | -27.9780874 | -14.1350521 | 3.94836207 | 27.3836836 | 37.2111315 | 23.4859045 | 21.7172326 | -0.45978231 | 8.10464171 |
| -12.5988837 | -10.6746887 | 0.58597468 | 2.16605074 | 3.97165142 | -43.1833071 | -47.5480175 | -65.2372385 | -70.785584 | -10.5521322 | -46.035941 | 8.57199945 | 38.7783696 | 37.2111315 | 40.0466292 | 38.8857733 | 48.2716183 | -8.3895374 | 4.41722156 |
| -8.73986787 | -10.3658647 | 11.6502093 | 3.768518 | 0.82245096 | -63.8697079 | -66.7153524 | -98.7072611 | -79.8964977 | -11.8792476 | -69.927116 | -64.0690175 | -13.3935468 | 23.4859045 | 38.8857733 | 2.73966647 | 1.40680727 | -29.5991205 | 1.78846771 |
| -7.05361977 | -10.8137027 | 13.0788545 | 3.24809651 | 5.21389379 | -75.1163453 | -61.6426697 | -93.6039619 | -80.8960561 | -22.6333824 | -102.861886 | -107.713351 | -21.5309516 | 21.7172326 | 48.2716183 | 1.40680727 | 4.29563088 | -12.3597976 | 8.40627718 |
| 0.74503344 | 20.038899 | 65.5610076 | 70.8510395 | 63.2160352 | -24.1005346 | -74.4090451 | -127.46083 | -107.670425 | -19.7523527 | -72.0993416 | -27.5955574 | -13.406778 | -0.45978231 | -8.3895374 | -29.5991205 | -12.3597976 | -116.682438 | -29.69578 |
| -2.53442949 | 3.19172777 | 16.0091313 | 18.7402033 | 18.8142408 | -10.1694161 | -22.8881057 | -37.568277 | -35.320652 | -6.55893819 | -22.8676107 | 1.64982598 | 9.34120506 | 8.10464171 | 4.41722156 | 1.78846771 | 8.40627718 | -29.69578 | -6.64982349 |

Figura I.7. Matriz de Rigidez Cruda para el arco rebajado (sin masa adicional).



| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 0.0028545 | 0.00305063 | 0.00288985 | 0.00322957 | 0.00217527 | 0.00299116 | 0.00220319 | 0.00166243 | 0.00095225 | -0.0007084 | -0.0007454 | -0.00125063 | -0.00353745 | -0.00416254 | -0.00500841 | -0.00492596 | -0.00372413 | -0.00376425 | -0.00304464 |
| 0.00305063 | 0.00321433 | 0.00298944 | 0.00322412 | 0.00203364 | 0.00285699 | 0.00207325 | 0.00141817 | 0.00092333 | -0.00091506 | -0.00071831 | -0.00119648 | -0.0035074 | -0.00426226 | -0.00515064 | -0.00521254 | -0.00403621 | -0.0038725 | -0.00320301 |
| 0.00288985 | 0.00298944 | 0.00226156 | 0.00236662 | 0.00141146 | 0.00229926 | 0.00180677 | 0.00134216 | 0.00075383 | -0.00038735 | -0.00161254 | -0.00162083 | -0.00368312 | -0.00432519 | -0.00540324 | -0.00543203 | -0.0042819 | -0.00387987 | -0.00322117 |
| 0.00322957 | 0.00322412 | 0.00236662 | 0.00217381 | 0.00073354 | 0.00139438 | 0.00046169 | -0.0001736 | -9.0418E-05 | -0.00070688 | -0.00147593 | -0.0006383 | -0.00298052 | -0.00389388 | -0.00530162 | -0.00570557 | -0.00471069 | -0.00442153 | -0.00369691 |
| 0.00217527 | 0.00203364 | 0.00141146 | 0.00073354 | -0.00072335 | -0.00082715 | -0.00214384 | -0.00305756 | -0.00151309 | -0.00129111 | -0.00047299 | 0.00181431 | 0.00029403 | -0.00110532 | -0.00248132 | -0.00324932 | -0.00302792 | -0.003161 | -0.00270661 |
| 0.00299116 | 0.00285699 | 0.00229926 | 0.00139438 | -0.00082715 | -0.00093153 | -0.00338195 | -0.00478272 | -0.00225131 | -0.00159454 | 0.0001678 | 0.0032235 | 0.00050517 | -0.00134845 | -0.00333776 | -0.00445661 | -0.00430948 | -0.00494409 | -0.00394037 |
| 0.00220319 | 0.00207325 | 0.00180677 | 0.00046169 | -0.00214384 | -0.00338195 | -0.00690654 | -0.00863804 | -0.00467585 | -0.00225946 | 0.00095458 | 0.00633489 | 0.00390214 | 0.00139235 | -0.00084233 | -0.00231196 | -0.00271367 | -0.00475361 | -0.00356764 |
| 0.00166243 | 0.00141817 | 0.00134216 | -0.0001736 | -0.00305756 | -0.00478272 | -0.00863804 | -0.0100574 | -0.00571043 | -0.00224735 | 0.00182157 | 0.00788788 | 0.00543105 | 0.00306561 | 0.0007525 | -0.00090959 | -0.00174219 | -0.00415129 | -0.00303283 |
| 0.00095225 | 0.00092333 | 0.00075383 | -9.0418E-05 | -0.00151309 | -0.00225131 | -0.00467585 | -0.00571043 | -0.0032175 | -0.00114121 | 0.00038029 | 0.0037905 | 0.00228584 | 0.00085449 | -0.00046605 | -0.00114537 | -0.00146032 | -0.00283419 | -0.00193882 |
| -0.0007084 | -0.00091506 | -0.00038735 | -0.00070688 | -0.00129111 | -0.00159454 | -0.00225946 | -0.00224735 | -0.00114121 | -0.00053726 | 0.00228145 | 0.00269295 | 0.00259037 | 0.00249006 | 0.00280649 | 0.00248752 | 0.00171278 | 0.00149861 | 0.00102968 |
| -0.0007454 | -0.00071831 | -0.00161254 | -0.00147593 | -0.00047299 | 0.0001678 | 0.00095458 | 0.00182157 | 0.00038029 | 0.00228145 | -0.00306714 | -0.00482354 | -0.00425745 | -0.00232661 | -0.00176383 | -0.00134944 | -0.00111858 | 6.7859E-05 | 0.00052434 |
| -0.00125063 | -0.00119648 | -0.00162083 | -0.0006383 | 0.00181431 | 0.0032235 | 0.00633489 | 0.00788788 | 0.0037905 | 0.00269295 | -0.00482354 | -0.01182671 | -0.00925671 | -0.00520827 | -0.00260118 | -0.00171116 | -0.0008535 | 0.00268923 | 0.00242225 |
| -0.00353745 | -0.0035074 | -0.00368312 | -0.00298052 | 0.00029403 | 0.00050517 | 0.00390214 | 0.00543105 | 0.00228584 | 0.00259037 | -0.00425745 | -0.00925671 | -0.00456797 | -0.00091918 | 0.00212565 | 0.00297714 | 0.00301804 | 0.00538218 | 0.00458677 |
| -0.00416254 | -0.00426226 | -0.00432519 | -0.00389388 | -0.00110532 | -0.00134845 | 0.00139235 | 0.00306561 | 0.00085449 | 0.00249006 | -0.00232661 | -0.00520827 | -0.00091918 | 0.00204992 | 0.00462662 | 0.00539037 | 0.00481292 | 0.00607981 | 0.00501029 |
| -0.00500841 | -0.00515064 | -0.00540324 | -0.00530162 | -0.00248132 | -0.00333776 | -0.00084233 | 0.0007525 | -0.00046605 | 0.00280649 | -0.00176383 | -0.00260118 | 0.00212565 | 0.00462662 | 0.00688499 | 0.00737429 | 0.00625375 | 0.00647436 | 0.00538304 |
| -0.00492596 | -0.00521254 | -0.00543203 | -0.00570557 | -0.00324932 | -0.00445661 | -0.00231196 | -0.00090959 | -0.00114537 | 0.00248752 | -0.00134944 | -0.00171116 | 0.00297714 | 0.00539037 | 0.00737429 | 0.0073103 | 0.00578536 | 0.00617791 | 0.0052004 |
| -0.00372413 | -0.00403621 | -0.0042819 | -0.00471069 | -0.00302792 | -0.00430948 | -0.00271367 | -0.00174219 | -0.00146032 | 0.00171278 | -0.00111858 | -0.0008535 | 0.00301804 | 0.00481292 | 0.00625375 | 0.00578536 | 0.00445451 | 0.00466345 | 0.00388361 |
| -0.00376425 | -0.0038725 | -0.00387987 | -0.00442153 | -0.003161 | -0.00494409 | -0.00475361 | -0.00415129 | -0.00283419 | 0.00149861 | 6.7859E-05 | 0.00268923 | 0.00538218 | 0.00607981 | 0.00647436 | 0.00617791 | 0.00466345 | 0.00312504 | 0.0030801 |
| -0.00304464 | -0.00320301 | -0.00322117 | -0.00369691 | -0.00270661 | -0.00394037 | -0.00356764 | -0.00303283 | -0.00193882 | 0.00102968 | 0.00052434 | 0.00242225 | 0.00458677 | 0.00501029 | 0.00538304 | 0.0052004 | 0.00388361 | 0.0030801 | 0.00272431 |

Figura I.8. Matriz de Flexibilidad Cruda para el arco rebajado (sin masa adicional).



ANEXO II

A continuación se presentan los modos de vibrar correspondientes al modelo analítico y a los resultados experimentales para los arcos estudiados. En la parte izquierda se muestran los modos correspondientes al modelo analítico, mientras que en la derecha se pueden observar los resultantes de la campaña experimental procesados con ARTEMIS.

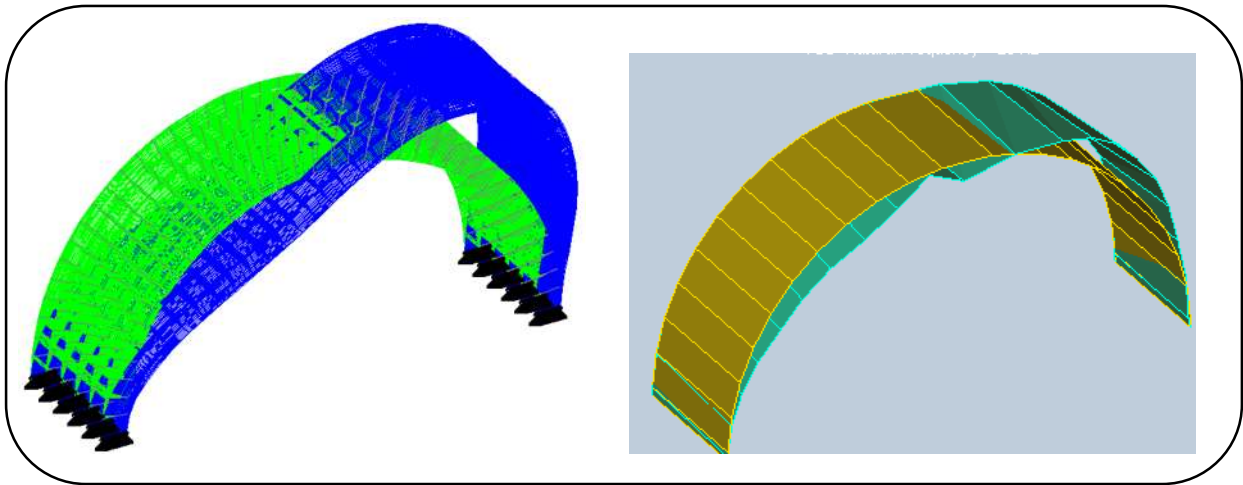


Figura II.1 Arco de Medio punto, modo 1.

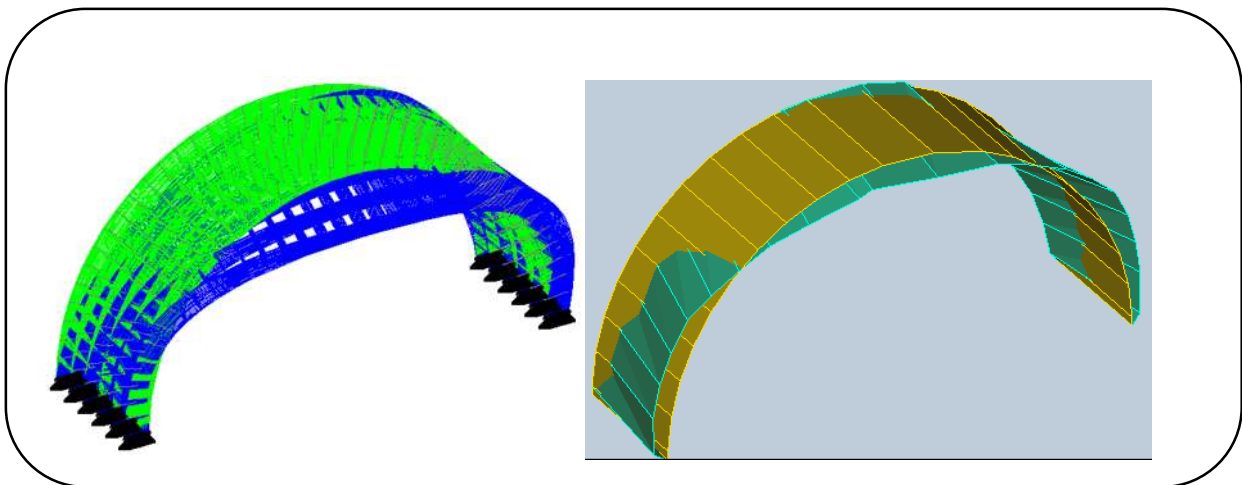


Figura II.2 Arco de Medio punto, modo 2.

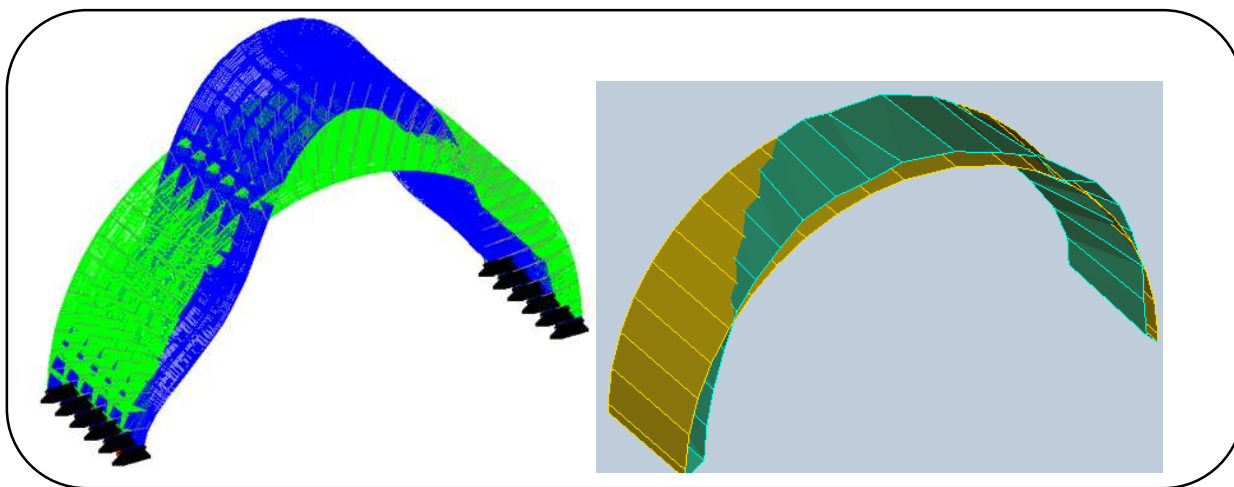


Figura II.3 Arco de Medio punto, modo 3.

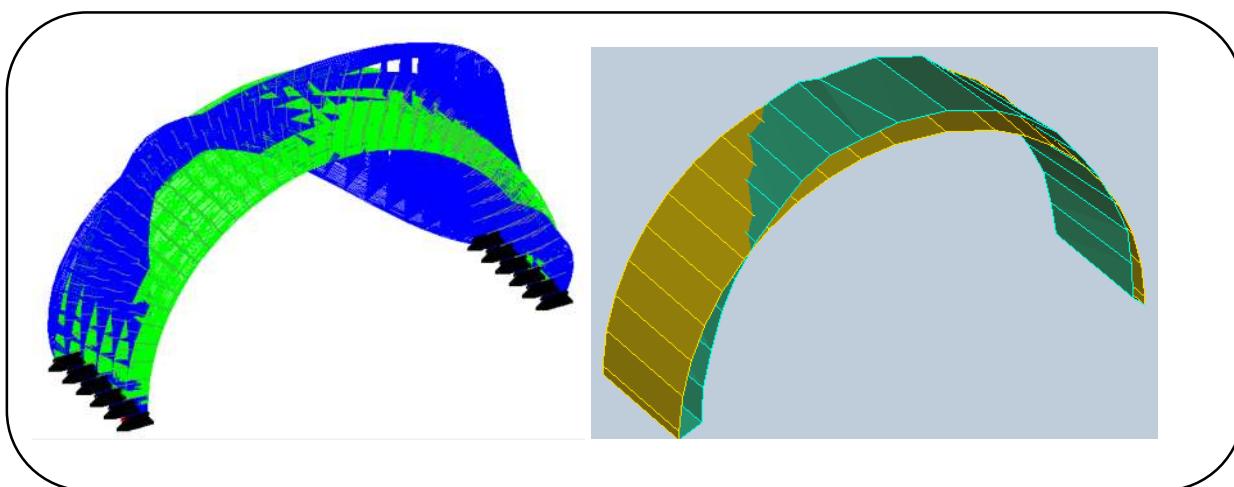


Figura II.4 Arco de Medio punto, modo 4.

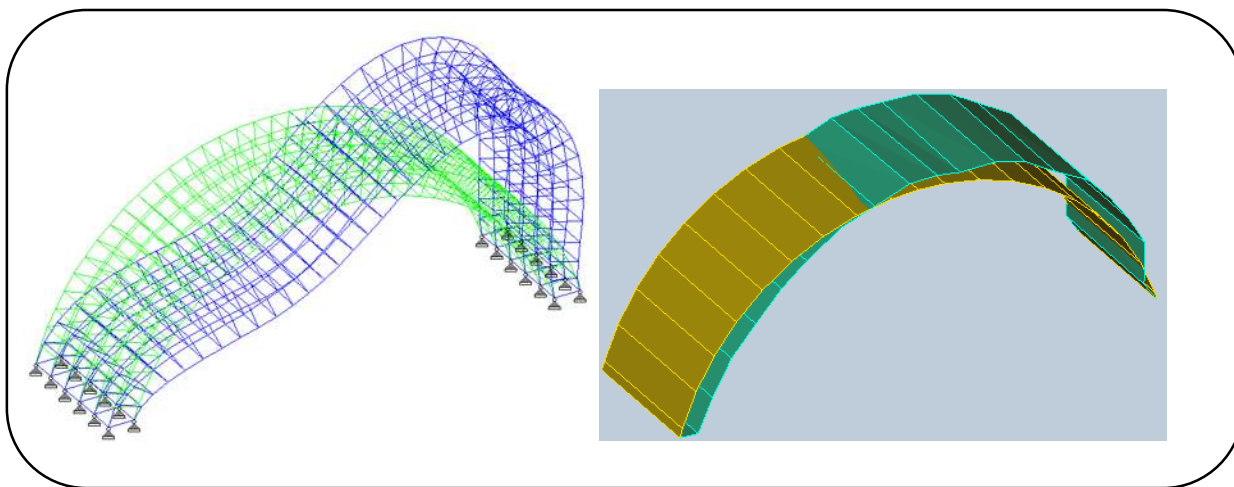


Figura II.5 Arco rebajado, modo 1.

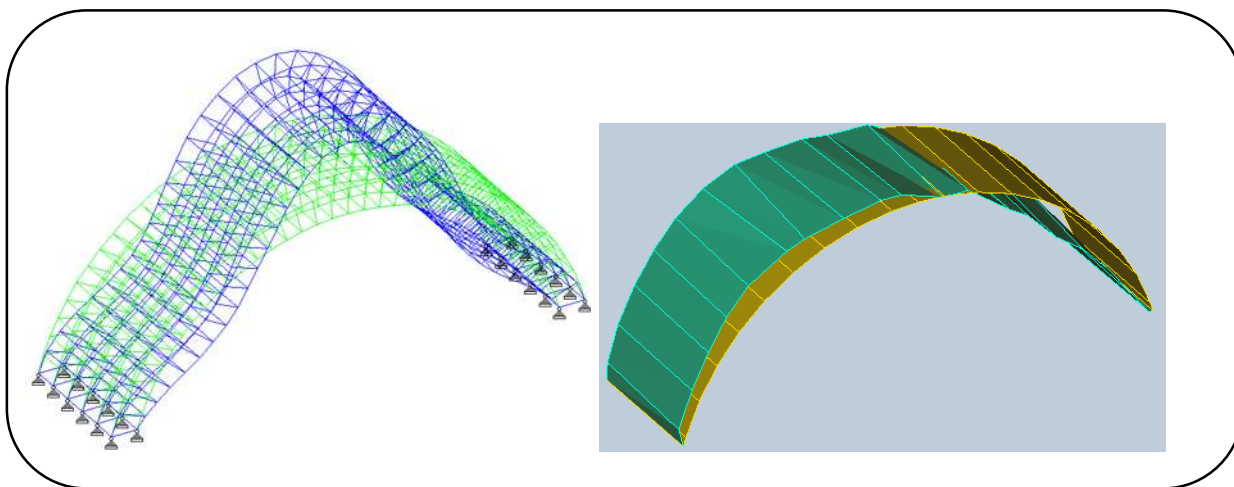


Figura II.6 Arco rebajado, modo 2.

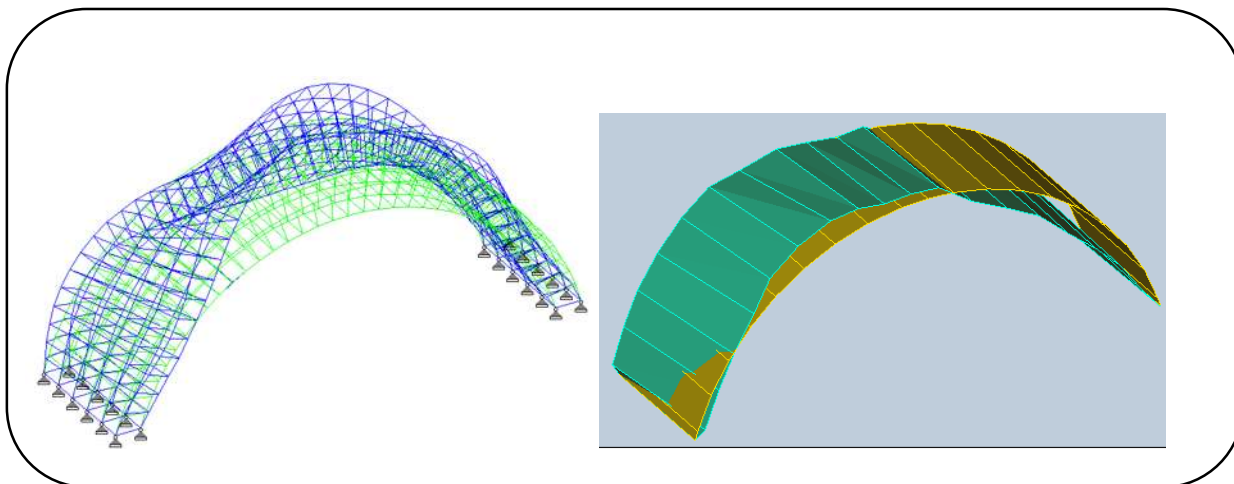


Figura II.7 Arco rebajado, modo 3.

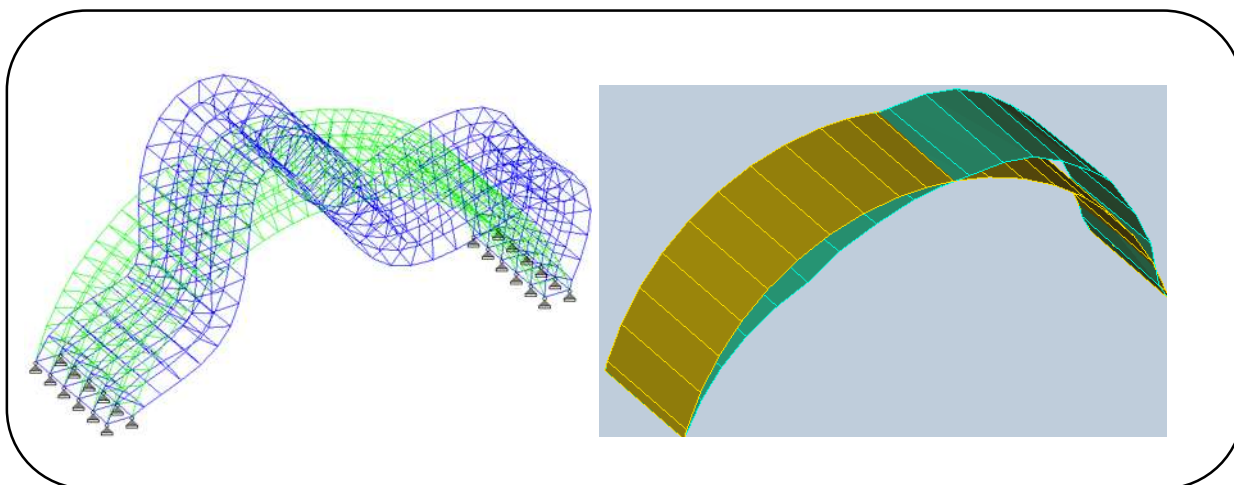


Figura II.8 Arco rebajado, modo 4.

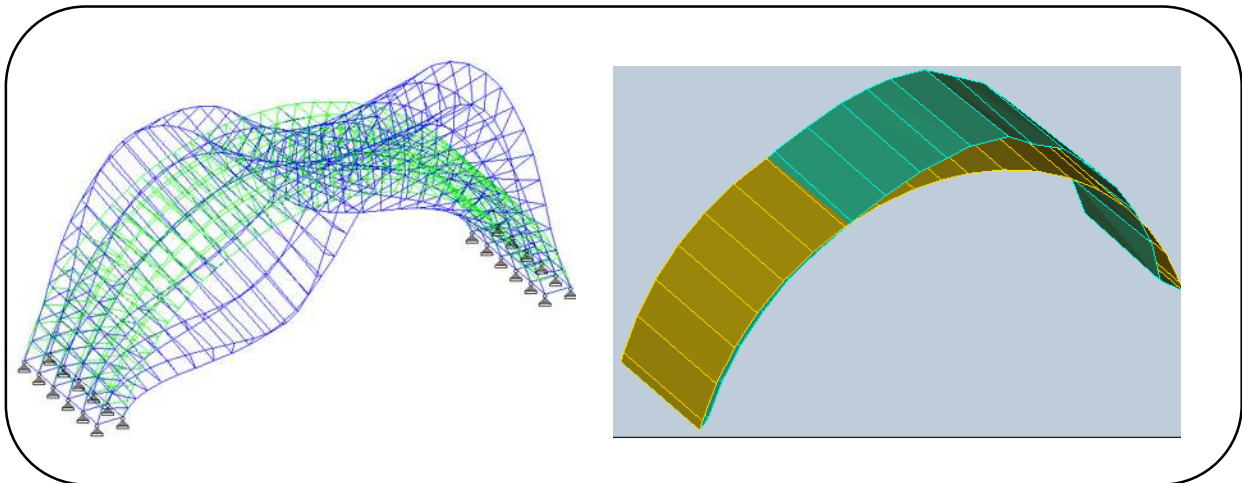


Figura II.9 Arco rebajado, modo 5.

La Figura II.10 muestra el formato con el cual el software ARTEMIS imprime las amplitudes modales de los arcos estudiados en valor absoluto, y para nuestros casos se tomaron con valor positivo las amplitudes por encima del arco y en negativo las que se encuentran por debajo, como se puede apreciar en las anteriores figuras.



```

BEGIN MODE DEFINITION
PROJECT
  medio2 (sin daño).axp
ESTIMATOR
  FDD
CREATION: DATE / TIME
  14-11-2014 11:12:06
FREQUENCY [HZ]: MEAN / SDEV
  1.572266e+001 0.000000e+000
DAMPING [%]: MEAN / SDEV
  0.000000e+000 0.000000e+000
MODE SHAPE:  MODE / X-ABS / X-ANG / Y-ABS / Y-ANG / Z-ABS / Z-ANG
  1 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000
  2 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000
  3 9.848581e-001 -7.520544e-002 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000
  4 8.559747e-001 1.610487e-002 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000
  5 9.632288e-001 -1.357530e-002 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000
  6 8.633466e-001 7.882957e-003 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000
  7 1.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000
  8 7.257954e-001 6.370215e-002 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000
  9 9.407783e-001 -6.626337e-002 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000
 10 7.228411e-001 6.678764e-004 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000
 11 7.439291e-001 4.863031e-002 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000
 12 7.217617e-001 5.836105e-002 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000
 13 6.267071e-001 3.390610e-001 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000
 14 5.107549e-001 4.945136e-001 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000
 15 4.732488e-001 4.986832e-001 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000
 16 3.563662e-001 1.027989e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000
 17 4.378242e-001 1.807907e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000
 18 4.233852e-001 1.909571e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000
 19 2.563346e-001 1.033051e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000
 20 5.900469e-001 1.069793e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000
 21 4.446168e-001 1.317177e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000
 22 5.448926e-001 9.080857e-001 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000
 23 5.857253e-001 1.137798e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000
 24 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000
 25 3.771236e-001 1.671601e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000
 26 3.493127e-001 1.691828e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000
 27 2.792349e-001 -2.920567e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000
 28 1.096060e-001 -1.708101e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000
 29 3.850071e-001 3.131980e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000
 30 3.881781e-001 3.134639e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000
 31 4.345747e-001 2.763871e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000
 32 3.299112e-001 2.540234e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000
 33 6.687464e-001 2.767716e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000
 34 5.192943e-001 2.711140e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000
 35 6.431705e-001 2.759070e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000
 36 5.862978e-001 2.658094e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000
 37 7.127987e-001 2.878476e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000
 38 5.838488e-001 2.625717e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000
 39 8.695766e-001 2.990896e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000
 40 7.597792e-001 2.948012e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000
 41 8.730195e-001 3.067695e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000
 42 8.166087e-001 3.062622e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000
 43 8.922157e-001 3.119724e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000
 44 7.805015e-001 3.121821e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000
 45 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000
END MODE DEFINITION
    
```

Figura II.10. Amplitudes modales resultantes del análisis en ARTEMIS.



REFERENCIAS

Ancona Lazcano, A. R., Salgado Estrada, R., Zamora Castro, S. A., y Marcial Martínez, F.: **“Evaluación de Métodos de Detección de Daño en Estructuras Mediante el Uso de Vibraciones”**. *XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica Aguascalientes*, Aguascalientes, 2011.

Caicedo Hornaza, B., Mancera Carmona, E., Alfonso Tristancho, J.: **“Aplicaciones del Georadar de Subsuelo en Obras Civiles”**. *Revista de Ingeniería No.18, Universidad de los Andes Facultad de Ingeniería*, noviembre, 2003.

Carrión Viramontes, F.J. y Lozano Guzmán, A.: **“Evaluación y Detección de Daño en Estructuras Utilizando un Método Inverso por Sub-Dominios”**. *Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Instituto Mexicano del Transporte, Publicación Técnica No. 166, Sanfandila, Querétaro*, 2001.

Díaz Gómez, C.: **“Lesiones Estructurales en los Edificios de la Arquitectura Tradicional Mediterránea”**. *Departamento de Construcciones Arquitectónicas I en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona Universidad Politécnica de Cataluña, España*, 2011.

FARO Spain (2010), <http://www.faro.com/es-es>

Gea, S., Demergassi, C., Toledo, M. y Gea, G.: **“Patrimonio Histórico: Una Propuesta Metodológica para su Conservación en Entornos Urbanos Cambiantes y Sitios de Peligrosidad Sísmica”**. *2do. Congreso Iberoamericano y X Jornada “Técnicas de Restauración y Conservación del Patrimonio”*. Buenos Aires, septiembre, 2011.

Kinematics Inc. (2008), <http://www.kmi.com/p-86-Episensor-es-u2.aspx>



Laya Pereira, A. Méndez Orellana J, L.: “**Determinación Experimental de los Parámetros Dinámicos del Modelo a Escala del Puente Vega de Asa**”. *8º Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica*. Cusco, octubre, 2007.

Lombillo, I. y Villegas, L.: “**Metodologías No Destructivas Aplicadas a la Rehabilitación Estructural del Patrimonio**”. *Grupo de Tecnología de la Edificación de la Universidad de Cantabria*, noviembre, 2006.

Mendoza López, M. J.: “**Comportamiento y Diseño de Cimentaciones Profundas en la Ciudad de México**”. *III Coloquio de Ingreso Academia de Ingeniería A.C.*, Ciudad de México, septiembre, 2007.

Meruane, V., Mahu, J.: “**Identificación de Daño Estructural Utilizando Redes Neuronales Artificiales y Frecuencias de Anti-Resonancia**”. *XV Congreso Chileno de Ingeniería Mecánica (COCIM)*, Chile, 2012.

Morassi, A., Vestroni, F.: “**Dynamic Method for Damage Detection in Structures**”. *Springer Wien New York*, Italia, 2008.

Moreno, F.: “**Arcos y bóvedas**”. *Ediciones CEAC*, España, 2004.

Orduña Bustamante, A., Peña Mondragón, F., y Roeder Carbo, G.: “**Un Estado del Arte del Análisis Estructural de Edificios Históricos de Mampostería. Parte I: Comportamiento Mecánico y Modelos Constitutivos**”. *XIV Congreso Nacional de Ingeniería Estructural Acapulco*, Guerrero, 2004.

Paz, M. : “**Dinámica Estructural**”. *Editorial Reverté, S. A.*, España, 1992.

Peña Mondragón, F.: “**Estrategias para el Modelado y Análisis Sísmico de Estructuras Históricas**”. *Revista de Ingeniería Sísmica No. 83* 43-63, diciembre, 2010.



Silva Ramos, J. L. :“**Damage Identification on Masonry Structures Based on Vibration Signatures**”. *Tesis doctoral, Universidad do Minho, Portugal, septiembre, 2007.*

Svibs, Structural Vibration Solutions (2011),
http://www.svibs.com/products/ARTEMIS_Modal.aspx

Vázquez Torres. D., Suárez, L., y López, R.: “**Identificación de Daños en Vigas de Hormigos Experimentales y Analíticas Utilizando Metodologías Modales**”. *Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil. Vol. 4(2) 183, Puerto Rico, 2004.*