



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ACTUALIZACIÓN DE FRECUENCIAS EXPERIMENTALES DE  
UNA ESTRUCTURA DE ACERO A PARTIR DE SUS  
CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS ANALÍTICAS**

**T E S I S**

que para obtener el grado de:

**INGENIERO CIVIL**

presenta:

**DANIEL FUENTES CERVANTES**

Director de tesis:

**DR. JOSÉ ALBERTO ESCOBAR SÁNCHEZ**

México DF, abril de 2014



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: M.I. RICARDO RUBÉN PADILLA VELÁZQUEZ

Vocal: DR. JOSÉ ALBERTO ESCOBAR SÁNCHEZ

Secretario: ING. MARCOS TREJO HERNÁNDEZ

1<sup>er</sup>. Suplente: M.I. ROBERTO DURÁN HERNÁNDEZ

2<sup>do</sup>. Suplente: M.I. RODRIGO TAKASHI SEPÚLVEDA HIROSE

Lugar donde se realizó la tesis:

INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM.

**TUTOR DE TESIS:**

---

DR. JOSÉ ALBERTO ESCOBAR SÁNCHEZ

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios, por acompañarme en todo momento.

A mis padres, por el sacrificio realizado a lo largo de tantos años, con el objetivo de darme la formación y educación necesarias para lograr mis metas.

A mi hermano, por ser modelo de éxito.

A mis familiares, por brindarme su cariño y los valores para ser mejor persona.

A la UNAM, por permitirme ser miembro de la mejor institución educativa y hacerme sentir orgulloso por formar parte de su comunidad.

A la Facultad de Ingeniería, por transmitirme a través de sus catedráticos, los conocimientos intelectuales suficientes para competir en la actualidad.

Al Instituto de Ingeniería, por abrirme las puertas de sus instalaciones.

Al Dr. José Albero Escobar Sánchez, por su valiosa contribución, constante apoyo e inagotable paciencia para la realización del presente trabajo.

Al M. I. Roberto Durán Hernández, quien fungió como Codirector del presente trabajo, aportando importantes comentarios y sugerencias durante su desarrollo.

A mi novia, por su comprensión.

A mis amigos, por concederme su invaluable amistad.

## RESUMEN

Los programas enfocados en el análisis y desarrollo de modelos de elementos finitos, sirven para modelar diversos tipos de estructuras y obtener sus características dinámicas. El modelo es adecuado, si los valores de dichas propiedades se asemejan a los experimentales. Generalmente estos no concuerdan, lo que hace necesario corregir el modelo de elementos finitos. Para esto, se puede emplear la actualización de modelos, técnica que lo mejora modificando ciertos parámetros de los elementos que lo componen.

Si la identificación de las propiedades dinámicas (frecuencias y modos de vibrar) en un ensayo, es incompleta, con los valores analíticos, es posible obtener aquéllas experimentales sin identificar. Esto se logra con una ecuación que relaciona a ambos.

En el presente trabajo, se actualizan las características dinámicas de una estructura de acero obteniendo sus frecuencias experimentales sin identificar y completándolas con el uso de un modelo analítico. Adicionalmente, se propone una ecuación alternativa de actualización para el mismo propósito.

## **ABSTRACT**

The software used in the analysis and development of finite element models, is useful to model different types of structures and get their dynamic properties. The model is appropriate if the value of these properties is close to the experimental data. Usually they don't match, so that is necessary to modify the finite element model. The problem can be addressed using model updating, technique that improves the model by modifying certain parameters of its elements.

If the experimental data (frequencies and mode shapes) is incomplete, using the analytical results, the unidentified dynamic properties can be gotten. The problem is addressed with an equation that relates both data.

A steel structure is updated getting its unidentified experimental frequencies, using its analytical frequencies and the equation previously mentioned. In addition, an alternative updating equation is shown.

## CONTENIDO

<b>RESUMEN.....</b>	<b>IV</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>V</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 1. ACTUALIZACIÓN DE MODELOS .....</b>	<b>2</b>
1.1. PANORAMA GENERAL .....	2
1.2. PRUEBAS DE VIBRACIÓN .....	2
1.2.1. Sistema de montaje .....	3
1.2.2. Excitación de la estructura .....	3
1.2.2.1. <i>Sistemas vibradores</i> .....	3
1.2.2.2. <i>Martillo instrumentado</i> .....	4
1.2.3. Transductores .....	4
1.2.4. Análisis de datos .....	5
1.3. MÉTODOS EMPLEADOS EN LA ACTUALIZACIÓN DE MODELOS.....	5
1.3.1. Métodos directos.....	5
1.3.1.1. <i>Métodos de los multiplicadores de Lagrange</i> .....	6
1.3.1.2. <i>Mezcla de matrices</i> .....	6
1.3.2. Métodos iterativos.....	6
1.3.3. Métodos de identificación de errores .....	7
1.4. ERRORES E INCERTIDUMBRES EN LA ACTUALIZACIÓN DE MODELOS .....	7
1.4.1. Errores en el modelo de elementos finitos .....	7
1.4.2. Incertidumbres en las pruebas de laboratorio.....	8
<b>CAPÍTULO 2. LA ACTUALIZACIÓN DE MODELOS COMO HERRAMIENTA EN EL SEGUIMIENTO DE LA SALUD ESTRUCTURAL .....</b>	<b>9</b>
2.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROCESO DE SEGUIMIENTO .....	9
2.2. IDENTIFICACIÓN DE DAÑO .....	9
2.3. MÉTODOS PARA LA DETECCIÓN DE DAÑO .....	10
2.3.1. Métodos experimentales .....	10
2.3.1.1. <i>Emisión acústica</i> .....	10
2.3.1.2. <i>Captura de radiografías</i> .....	11
2.3.1.3. <i>Inducción térmica</i> .....	11
2.3.2. Métodos analíticos .....	12
2.3.2.1. <i>Métodos basados en las frecuencias de la estructura</i> .....	12
2.3.2.2. <i>Métodos basados en la actualización de modelos</i> .....	12
2.4. SEGUIMIENTO DE LA SALUD ESTRUCTURAL EN LA INGENIERÍA CIVIL .....	12
2.4.1. Instrumentación en pruebas de campo .....	12
2.4.1.1. <i>Instrumentación con nuevas tecnologías</i> .....	13
2.5. APLICACIÓN DE LA ACTUALIZACIÓN DE MODELOS EN EL SEGUIMIENTO DE LA SALUD ESTRUCTURAL .....	14
2.5.1. Puente peatonal de concreto reforzado .....	14
2.5.2. Viga presforzada .....	15
2.5.3. Puente carretero-ferroviario .....	15

<b>CAPÍTULO 3. ESTRUCTURA DE ACERO ANALIZADA .....</b>	<b>17</b>
3.1. DESCRIPCIÓN DEL MODELO EXPERIMENTAL .....	17
3.1.1. Descripción general.....	17
3.1.2. Elementos estructurales.....	19
3.1.2.1. Soleras .....	19
3.1.2.2. Vigas T.....	19
3.1.2.3. Columnas.....	19
3.1.2.4. Conexión.....	20
3.2. DESCRIPCIÓN DEL MODELO DE ELEMENTOS FINITOS .....	21
3.2.1. Programa SAP2000.....	21
3.2.2. Problemas en la elaboración del modelo de elementos finitos.....	21
3.2.3. Consideraciones en el modelo de elementos finitos.....	21
 <b>CAPÍTULO 4. ACTUALIZACIÓN DEL MODELO EXPERIMENTAL .....</b>	 <b>23</b>
4.1. PRUEBA DE VIBRACIÓN .....	23
4.1.1. Instrumentación.....	23
4.1.2. Excitación y respuesta del modelo .....	24
4.2. RESULTADOS ANALÍTICOS.....	26
4.2.1. Modos de vibrar .....	26
4.3. ACTUALIZACIÓN DE FRECUENCIAS EXPERIMENTALES .....	32
4.3.1. Modelo de correlación lineal.....	32
4.3.1.1. Actualización con el modelo de correlación lineal .....	32
4.3.1.2. Error relativo en los valores de las frecuencias.....	33
4.3.2. Ecuación alternativa de actualización .....	34
4.3.2.1. Actualización con la ecuación alternativa .....	34
 <b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	 <b>36</b>
 <b>BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS .....</b>	 <b>38</b>
 <b>APÉNDICE A.....</b>	 <b>41</b>



## INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la creación de modelos de elementos finitos de diversos tipos de estructuras, ha ido cobrando importancia en la ingeniería estructural. Estos se realizan con la ayuda de programas computacionales, que analizan y producen resultados de manera completa de la estructura modelada. Usualmente, la modelación no es exacta y difiere de su contraparte real. Esto se puede constatar, comparando el valor de las características dinámicas de una estructura (frecuencias y modos de vibrar) obtenidas de un análisis realizado por algún programa de cómputo especializado, contra aquéllos registrados en pruebas experimentales. El error existente entre ambos, indica qué tan correcta fue la modelación. Si resulta inadecuada, es necesario refinar el modelo. Como herramienta para mejorar los modelos de elementos finitos, se emplea la actualización de modelos. Ésta realiza modificaciones en distintos parámetros del mismo; ya sea el módulo de elasticidad de los materiales o las características geométricas de los elementos estructurales, entre otros.

En la actualización de modelos, se han desarrollado dos tipos de métodos, los directos y los iterativos. Ambos tienen sus ventajas y desventajas; y dependiendo de la información con la que se cuenta (propiedades dinámicas y características físicas de la estructura), se opta por la aplicación de alguno de ellos.

La actualización de modelos se ha empleado en la industria automotriz, aeronáutica y más recientemente, en algunas ramas de la ingeniería civil, tales como el seguimiento de la salud estructural. Esta disciplina se encarga de cuidar que las estructuras tengan un funcionamiento adecuado bajo condiciones de servicio; e identificar daños potenciales que puedan sufrir a lo largo de su vida útil. La captura de radiografías, la emisión acústica y la inducción térmica son algunas prácticas clásicas que se emplean para ubicar averías en las estructuras. Por otro lado, la actualización de modelos se ha utilizado con éxito en diversos sistemas estructurales, desde aquéllos empleados específicamente para la investigación, hasta los que se encuentran en estado de servicio y es de suma importancia su constante seguimiento.

Las técnicas de actualización de modelos, ajustan un modelo analítico a partir de una estructura real. Un procedimiento de orden inverso, en el cual se obtengan las propiedades dinámicas de la estructura real, a partir de una previa generación de resultados completos de forma analítica, es una opción viable de actualización. Esto es útil, tomando en cuenta que en las pruebas de vibración de estructuras, la identificación de éstas es incompleta debido a las limitantes del equipo o instrumentos empleados en el ensayo.

En el presente trabajo, se realiza el modelo de elementos finitos de una estructura de acero que se ensayó en la mesa vibradora del Instituto de Ingeniería de la UNAM. Con las frecuencias analíticas y la fundamental experimental, se emplea una ecuación que emplea ambos datos (Ángeles, 2012), con la cual se obtienen las frecuencias sin identificar en las pruebas de vibración. Así mismo, se propone una ecuación alternativa de actualización, basada en el error relativo existente entre alguna frecuencia experimental identificada y su contraparte analítica.

# CAPÍTULO 1

## ACTUALIZACIÓN DE MODELOS

La actualización de modelos, es esencialmente un procedimiento en el que se ajustan ciertos parámetros del modelo de elementos finitos (módulos de elasticidad y de cortante, dimensiones de las secciones transversales de los elementos, etcétera). Emplea los datos modales del modelo analítico y los obtenidos mediante experimentos de su contraparte real, con la finalidad de que ambos coincidan de la manera más aproximada posible.

### 1.1. PANORAMA GENERAL

Los modelos de elementos finitos en la actualidad son de suma importancia en diversas ramas de la ingeniería. La ingeniería estructural se enfoca en modelar, con ayuda de programas de análisis especializados, STAAD (STAAD, 2007), ETABS (ETABS, 2013), por nombrar algunos, estructuras de diversa naturaleza. Los modelos usualmente no son una réplica “fidedigna” de lo que la realidad representa y en muchas ocasiones los cálculos obtenidos difieren de los resultados experimentales. La manera de reducir dicha discrepancia, es modificando las consideraciones en el modelado y ciertos parámetros, hasta que la relación entre las predicciones analíticas y los resultados experimentales es satisfactoria.

El modo más sencillo de abordar lo anterior se consigue mediante un método de prueba y error. Sin embargo, consume demasiado tiempo y en algunos casos no logra ser factible. Para evitar el procedimiento mencionado se emplea la actualización de modelos, técnica que modifica o actualiza las incertidumbres de los parámetros del modelo inicial, basado en los resultados de los experimentos realizados. Con ello, se logra un modelo más refinado y cercano a la realidad. Esta técnica básicamente usa los datos modales obtenidos de la experimentación (frecuencias naturales y modos de vibrar).

### 1.2. PRUEBAS DE VIBRACIÓN

Un aspecto primordial en la actualización de modelos es la recopilación de resultados experimentales mediante pruebas de vibración. La ejecución adecuada de éstas es importante para recabar datos correctos, de modo que estos sirvan para análisis posteriores. Las pruebas de vibración se realizan en laboratorio o en campo con varios propósitos, entre ellos se encuentran:

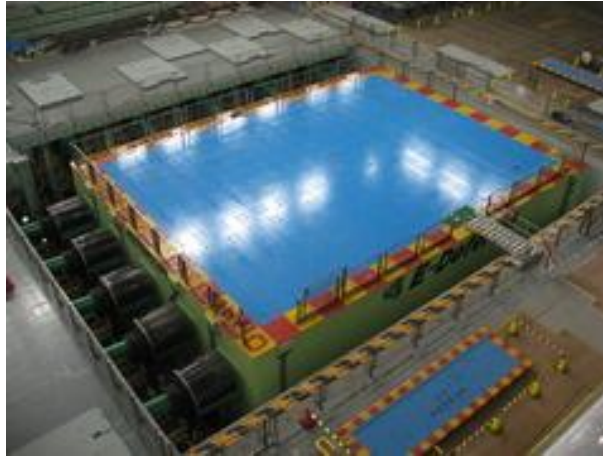
- Obtención de las propiedades dinámicas de la estructura.
- Determinación del deterioro en un punto de la estructura.
- Seguimiento del comportamiento de la estructura bajo condiciones de servicio.
- Determinación del comportamiento de la estructura bajo acciones dinámicas y/o estáticas.

La realización de las pruebas consta principalmente de cuatro componentes (Friswell y Mottershead, 1995): el sistema de montaje; el equipo para excitar la estructura; transductores; y

algún método para analizar los datos obtenidos. A continuación se describen de manera breve los tópicos enunciados.

### **1.2.1. Sistema de montaje**

El sistema que se emplee para mantener fija a la estructura durante la prueba es variable. Por ejemplo, si se realizan pruebas in situ de una torre, poste o marco; éstas se encontrarán empotradas al terreno por lo que el mismo suelo es el sistema de montaje. Por otro lado, si los ensayos se ejecutan en una mesa vibradora (Figura 1.1), los elementos a probar se sujetan a la mesa por medio de tornillos o algún medio que garanticen su unión adecuada con ésta.



**Figura 1.1. Mesa vibradora del Centro de Investigación en ingeniería sísmica de Hyogo, Japón ([www.kpaa.com](http://www.kpaa.com))**

### **1.2.2. Excitación de la estructura**

Principalmente existen dos métodos para excitar la estructura. Ya sea mediante un sistema vibrador que le suministre una fuerza determinada, o que sea golpeada con un martillo instrumentado. Ambos métodos tienen sus ventajas y desventajas; y el empleo de uno u otro dependerá del equipo disponible, del tipo estructura a analizar y los fines para los cuales se emplearán los datos obtenidos.

#### **1.2.2.1. Sistemas vibradores**

Los sistemas vibradores pueden ser electrohidráulicos o electromagnéticos. En los primeros, la fuerza es suministrada a la estructura mediante actuadores hidráulicos; mientras que en los electromagnéticos, es proporcionada a través un eje conectado a una bobina; a la cual se le transmite una señal eléctrica con la finalidad de generarle movimiento.

Para excitar la estructura, puede ser empleado más de un tipo de vibrador. El empleo de múltiples vibradores distribuye la energía provista a la estructura de mejor manera y enriquece la captura de datos en el experimento, lo cual incrementa la precisión en análisis posteriores.

### 1.2.2.2. Martillo instrumentado

En este método se golpea la estructura con un martillo instrumentado (Figura 1.2), el cual posee un transductor de fuerza justo debajo su cabeza. Con el impacto se genera una ligera vibración en la estructura.

El método puede ser empleado tanto en laboratorio como en campo. Desafortunadamente, en ocasiones no se logra aplicar una fuerza suficiente como para provocar en la estructura una respuesta satisfactoria y la ejecución de numerosos impactos la pueden dañar.



Figura 1.2. Martillo instrumentado ([www.testconsult.co.uk](http://www.testconsult.co.uk))

### 1.2.3. Transductores

Los transductores son dispositivos que posibilitan la conversión de magnitudes físicas en magnitudes eléctricas.

Los transductores basados en las propiedades piezoeléctricas de los materiales son utilizados generalmente para medir la fuerza empleada para excitar la estructura y su respuesta. La deformación en los materiales piezoeléctricos que contienen los transductores genera una carga eléctrica, que puede ser convertida en voltaje para su posterior procesamiento.

Existen transductores de desplazamiento, de velocidad, de fuerza (celdas de carga), entre otros. Los transductores más comunes empleados en pruebas de vibración son los acelerómetros (Figura 1.3). Estos consisten en una masa conectada a la estructura a través de un material piezoeléctrico que actúa como un resorte rígido. Este sistema tiene una amplitud de frecuencia propia la cual debe ser mayor a la de interés en el experimento.



Figura 1.3. Acelerómetros piezoeléctricos ([www.mmf.de](http://www.mmf.de))

#### **1.2.4. Análisis de datos**

Las señales provenientes de los instrumentos colocados en los modelos durante las pruebas de vibración, son procesadas mediante convertidores análogo-digitales. Por medio de estos se envían señales al equipo operado en las pruebas.

### **1.3. MÉTODOS EMPLEADOS EN LA ACTUALIZACIÓN DE MODELOS**

Los métodos usados en la actualización de modelos pueden dividirse en métodos directos y en métodos iterativos. Ambos utilizan datos modales y parámetros físicos (módulos de elasticidad y momentos de inercia). Su objetivo es mejorar la correlación que existe entre los datos medidos y los calculados por el modelo analítico.

Se deben tener en cuenta las ventajas y desventajas que los diferentes métodos poseen, y elegir el mejor al momento de la actualización de un modelo.

#### **1.3.1. Métodos directos**

Para entender las ventajas y desventajas de los métodos directos empleados en la actualización de modelos, se debe analizar lo que hacen, donde puede haber errores y cómo influyen en el modelo actualizado.

Los métodos directos reproducen los datos medidos de manera exacta. Esto es una ventaja en tanto que el modelo actualizado es capaz de reproducir los datos proporcionados. Por otro lado, los datos medidos difieren de los analíticos, debido al ruido captado e imperfecciones en el modelado. Los métodos optimizan los parámetros en el modelo, pero si éste una vez actualizado, reproduce de manera exacta mediciones imprecisas, cualquier análisis posterior podría tener defectos. Así, en los métodos directos, el modelado debe ser lo más preciso posible y las mediciones de la mejor calidad.

Los métodos directos desarrollan modelos capaces de replicar datos medidos, los cuales se denominan como “figurativos” (Friswell y Mottorshead, 1995). Un problema particular de los modelos figurativos es que la matriz de masa y de rigidez actualizadas, tienen muy poco significado físico y no pueden ser relacionadas a cambios físicos en los elementos finitos del modelo original.

Los métodos directos no garantizan la ausencia de modos superiores dentro de la amplitud de la frecuencia de estudio. En la práctica, lo anterior no representa ningún problema, aunque es recomendable revisar siempre el modelo actualizado para asegurar que los modos medidos son reproducidos y que modos de vibración superiores no estén presentes.

Con los métodos directos se calcula una solución para la matriz de masa y/o de rigidez empleando las ecuaciones de movimiento y ortogonalidad. Estos métodos que actualizan de manera directa los elementos de la matriz de masa y de rigidez son procedimientos que constan de un solo paso. Utilizan las propiedades modales, sin embargo, no toman en cuenta los parámetros físicos que son actualizados. Consecuentemente, aunque el modelo de elementos finitos es capaz de predecir cantidades medidas, el modelo actualizado está limitado en los siguientes aspectos:

- Carencia de la conectividad en los nodos: La conectividad de los nodos es la unión que existe entre los elementos de una estructura y es un fenómeno que ocurre de manera natural en los modelos de elementos finitos.
- Las matrices actualizadas resultan ser no diagonales.

#### **1.3.1.1. Métodos de los multiplicadores de Lagrange**

Los métodos de los multiplicadores de Lagrange consisten en minimizar una función sujeta a ciertas restricciones. Dichos métodos consideran los parámetros modales medidos y las matrices analíticas de masa y de rigidez. Entre estos métodos se encuentran los de Baruch (Baruch, 1978), Berman y Nagy (1983), entre otros.

#### **1.3.1.2. Mezcla de matrices**

Si todos los modos de la estructura son medidos respecto a todos los grados de libertad del modelo analítico, se puede construir de manera directa la matriz de masa y de rigidez. La primera se construye empleando los modos de vibrar, mientras que para la obtención de la segunda, se necesitan tanto los modos de vibrar como las frecuencias naturales.

Generalmente, la cantidad de datos medidos es incompleta. El número de modos medidos es menor que el de los grados de libertad analíticos y la respuesta de la estructura, es medida únicamente respecto a un número limitado de coordenadas. De modo que es necesario expandir los datos modales analíticos para calcular los datos medidos en los grados de libertad que no fueron registrados.

### **1.3.2. Métodos iterativos**

Los métodos iterativos determinan la correlación entre los datos medidos y los experimentales mediante una función de penalización. Esta función emplea los modos de vibrar y las frecuencias naturales. Debido a la naturaleza de dicha función, la solución requiere que el problema sea linealizado y optimizado de manera iterativa. Estos métodos permiten que una amplia gama de parámetros sean actualizados.

Los métodos iterativos relacionan los datos medidos y los correspondientes cálculos analíticos, por lo que se debe cuidar que las frecuencias naturales y los modos de vibrar tanto experimentales como teóricos coincidan de manera adecuada.

Ordenar las frecuencias naturales en orden ascendente no es suficiente. Dos frecuencias, una experimental y una analítica, pueden tener un valor muy parecido y sin embargo, carecer de relación con sus respectivos modos. Por ejemplo, la frecuencia de menor valor obtenida analíticamente puede corresponder a un modo de vibrar de la estructura en una misma dirección, mientras que la frecuencia experimental más baja puede corresponder a un modo de torsión.

Dicho problema puede ser resuelto con el criterio de correlación modal (MAC, por sus siglas en inglés). Éste es una herramienta usada para comparar cuantitativamente la correspondencia existente entre los modos de vibrar analíticos y los experimentales. El MAC arroja resultados entre 0 y 1. Los valores mayores de 0.9 indican una relación consistente, mientras que los cercanos a 0 demuestran ausencia de concordancia. Los modos que no cumplan con el criterio de manera contundente simplemente no se emplean en los algoritmos de actualización.

### **1.3.3. Métodos de identificación de errores**

Los métodos de identificación de errores emplean tanto la matriz de masa y de rigidez como los datos modales. Estos métodos se enfocan en ubicar las regiones modeladas de manera errónea en el modelo analítico, en vez de mejorarlo de manera global. Dichas regiones pueden ser puntos específicos en la estructura, por ejemplo, la unión entre dos elementos barra. Ésta se puede hallar empotrada en el modelo experimental y en el modelo analítico se puede encontrar modelada erróneamente como una articulación. Si la ubicación de los sitios modelados de manera inadecuada es satisfactoria, el modelo puede ser mejorado en estos puntos haciéndolo más eficiente.

## **1.4. ERRORES E INCERTIDUMBRES EN LA ACTUALIZACIÓN DE MODELOS**

### **1.4.1. Errores en el modelo de elementos finitos**

El modelo de elementos finitos es una réplica de un modelo real, realizada con ayuda de tecnologías computacionales de cualquier objeto o estructura, con la finalidad de estudiar su comportamiento.

Es de suma importancia atender los errores que se cometen al momento del modelado, ya que aunque la actualización de modelos es una técnica efectiva para lograr una buena semejanza entre el modelo experimental y el analítico, no servirá si este último no es una representación lo más cercana a la realidad.

Mottershead et al. (2011) enuncian algunos errores típicos que se pueden hallar en el modelo:

Errores en la idealización del modelo provenientes de ciertas consideraciones al caracterizar el comportamiento mecánico de la estructura real tales como:

- Simplificaciones de la estructura, por ejemplo, si se quiere modelar una placa como una viga, lo cual puede o no ser erróneo dependiendo de la relación largo-ancho de la placa.
- Errores en el modelado de las condiciones de frontera.
- Errores en la unión entre elementos, en ciertas ocasiones los elementos no se encuentran conectados entre sí y en otras lo están cuando físicamente no se hallan de dicha manera.
- Errores en el modelado de los nodos, por ejemplo, asignar un empotramiento a un elemento cuando éste se encuentra articulado o viceversa.
- Consideraciones erróneas en la asignación de cargas externas.
- Consideraciones erróneas en la geometría de la estructura.

Consideraciones incorrectas en los parámetros del modelo, por ejemplo:

- Parámetros del material como el módulo de Young o la densidad.
- Espesor de placas.

- Rigideces.
- Secciones transversales de los elementos barra.

#### **1.4.2. Incertidumbres en las pruebas de laboratorio**

Durante los experimentos surgen dificultades prácticas, las cuales comúnmente resultan en la obtención de resultados inexactos.

Algunos aspectos que pueden ser fuente de mediciones imprecisas son:

- La dinámica de las estructuras se ve afectada por las masas y rigideces del equipo empleado tanto para excitarlas como para medir su respuesta.
- Incertidumbres en las frecuencias naturales, comunes en los análisis modales debido a la masa de los acelerómetros, el movimiento transversal de estos y el ruido producido por los cables de conexión que ocupan.
- Transductores piezoeléctricos, pues tienden a perder linealidad bajo frecuencias bajas y pueden ser sensibles a la temperatura o campos magnéticos.
- El movimiento transversal de los acelerómetros y el ruido producido por los cables de conexión que estos emplean.
- Calibración errónea de los instrumentos.



## **CAPÍTULO 2**

### **LA ACTUALIZACIÓN DE MODELOS COMO HERRAMIENTA EN EL SEGUIMIENTO DE LA SALUD ESTRUCTURAL**

El seguimiento de la salud estructural (SHM, por sus siglas en inglés), actualmente es un campo de gran importancia en las ingenierías civil, aeronáutica y automotriz. Éste se enfoca en utilizar y desarrollar métodos para detectar daño en las estructuras de interés en las áreas mencionadas.

#### **2.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROCESO DE SEGUIMIENTO**

Para realizar un seguimiento se debe determinar la manera en que éste se llevará a cabo; las condiciones tanto ambientales como operacionales bajo las cuales se dará seguimiento a la estructura; y los motivos por los que se efectuará. Ya sea por cuestiones económicas o de seguridad de las personas.

Una vez que se decide ejecutar el seguimiento, se procede a la selección de sensores a usar, los lugares en los que se tienen que ubicar, el número apropiado de sensores a emplear y el equipo que procese los datos adquiridos por estos. Ya capturados los datos de varios sensores, estos se integran de modo que en conjunto, sean de mayor utilidad para detectar un posible daño de manera más confiable. Caso contrario a lo que sucede si se emplean los datos de un sensor de manera aislada.

Después de analizar los datos, se usan distintos métodos para determinar la existencia de un daño en la estructura. Una breve descripción de algunos de estos procesos se realiza más adelante.

#### **2.2. IDENTIFICACIÓN DE DAÑO**

Se puede definir como daño a cualquier alteración que ocurra en un elemento estructural, la cual modifique su correcto desempeño.

La detección del cambio significativo en el funcionamiento apropiado de una estructura, da pauta a la ubicación adecuada del daño, de modo que éste pueda ser reparado.

Los efectos que causan daño en una estructura pueden ser clasificados como lineales y no lineales, (Doebeling et al., 1996). En los primeros, aun después del daño, la estructura mantiene un comportamiento lineal, por consiguiente, si el daño es no lineal, la estructura se desempeñará en este intervalo. Un ejemplo de un daño no lineal, es la formación de una grieta en una viga debido a la fatiga. Probablemente ésta incremente su tamaño bajo las condiciones habituales de servicio en las que se encuentre.

Rytter (1993) definió un sistema de clasificación de métodos para identificación de daño en cuatro niveles, como se muestra a continuación:

- Nivel 1: Determinación de un daño existente en la estructura.
- Nivel 2: Determinación de la ubicación geométrica del daño.
- Nivel 3: Cuantificación de la severidad del daño.
- Nivel 4: Predicción del tiempo remanente de servicio de la estructura.

Los tres primeros niveles se relacionan directamente con la dinámica de las estructuras, mientras que el cuarto, concierne a los campos de mecánica de fracturas, análisis de fallas o diseño estructural.

A continuación se presenta una breve descripción de los métodos empleados en la detección de daño.

### **2.3. MÉTODOS PARA LA DETECCIÓN DE DAÑO**

La localización de anomalías en las estructuras mediante métodos no destructivos, se ha incrementado con la finalidad de reducir los costos de mantenimiento y aumentar el nivel de seguridad en éstas. Por lo consiguiente, se requiere el uso de numerosas técnicas experimentales y analíticas.

#### **2.3.1. Métodos experimentales**

Los métodos de detección de daño más comunes consisten en localizar deterioros de manera experimental. Entre estos se encuentran los métodos acústicos, la captura de radiografías y termografías, por nombrar algunos. Estos métodos detectan básicamente la presencia de grietas y corrosión en el material.

##### **2.3.1.1. Emisión acústica**

Todos los materiales sólidos tienen un cierto nivel de elasticidad antes de una fractura en los mismos. La aplicación de fuerzas externas puede exceder este nivel, lo cual resulta en una falla del material (Boller y Staszewski, 2004). La expulsión inminente de la energía al momento de la falla se denomina emisión acústica. Dicha energía puede ser liberada debido a la fricción, deformación microscópica, fracturas y corrosión en los metales, etcétera. La energía emitida a partir del daño puede ser registrada en forma de señales acústicas. Ciertas características de las señales pueden ser empleadas para la detección del daño. Entre éstas se encuentran: la duración de la señal, la amplitud de la misma, el tiempo de llegada, entre otras. Los eventos de emisión acústica ocurren en una amplitud que se encuentra entre 10 kHz y 1 MHz. La emisión acústica puede ser registrada usando varios tipos de sensores colocados en los miembros de una estructura (Figura 2.1), tales como acelerómetros o micrófonos.

Con este método se puede dar seguimiento al estado estructural de los elementos sin importar la geometría que posean.



**Figura 2.1.** Viga instrumentada con transductores para la detección de sonidos ultrasónicos ([www.iti.northwestern.edu](http://www.iti.northwestern.edu))

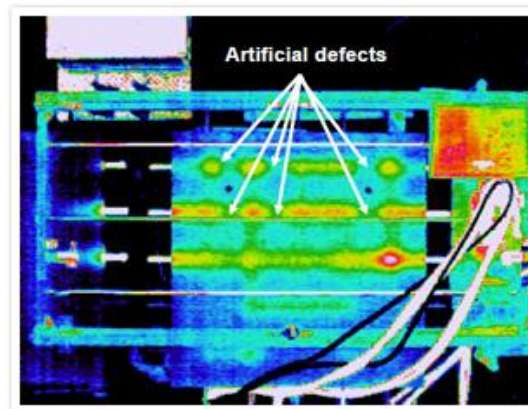
### **2.3.1.2. Captura de radiografías**

Las técnicas que usan radiografías emplean numerosas formas de rayos gamma y rayos X para realizar la inspección del material. El experimento consiste en tomar una radiografía de algún espécimen a analizar y en ésta, detectar anomalías tales como grietas o algún desperfecto que pueda tener el elemento estudiado.

El seguimiento con las radiografías es altamente efectivo y relativamente barato. Por otro lado, sólo se pueden tomar radiografías de elementos aislados, que lo hace ineficiente para revisar estructuras con numerosos componentes, tales como edificios.

### **2.3.1.3. Inducción térmica**

La inducción térmica consiste en tomar termografías (Figura 2.2) sobre las superficies de las estructuras. Ésta emplea la conductividad térmica de los defectos en los materiales. Las superficies revisadas radian energía mediante longitudes de onda correspondientes a sus temperaturas. Dicha energía es transformada en imágenes térmicas, las cuales pueden ser utilizadas para ubicar anomalías en el material.



**Figura 2.2.** Termografía de una superficie de concreto reforzado ([www.penta-ocean.co.jp](http://www.penta-ocean.co.jp))

### **2.3.2. Métodos analíticos**

Los métodos analíticos emplean modelos matemáticos para detectar daño en las estructuras.

#### **2.3.2.1. Métodos basados en las frecuencias de la estructura**

Con estos métodos es posible resolver dos problemas, el directo y el inverso. El primero consiste en calcular los cambios en las frecuencias de la estructura a partir de una anomalía potencial en la misma. Generalmente, el daño es modelado matemáticamente y posteriormente las frecuencias experimentales se comparan con las analíticas para determinar la importancia de éste. Lo anterior se realiza con la finalidad de visualizar los efectos que la avería podría tener en la estructura.

En el problema inverso, se identifica la presencia de un daño debido a un cambio en la frecuencia de la estructura.

#### **2.3.2.2. Métodos basados en la actualización de modelos**

Los métodos se caracterizan por emplear datos modales y reproducir las características dinámicas de la estructura. Los daños en ésta automáticamente provocan modificaciones en sus propiedades dinámicas. Bajo esta premisa, los métodos de actualización de modelos identifican deterioros en las estructuras. Los métodos descritos en el capítulo 1 del presente trabajo pueden ser de utilidad en el SHM.

## **2.4. SEGUIMIENTO DE LA SALUD ESTRUCTURAL EN LA INGENIERÍA CIVIL**

Toda obra de ingeniería civil a lo largo de su vida sufre deterioros en los elementos que la componen. Las averías pueden ser provocadas por las condiciones de operación bajo las que se encuentra expuesta la estructura o acciones accidentales tales como un sismo. Es indispensable ubicar y atender los daños presentes, ya que estos pueden significar una falla en la estructura que provoque pérdidas económicas; y todavía más importante, vidas humanas.

La metodología clásica de detección de daño consiste en realizar inspecciones visuales en la estructuras, con la finalidad de localizar elementos estructurales dañados. Desafortunadamente, en ocasiones estos pueden ser imperceptibles, por ejemplo, debido a la presencia de componentes arquitectónicos (plafones, acabados, etcétera), que impidan su ubicación a simple vista.

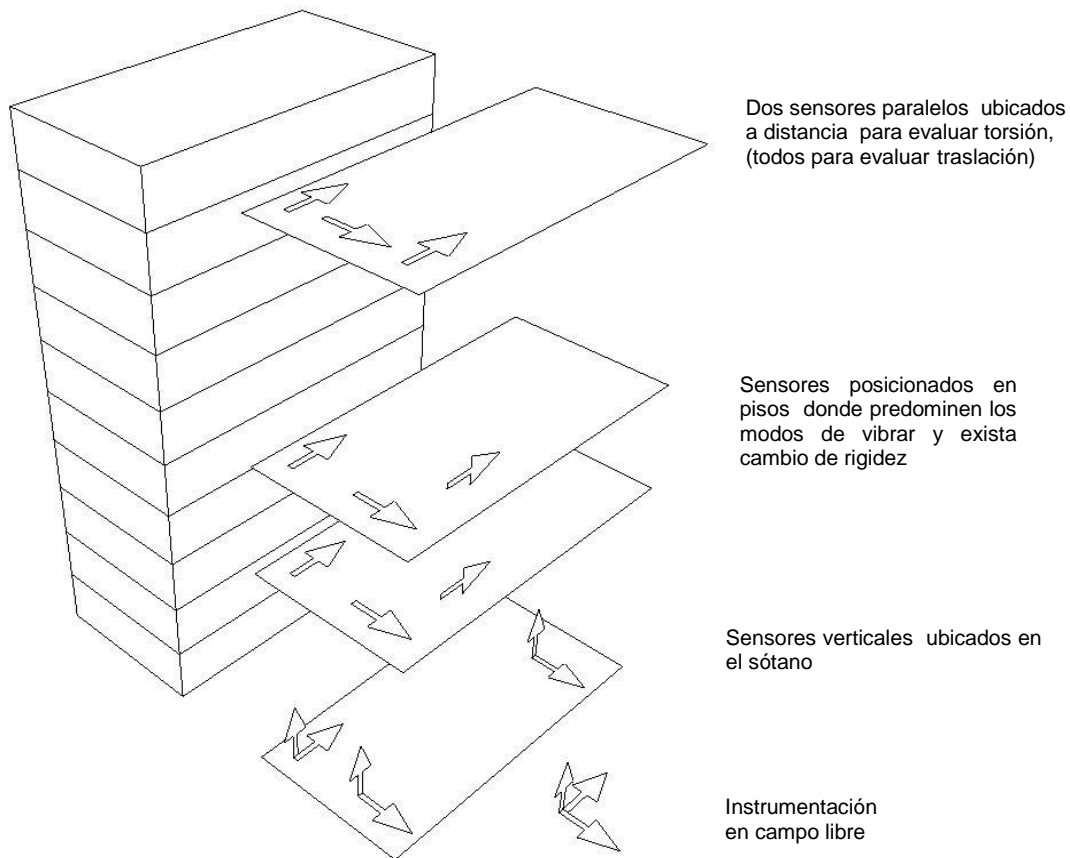
Para evitar lo anterior, se ejecutan pruebas dinámicas que constituyen una buena metodología para el SHM, ya que se pueden obtener datos de manera confiable. El cambio en las frecuencias de la estructura y sus correspondientes modos de vibrar, indican que ésta probablemente ha sufrido algún daño.

### **2.4.1. Instrumentación en pruebas de campo**

Una estructura instrumentada debe proveer suficiente información para reconstruir la respuesta de ésta con el máximo detalle y así, poderla comparar con la predicha por los modelos analíticos.

Los sensores más empleados en la instrumentación son los acelerómetros. Estos son colocados con un cierto arreglo en la estructura dependiendo de la respuesta de interés. Rojahn y Matthiesen (1977), concluyeron que la respuesta predominante de un rascacielos, puede ser descrita por la

participación de los primeros cuatro modos de vibrar en tres formas de movimiento (dos traslacionales y una de torsión); por lo tanto, para el registro de dichos modos es necesario un mínimo de doce acelerómetros. Si es de interés el movimiento en dirección vertical, se deben colocar al menos tres acelerómetros en el sótano de la estructura. El tipo de instrumentación descrito es denominado como instrumentación ideal extensiva (Figura 2.3). Como complemento a ésta, es recomendable realizar una instrumentación en campo libre (Celebi, 2013), de manera que se recabe información acerca de la interacción del suelo con la estructura. Los sensores en campo libre generalmente se colocan a una distancia mayor de 1.5 – 2 veces la altura del edificio de mayor tamaño y cercanía respecto al complejo en estudio. Lo anterior con el objeto de que la vibración de edificios cercanos no influya en el experimento.



**Figura 2.3. Instrumentación ideal extensiva (Celebi, 2000)**

#### **2.4.1.1. Instrumentación con nuevas tecnologías**

En los últimos años, se han desarrollado tecnologías para la medición en tiempo real de los desplazamientos en las estructuras. Lo anterior con el objetivo de establecer procedimientos de valoración de la infraestructura posteriori a un evento sísmico. La medición del desempeño de una estructura durante un sismo, es útil para determinar si se lleva a cabo o no, una revisión exhaustiva de ésta después del movimiento telúrico.

Una técnica innovadora para la medición de desplazamientos es el empleo de Sistemas de Posicionamiento Global (GPS, por sus siglas en inglés), (Celebi y Sanli, 2002).

Como toda tecnología, el empleo del GPS tiene sus pros y sus contras. Por un lado, las unidades GPS actuales tienen una precisión de hasta +/- 1 mm. Una limitante de esta tecnología, es la amplitud a la cual puede tomar datos. Ésta se encuentra entre los 10 y 20 Hz, y las mediciones pueden ser realizadas sólo si los GPS se posicionan en el techo de la estructura.

Como alternativa, el edificio se instrumenta con acelerómetros convencionales y se instala en la estructura un servidor que procesa los datos in situ y los envía de manera continua vía internet a un usuario remoto. Con lo anterior, se puede tener un seguimiento adecuado del desempeño de la estructura en cualquier momento.

## **2.5. APLICACIÓN DE LA ACTUALIZACIÓN DE MODELOS EN EL SEGUIMIENTO DE LA SALUD ESTRUCTURAL**

### **2.5.1. Puente peatonal de concreto reforzado**

Barton et al. (2011) participaron en un proyecto colaborativo en el cual tomaron parte más de 40 compañías e instituciones académicas. En éste se empleó un puente peatonal de concreto reforzado (Figura 2.4) con un peso de aproximadamente 15 t, 5 m de altura y 20 m de largo.



**Figura 2.4. Puente peatonal estudiado (Barton et al., 2011)**

Con la finalidad de registrar desplazamientos, esfuerzos en los materiales del puente, entre otros, la estructura de más de 40 años de antigüedad, fue estudiada con diversas técnicas de SHM,

Una parte importante del proyecto consistió en realizar una actualización del puente, para lo cual se obtuvieron las propiedades dinámicas de éste tanto experimental como analíticamente. En el primer caso se realizaron pruebas de vibración forzada, usando un vibrador electrodinámico en las direcciones vertical, lateral y longitudinal de la estructura. Del experimento se obtuvieron seis modos de vibrar con sus correspondientes frecuencias. De estos, se usaron los cinco que mostraron movimiento en dirección vertical. En lo que corresponde a la parte analítica, se desarrolló un modelo de elementos finitos del puente con el programa ABAQUS (ABAQUS CAE, 2010); del

cual, mediante un análisis modal, se identificaron los primeros diez modos de vibrar y sus respectivas frecuencias.

En el proceso de actualización se emplearon las frecuencias experimentales y analíticas, la densidad del concreto, el módulo de elasticidad, un coeficiente de rigidez y la temperatura del material. Éste resultó satisfactorio y contribuyó al entendimiento del comportamiento de la estructura.

### **2.5.2. Viga presforzada**

Mordini et al. (2007) desarrollaron dos modelos de elementos finitos en los programas ANSYS (ANSYS, 2005) y OpenSees (OpenSees, 2006) respectivamente, de una viga presforzada previamente analizada por Teughels (2003).

La viga consta de una sección transversal tipo I en todo su largo, mientras que al final de ésta, la sección es cuadrada. El presfuerzo de la viga se realizó con un cable postensado.

El experimento consistió en aplicar seis incrementos de carga, con la finalidad de lograr la aparición de grietas y la fluencia del refuerzo. Entre cada incremento se realizaron pruebas dinámicas, excitando la viga por medio de un impacto en uno de sus extremos. Durante éstas, se colocaron 74 sensores distribuidos a lo largo de todo el elemento. Los modos registrados experimentalmente indicaron flexión pura con la presencia de torsión, sin embargo, al no ser significativa se descartó.

La actualización de los modelos se realizó mediante un código de Scilab (Scilab, 2006) denominado VCUPDATE.

Para el modelo en OpenSees, este proceso se hizo en dos etapas. En la primera se actualizó el modelo inicial a un estado sin daño. Posteriormente, de dicho estado se ejecutó una actualización al modelo dañado. En la fase inicial, se ocuparon las tres primeras frecuencias y sus respectivos modos de vibrar, mientras que en la segunda, también se empleó la cuarta frecuencia y su modo correspondiente. El modelo realizado en ANSYS (ANSYS, 2005) fue actualizado directamente de su etapa inicial a la dañada.

La localización de averías en elementos presforzados resulta complicada, debido al cierre de grietas después de que una carga aplicada a estos es removida. Sin embargo, en el experimento con ayuda de los modos de vibrar y una actualización adecuada, las averías en la viga lograron ser ubicadas. En lo que respecta al uso de las frecuencias, éstas fueron útiles para detectar la fluencia del acero.

### **2.5.3. Puente carretero-ferroviario**

En 1960 se inició la construcción de un puente carretero-ferroviario de acero en la ciudad de Nanjing, China (Figura 2.5). La obra concluyó en 1968. Actualmente, éste es una arteria de suma importancia para la conectividad entre las metrópolis de Beijing y Shanghai, y es parte vital en la red carretera de la provincia de Jiangsu.

La necesidad de estudiar la integridad estructural, durabilidad y confiabilidad de la estructura, llevó a la implementación de un sistema permanente de SHM desde 2004. Dicho sistema cuenta con acelerómetros, deformímetros eléctricos, transductores de desplazamiento, entre otros; los cuales en conjunto suman más de 150 sensores. Las señales obtenidas del seguimiento fueron de ayuda para

la actualización de un modelo de elementos finitos de una sección del puente, realizado por Xu-hui et al. (2008).



**Figura 2.5. Puente carretero-ferroviario sobre el río Yangtsé. Nanjing, China (www.news.everychina.com)**

El modelo creado con el programa ANSYS (ANSYS, 2005), fue actualizado mediante un método iterativo, usando las frecuencias registradas en pruebas de vibración ambiental.

El modelo actualizado puede ser empleado como base para la detección de daño, valoración de la estructura, evaluación de la fatiga de los elementos estructurales y la predicción de la respuesta dinámica del puente.



## CAPÍTULO 3

### ESTRUCTURA DE ACERO ANALIZADA

Realizar el modelo de elementos finitos de una estructura real, puede resultar complicado en el sentido de que se tienen que caracterizar una gran cantidad de aspectos de ésta. Entre los más importantes se encuentran:

- Registrar con instrumentos de medición del modo más preciso posible, las dimensiones de los distintos elementos estructurales que componen al modelo.
- Determinar las propiedades de los materiales (resistencia a la compresión o a la tensión, módulo de elasticidad, entre otras) mediante pruebas de laboratorio.
- Cuantificar el peso de los materiales.
- Revisar meticulosamente las condiciones de frontera de los elementos.

Lo anterior puede ser una tarea laboriosa si no se dispone de alguna fuente que proporcione los datos mencionados, por ejemplo: planos arquitectónicos y estructurales, registros que indiquen las características físicas de los materiales, o alguna otra. Una vez obtenida la información necesaria de la estructura, la ejecución del modelo de elementos finitos se puede llevar a cabo. Para revisar qué tan adecuada resultó la modelación, se comparan las características dinámicas analíticas con aquéllas obtenidas de pruebas de vibración. Seguramente, existirá discrepancia entre ambas y el empleo de alguna técnica de actualización, será indispensable para refinar el modelo analítico.

En el presente trabajo se caracterizó, ensayó, actualizó y modeló una estructura de acero, cuidando cada detalle en la modelación. A diferencia de lo desarrollado actualmente, el modelo experimental se actualizó a partir del modelo de elementos finitos, logrando obtener las frecuencias experimentales sin identificar de la pruebas de vibración. A continuación se describe el proceso a detalle.

#### 3.1. DESCRIPCIÓN DEL MODELO EXPERIMENTAL

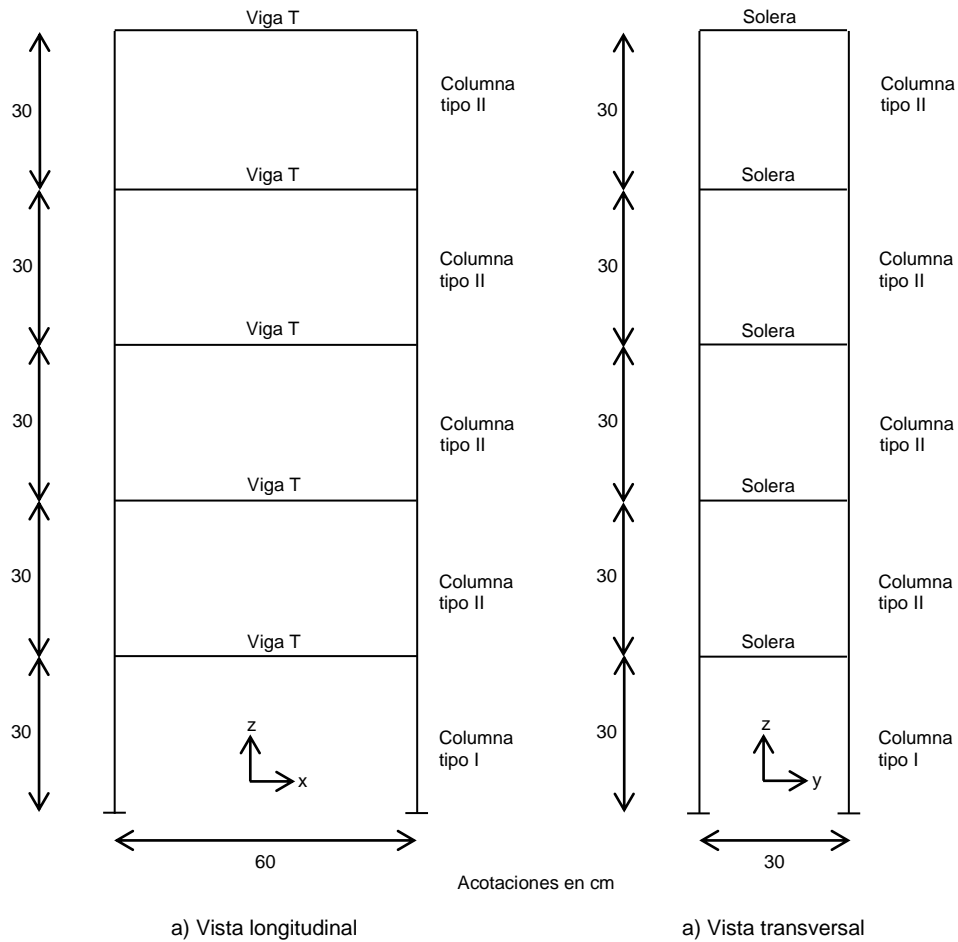
##### 3.1.1. Descripción general

El modelo experimental es un edificio de marcos rígidos con elementos de acero estructural normal A-36, con un límite de fluencia ( $F_y$ ) de  $2530 \text{ kg/cm}^2$  y un módulo de elasticidad ( $E$ ) de  $2 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ . Se compone de 5 pisos empotrados en la base (Figura 3.1). Consta básicamente de cuatro clases de elementos: vigas T, dos tipos de columnas y soleras. La disposición de estos en la estructura se muestra en la Figura 3.2.

Con la finalidad de proveer una masa representativa a la estructura, cada piso posee una placa de acero cuadrada de 40 cm de lado con 1 pulgada de espesor. Éstas se hallan atornilladas a vigas T, las cuales, a su vez, están ligadas a las columnas en sus dos extremos mediante una conexión. La masa de cada nivel se estimó en 25 kg.



**Figura 1.1. Modelo de acero analizado en el laboratorio de la mesa vibradora del Instituto de Ingeniería de la UNAM**

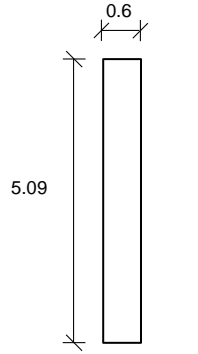


**Figura 3.2. Vistas longitudinal y transversal de la estructura**

### 3.1.2. Elementos estructurales

#### 3.1.2.1. Soleras

Las soleras funcionan como vigas y éstas se encuentran atornilladas a las columnas.



Acotaciones en cm

a) Sección transversal

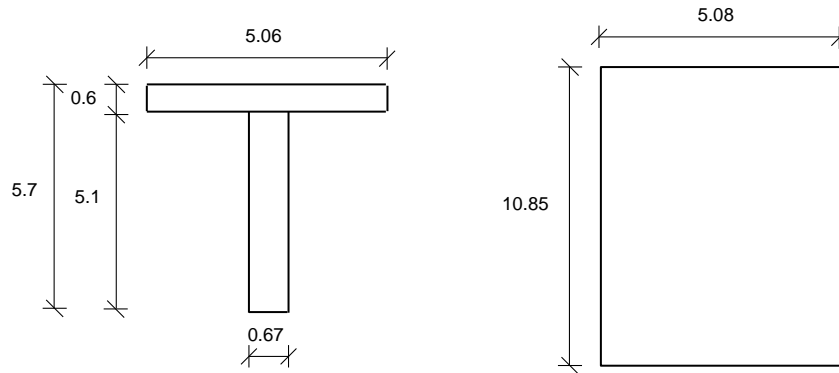


b) Colocación de soleras en el modelo

**Figura 3.3. Sección transversal de las soleras y vista de su colocación en el modelo**

#### 3.1.2.2. Vigas T

Las vigas T constan de dos placas soldadas intermitentemente de modo ortogonal, es decir, la soldadura se encuentra dispuesta en tramos discontinuos. A su vez, las vigas T tienen una placa soldada en cada uno de sus extremos, con el propósito de facilitar su unión a las columnas.



Acotaciones en cm

a) Sección transversal

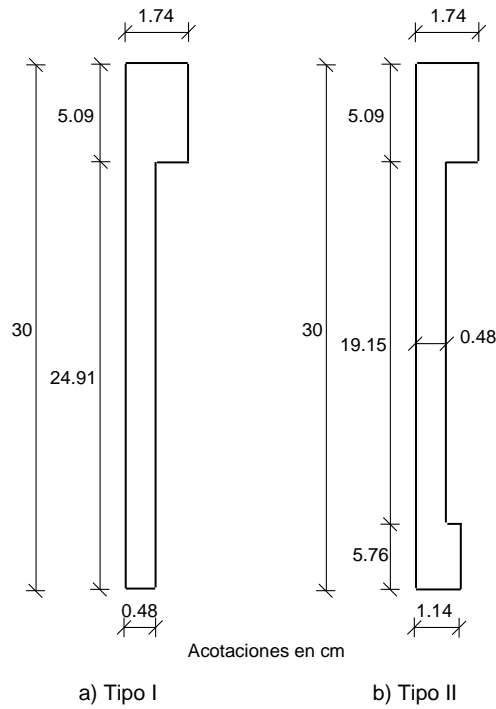
b) Placas

**Figura 3.4. Secciones transversales de vigas T y placas soldadas a éstas**

#### 3.1.2.3. Columnas

Las columnas poseen un ancho de 5.08 cm, éstas se clasifican en dos tipos. El tipo I consta de dos espesores distintos, mientras que el tipo II posee tres secciones diferentes. Esto se debe al empalme existente entre las soleras, las placas soldadas a las vigas T, así como la misma sección transversal

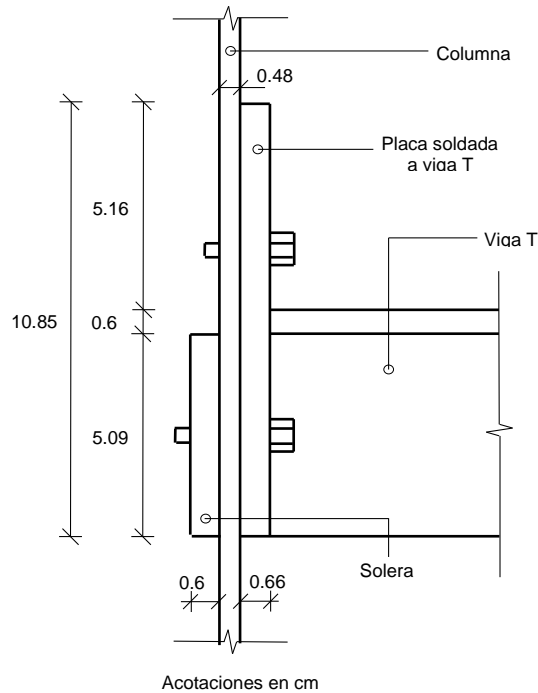
predominante en la columna. Lo anterior es de suma importancia en el comportamiento estructural, ya que proporciona rigidez a la estructura y, por lo tanto, influye en la dinámica de la misma.



**Figura 3.5. Vista lateral de las columnas**

**3.1.2.4. Conexión**

La conexión de la viga T y la solera a la columna, se muestra en la Figura 3.6.



**Figura 3.6. Conexión de vigas a columna**

### **3.2. DESCRIPCIÓN DEL MODELO DE ELEMENTOS FINITOS**

El modelo de elementos finitos de la estructura de acero se realizó en el programa SAP2000 (SAP 2000, 2010). Su desarrollo fue un procedimiento de prueba y error, en el cual se modificó el modelo de elementos finitos, hasta lograr una semejanza significativa en la frecuencia fundamental de éste con la experimental.

#### **3.2.1. Programa SAP2000**

El programa SAP2000 (SAP2000, 2010), es una herramienta computacional empleada para modelar y analizar estructuras de diversa configuración tales como puentes, edificios, armaduras, cascarones, entre otras. Algunas de sus características son:

- Posee una interfaz versátil que permite realizar modelos y visualizarlos ya sea en dos o tres dimensiones.
- Pueden aplicarse diversos tipos de cargas, tales como puntuales, lineales, móviles, etcétera.
- Es posible incluir una gran cantidad de elementos estructurales, inclusive cuando poseen sección variable o alguna sección transversal poco común.
- Efectúa análisis estáticos y dinámicos permitiendo observar el comportamiento de la estructura bajo diversas acciones.
- Incluye una amplia gama de códigos para el dimensionamiento de elementos de concreto y acero.

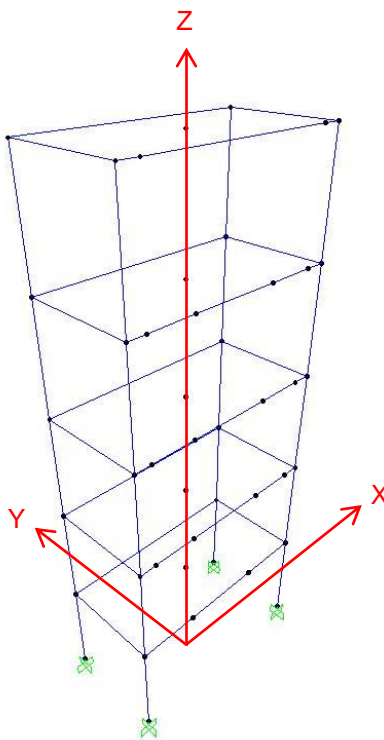
#### **3.2.2. Problemas en la elaboración del modelo de elementos finitos**

Durante el modelado se tuvieron principalmente dos problemas. El primero consistió en la realización de las placas de acero ubicadas en cada planta. Debido a la dificultad de su ejecución en el programa, se optó por modelarlas como un nodo en el centroide geométrico de cada piso. El segundo inconveniente fue la modelación de las columnas. En un inicio, se consideró una sección transversal desde la base hasta el último piso. Esto es erróneo, en virtud de que la unión entre las vigas y la misma columna, acortan la longitud efectiva de ésta. Por ello, fue necesario considerar dos tipos de columnas (Sección 3.2.1.3) contemplando el espesor real que tienen en el modelo. Con los detalles anteriores afinados y las consideraciones descritas a continuación, se llegó a un modelo adecuado.

#### **3.2.3. Consideraciones en el modelo de elementos finitos**

- Elementos estructurales con las características del acero A-36, descrito en la sección 3.1.1.
- Empotramiento en las columnas del piso 1.

- Giro alrededor del eje vertical y desplazamientos en los ejes horizontales ortogonales, como únicos grados de libertad por piso.
- Elementos estructurales sin peso propio.
- Ausencia de placas de acero presentes en el modelo experimental.
- Masas de las placas de acero y elementos estructurales de cada piso, contenidas en un nodo ubicado en el centroide geométrico de cada uno de ellos.
- Un diafragma por piso, asignado a los nodos localizados en cada planta.



**Figura 3.7. Vista tridimensional del modelo de elementos finitos para el programa SAP2000 (SAP2000, 2010)**

## CAPÍTULO 4

### ACTUALIZACIÓN DEL MODELO EXPERIMENTAL

#### 4.1. PRUEBA DE VIBRACIÓN

Las pruebas experimentales se llevaron a cabo en el laboratorio de la mesa vibradora del Instituto de Ingeniería de la U.N.A.M. El modelo se montó en la plataforma de la mesa y se fijó mediante tres tornillos garantizando su empotramiento apropiado (Figura 4.1).



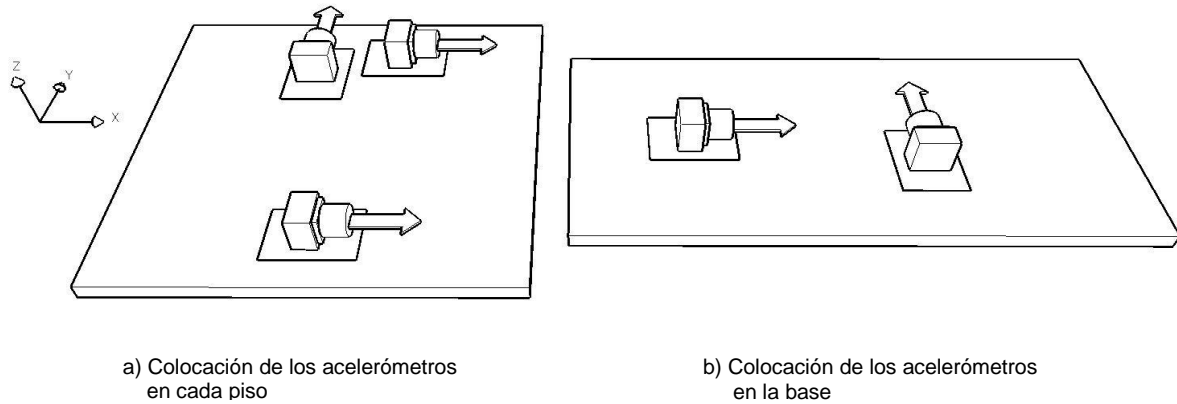
**Figura 4.1. Fijación de la estructura a la plataforma de la mesa vibradora**

##### 4.1.1. Instrumentación

La estructura se instrumentó con 17 acelerómetros uniaxiales. Cada uno de ellos se acopló a una pequeña base, misma que se adhirió con silicón a la superficie correspondiente de colocación, con la finalidad de tener una fijación adecuada de los instrumentos al modelo. Los acelerómetros se dispusieron en un plano horizontal de la siguiente manera:

- En la base, dos acelerómetros situados ortogonalmente.
- En los pisos 1 a 5, dos acelerómetros colocados para registrar movimiento en la dirección  $x$  y uno tercero en la dirección  $y$ .

La dirección de interés en las pruebas fue la  $x$  (dirección longitudinal), razón por la cual la mayoría de los acelerómetros fueron posicionados para registrar movimiento en ésta. El movimiento en la dirección del eje vertical no se evaluó en el presente experimento.



**Figura 4.2. Colocación y dirección de medición de los acelerómetros en la base y pisos 1 a 5**

En la tabla 4.1 se muestra el canal al cual fueron conectados los acelerómetros, el número de identificación, el piso en el cual se ubicaron con su respectiva dirección de registro y el intervalo de medición de cada uno.

**Tabla 4.1. Características generales de los acelerómetros**

Canal	Identificación del acelerómetro	Nivel / Dirección de registro	Intervalo nominal (g*)
2	733	Base / x	+/-4
3	734	Base / y	+/-4
4	735	1 / x	+/-4
5	736	1 / x	+/-4
6	737	1 / y	+/-4
8	738	2 / x	+/-4
9	739	2 / x	+/-4
10	902	2 / y	+/-2
11	903	3 / x	+/-2
12	904	3 / x	+/-2
13	905	3 / y	+/-2
14	906	4 / x	+/-2
15	907	4 / x	+/-2
16	908	4 / y	+/-2
17	909	5 / x	+/-2
19	910	5 / x	+/-2
20	911	5 / y	+/-2

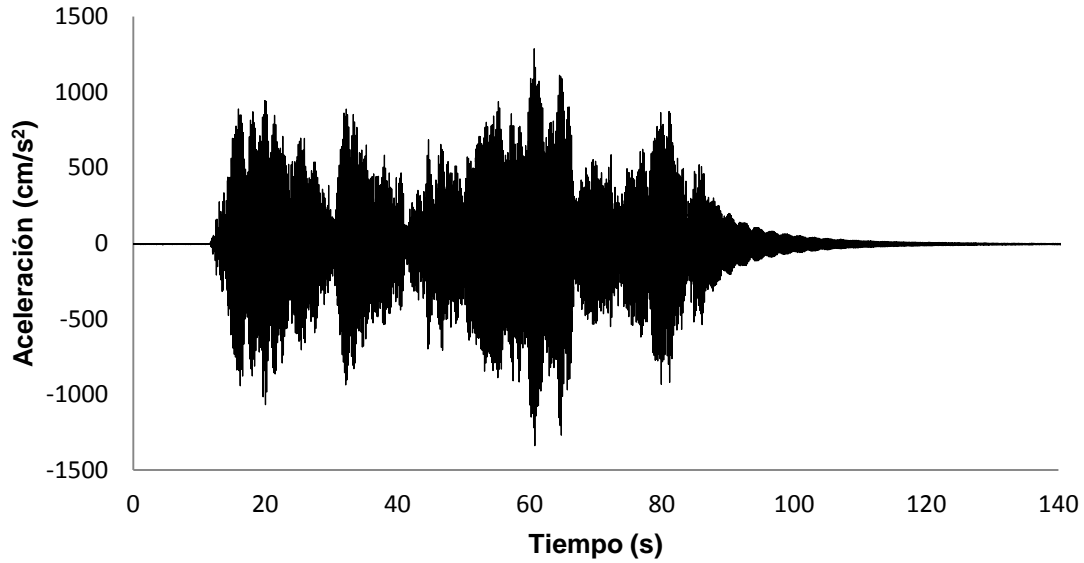
\*g, aceleración de la gravedad (9.81 m/s<sup>2</sup>)

#### 4.1.2. Excitación y respuesta del modelo

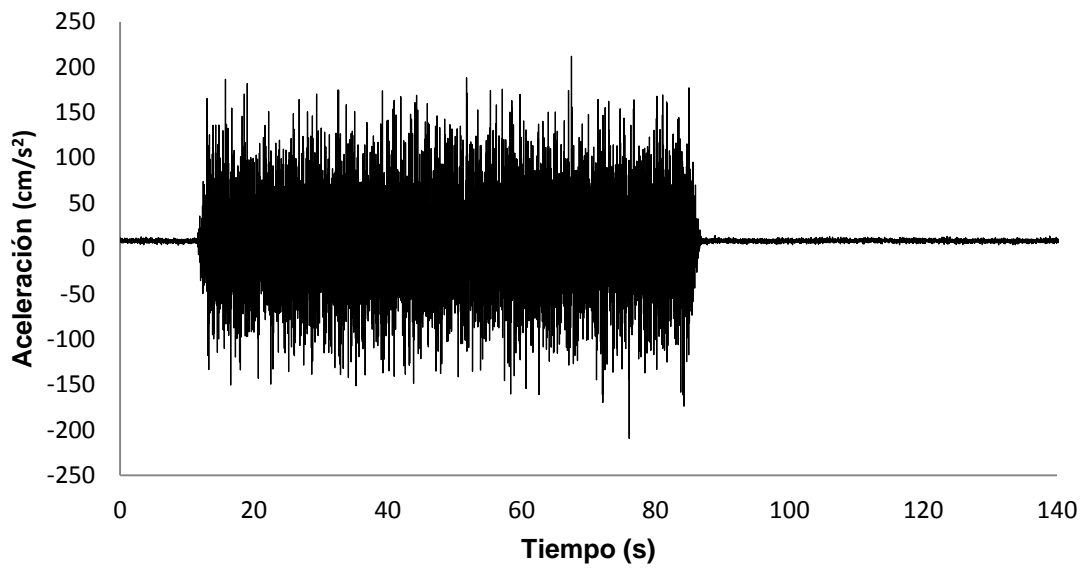
En la prueba de vibración se ejecutó un movimiento denominado ruido blanco, en un intervalo de frecuencias de 0.1 a 50 Hz. Una característica fundamental de éste, es que contiene todas las frecuencias en un intervalo definido y por lo tanto, la frecuencia fundamental del modelo.

La respuesta del modelo se registró mediante el sistema de adquisición de datos de la mesa vibratoria. En las figuras 4.3 y 4.4 se muestran las historias de aceleraciones registradas en el piso 5 y la base, respectivamente.





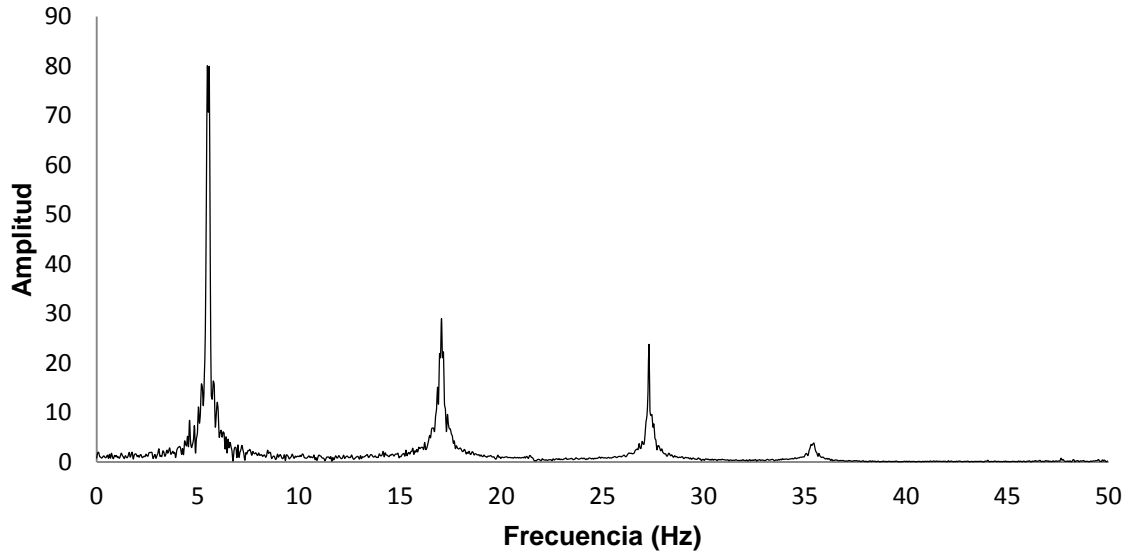
**Figura 4.3. Historia de aceleraciones registrada en el piso 5**



**Figura 4.4. Historia de aceleraciones registrada en la base**

En la figura 4.5. se muestra la función de transferencia (cociente espectral) entre los espectros de Fourier de las señales del piso 5 y la base, apreciándose claramente las frecuencias de 5.56, 17.04 y 27.29 Hz; correspondientes a los tres primeros modos de vibrar en la dirección longitudinal.

Más adelante se verá que la obtención de la frecuencia fundamental, es decir, aquélla con el valor más bajo en el espectro capturado, es suficiente para realizar la actualización del modelo.



**Figura 4.5. Función de transferencia entre los instrumentos del piso 5 y la base, dirección longitudinal**

## 4.2. RESULTADOS ANALÍTICOS

Los resultados analíticos indican el nivel de semejanza que tiene el modelo de elementos finitos con el modelo experimental. En la medida en que ambos se parezcan entre sí, se tendrá la certeza de que el modelo analítico fue el adecuado y que las imprecisiones cometidas resultaron ser mínimas.

### 4.2.1. Modos de vibrar

De un análisis modal realizado en el programa SAP2000 (SAP2000, 2010), se identificaron quince frecuencias con sus modos de vibrar asociados, siendo cinco modos en la dirección  $x$  (longitudinal), cinco modos en la dirección  $y$  (transversal), y cinco modos de torsión. De estos se obtuvieron las coordenadas modales normalizadas respecto a las del primer piso.

En las figuras 4.6 a 4.10, se muestran los diferentes modos de vibrar de la estructura y sus correspondientes coordenadas modales.

Se observa que la estructura presenta una rigidez significativa en la dirección longitudinal, contra lo que se muestra en la dirección transversal. Teniendo en esta última, un mayor desplazamiento en alguno de los modos asociado a dicha dirección, en comparación con el máximo registrado en la dirección longitudinal. En lo que respecta a los modos de torsión, aquéllos que se presentan en una frecuencia superior a los 50 Hz, generan deformaciones importantes a la estructura.

En todos los modos, se puede apreciar la falta de deformación en los nodos, con lo que se comprueba la importancia del modelado en esos puntos de la estructura. Los cuales aportan rigidez a la misma.

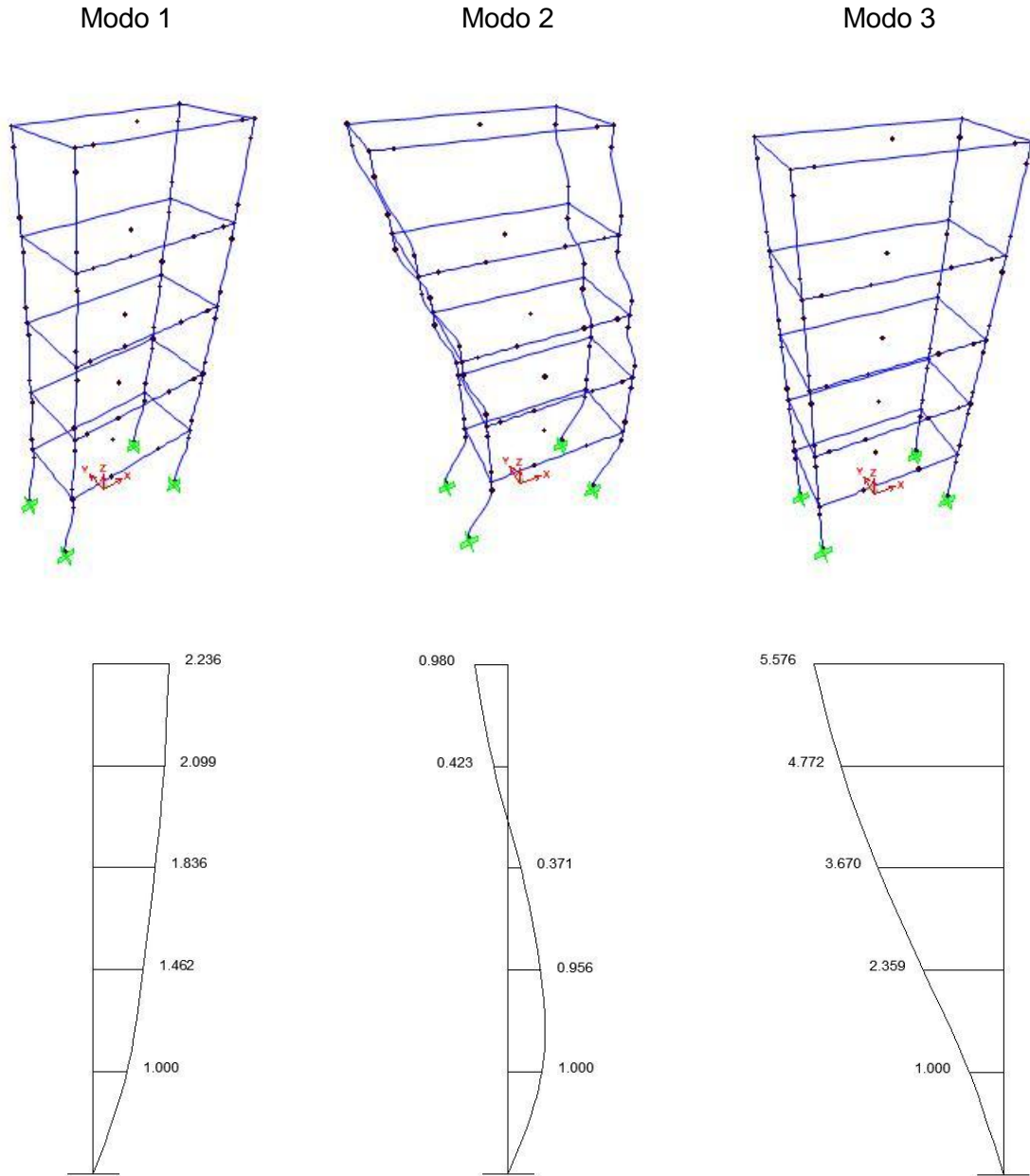


Figura 4.6. Modos de vibrar y coordenadas modales (1, 2 y 3) analíticos

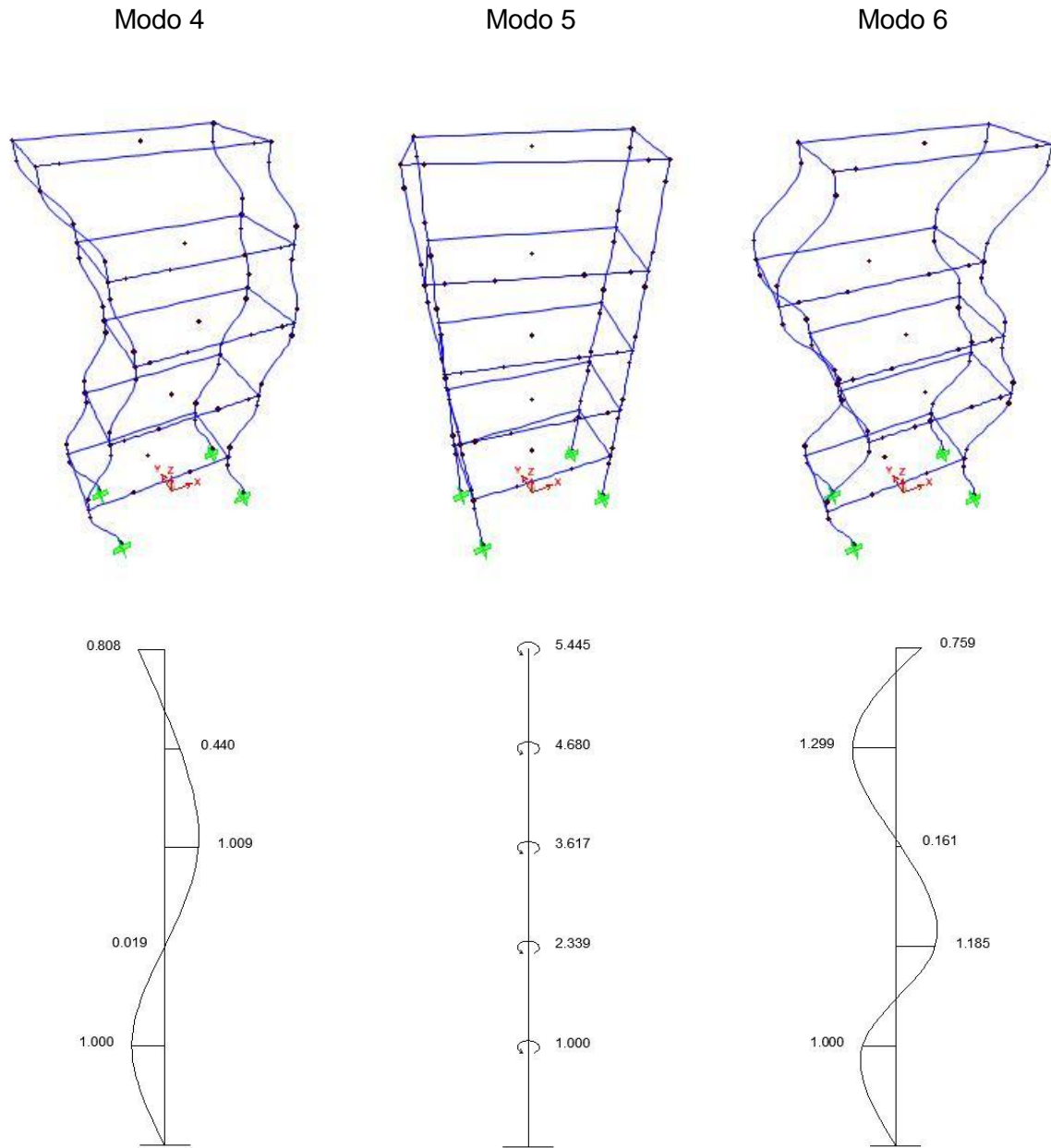


Figura 4.7. Modos de vibrar y coordenadas modales (4, 5 y 6) analíticos

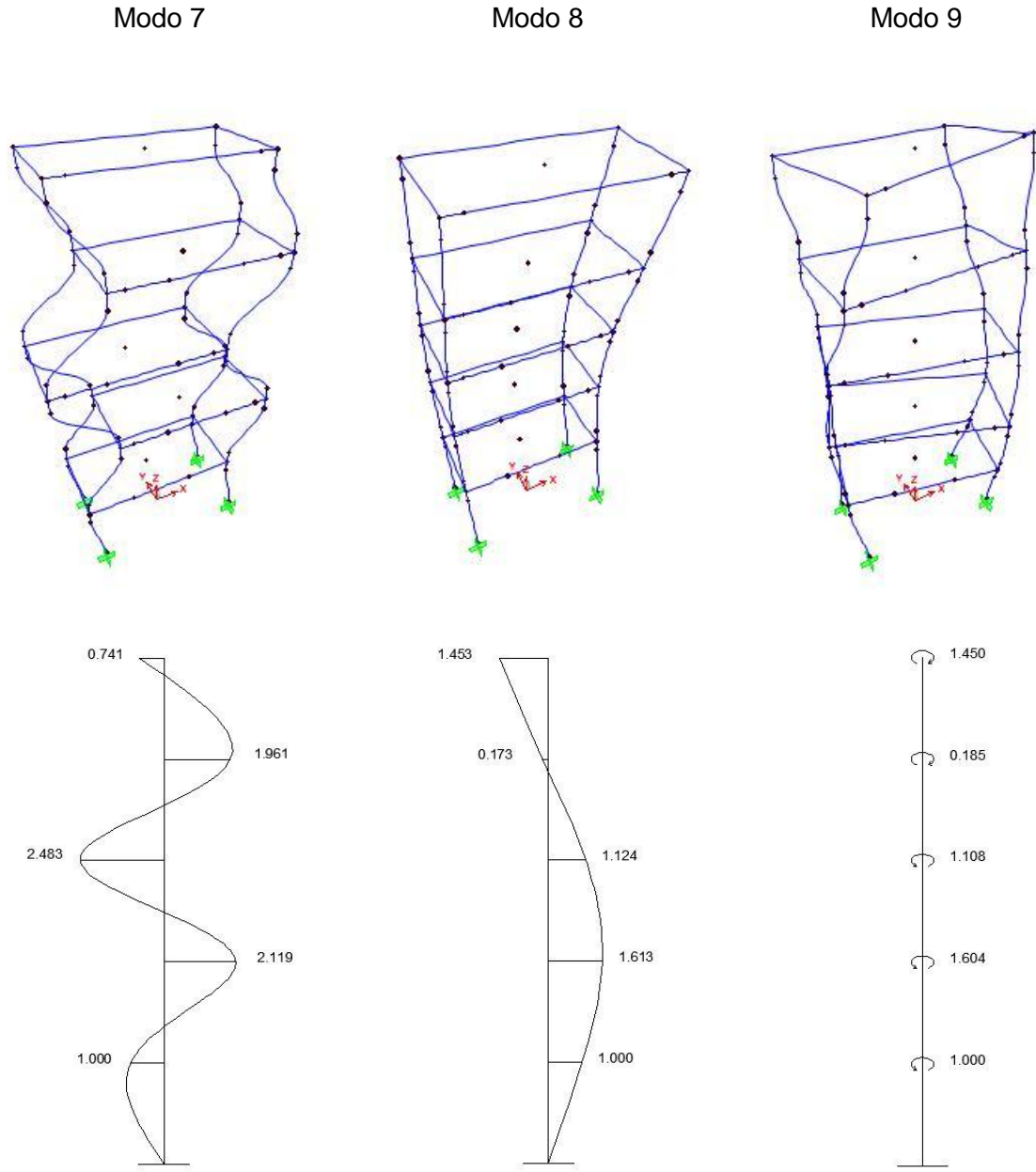


Figura 4.8. Modos de vibrar y coordenadas modales (7, 8 y 9) analíticos

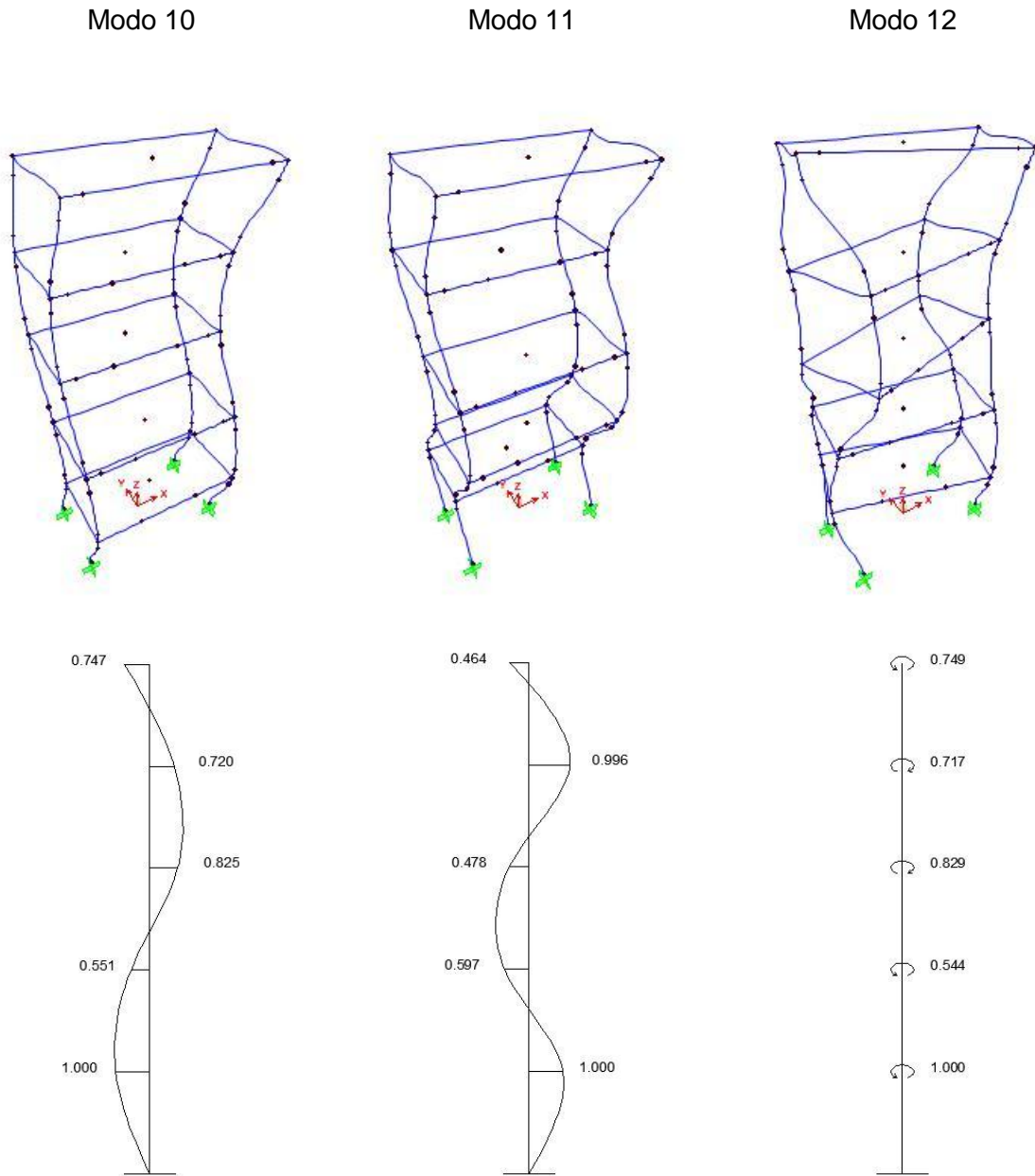


Figura 4.9. Modos de vibrar y coordenadas modales (10, 11 y 12) analíticos

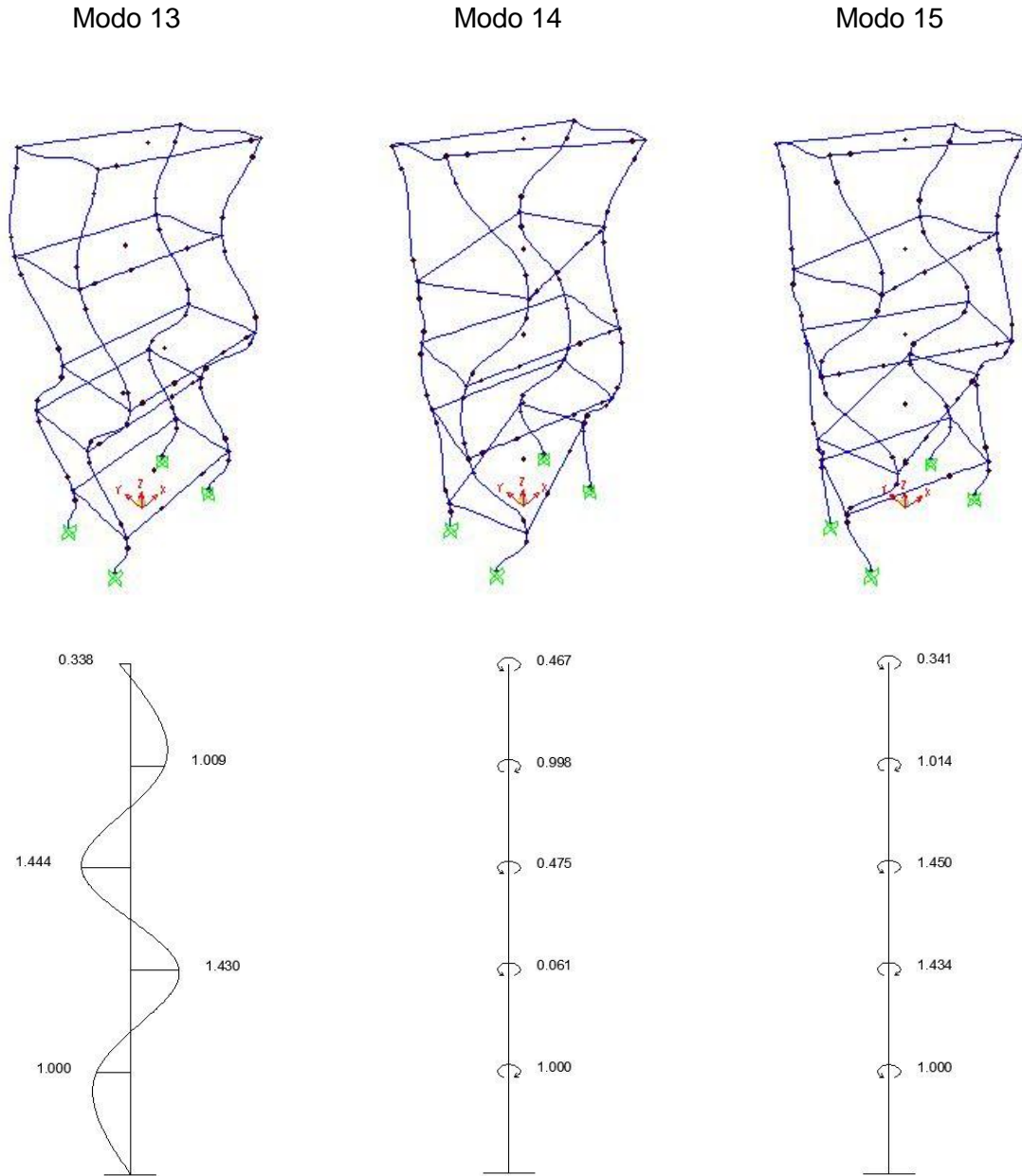


Figura 4.10. Modos de vibrar y coordenadas modales (13, 14 y 15) analíticos

### 4.3. ACTUALIZACIÓN DE FRECUENCIAS EXPERIMENTALES

#### 4.3.1. Modelo de correlación lineal

La actualización de frecuencias experimentales consiste en completar los resultados experimentales usando los producidos por del modelo analítico. Lo anterior se realiza obteniendo las características dinámicas no identificadas experimentalmente (frecuencias y modos de vibrar), a partir de un conjunto de datos adquiridos de forma analítica. En la práctica es común que estos no se obtengan en su totalidad del modelo real, debido a las limitaciones del equipo empleado en las pruebas de vibración. Por otro lado, los datos enunciados pueden ser calculados de modo completo con la ayuda de diversos programas de análisis. Haciendo uso de las características dinámicas analíticas y experimentales registradas; y suponiendo la existencia de una correlación cuasi-lineal entre ambos, Ángeles (2012) propuso una ecuación con la que es posible obtener las frecuencias experimentales sin identificar. Dicha ecuación se muestra a continuación:

$$f_{e_{n+1}} = f_{e_n} \frac{f_{a_{n+1}}}{f_{a_n}} \quad (4.1)$$

donde:

$f_{e_{n+1}}$  = i+1 frecuencia de vibración experimental  
 $f_{e_n}$  = i-ésima frecuencia de vibración experimental  
 $f_{a_{n+1}}$  = i+1 frecuencia de vibración analítica  
 $f_{a_n}$  = i-ésima frecuencia de vibración analítica

Con las frecuencias de vibración analíticas y la frecuencia fundamental de vibración experimental, se puede usar de la ecuación 4.1 y obtener las frecuencias experimentales no identificadas. En el presente trabajo, esta ecuación se utilizó debido a que en las pruebas de vibración se registraron únicamente tres frecuencias.

##### 4.3.1.1. Actualización con el modelo de correlación lineal

En la tabla 4.2 se muestran las frecuencias de vibración analíticas, las frecuencias de vibración experimentales actualizadas y las identificadas en el ensayo, así como la dirección de movimiento de la estructura asociada a éstas.

Se puede observar que, en general, el valor de las frecuencias analíticas es mayor que el de las experimentales, esto es de ayuda en caso de que el modelo de elementos finitos se desee refinar.

Tomando en cuenta que la frecuencia de una estructura disminuye a medida que ésta es más flexible, reducir la rigidez del sistema estructural en ciertos elementos, podría conducir a la generación de un modelo más acertado. Desde luego, considerando los parámetros que a su vez influyen en la rigidez de los miembros estructurales.



**Tabla 4.2. Frecuencias de vibración**

No	Experimentales (Hz)	Análíticas (Hz)	Experimentales actualizadas (Hz)	Dirección del movimiento
1	5.566	5.81		x
2	17.041	17.81	17.06	x
3		24.85	24.76	y
4	27.294	29.56	28.32	x
5		39.29	37.64	t
6		39.35	37.70	x
7		45.82	43.90	x
8		82.41	78.95	y
9		129.45	124.01	t
10		159.47	152.77	y
11		245.92	235.59	y
12		248.92	238.47	t
13		326.76	313.04	y
14		382.88	366.80	t
15		507.87	486.54	t

x (dirección longitudinal), y (dirección transversal), t (torsión)

**4.3.1.2. Error relativo en los valores de las frecuencias**

Un indicador de la calidad en la actualización, es la comparación del error relativo entre las frecuencias experimentales identificadas y las frecuencias experimentales actualizadas. De igual forma, al calcular éste entre las frecuencias experimentales identificadas y las frecuencias analíticas, se puede observar qué tan preciso fue el modelo de elementos finitos.

Con la ecuación (4.2) es posible obtener el error relativo. En la tabla 4.3 se aprecia el valor del error relativo entre las diferentes frecuencias.

$$e_r = \frac{V_c - V_e}{V_e} \times 100\% \tag{4.2}$$

donde:

$e_r$  = error relativo

$V_c$  = valor

$V_e$  = valor experimental

**Tabla 4.3. Error relativo entre las distintas frecuencias de vibración**

No	Error relativo entre las <i>fei</i> y las <i>fa</i> (%)	Error relativo entre las <i>fei</i> y las <i>fea</i> (%)
1	4.38	
2	4.51	0.11
4	8.30	3.76

*fea* (frecuencias experimentales actualizadas), *fa* (frecuencias analíticas), *fei* (frecuencias experimentales identificadas)

En primera instancia, se aprecia un error relativo positivo en todas las frecuencias, lo que indica que el modelo analítico sobrevalúa al experimental. En las frecuencias fundamentales, se presenta un error relativo menor al 5 %. Esto sugiere que el modelo de elementos finitos, no dista mucho de la estructura de acero real y que las imprecisiones en el modelado fueron mínimas. El error relativo en

la segunda frecuencia permanece debajo del 5 %, lo que reafirma la idea de una modelación adecuada.

Un aspecto relevante, es el incremento del error relativo en la cuarta frecuencia. Éste aumenta 89 y 84 % en relación al primer y segundo errores respectivamente, lo que podría hacer dudar de la validez del modelo. Sin embargo, se puede considerar que alguna característica durante el ensayo, por ejemplo, la presencia de ruido, fue determinante en el registro de ésta.

En lo que respecta al error relativo presente entre las frecuencias experimentales identificadas y las experimentales actualizadas, en la segunda frecuencia disminuye 41 veces y en la cuarta más del doble, 2.2 veces. Con esto se constata que, con el modelo matemático no sólo se obtienen frecuencias sin identificar durante un ensayo, también se mejoran los valores analíticos aproximando estos a los experimentales.

Adicionalmente, el error entre las frecuencias experimentales actualizadas y las frecuencias analíticas tiene un valor constante de 4.38 %.

Una vez ponderados los errores anteriores, se determina que la aplicación de la ecuación (4.1) para la actualización del modelo experimental, produce resultados satisfactorios. Lo cual indica que su uso, es confiable para conseguir características dinámicas no identificadas en pruebas experimentales.

#### **4.3.2. Ecuación alternativa de actualización**

La consideración de la correlación cuasi-lineal entre las frecuencias experimentales actualizadas y las analíticas, lleva a que el error relativo entre ambas sea invariable. Bajo esta premisa, se propone una ecuación alternativa de actualización para obtener las frecuencias experimentales sin identificar. Ésta emplea las frecuencias analíticas y el error relativo entre alguna frecuencia experimental identificada y su contraparte calculada, denominado coeficiente de error relativo. Dicho modelo se muestra en la ecuación (4.3).

$$f_{e n} = \frac{f_a n}{\frac{e_r}{100} + 1} \quad (4.3)$$

La ecuación (4.3) produce los mismos valores de las frecuencias actualizadas en la sección anterior. Básicamente, el modelo hace notar que la precisión de la actualización, radica en el error relativo presente entre los resultados producidos por el modelo analítico y el experimental.

La obtención del coeficiente de error relativo entre las frecuencias fundamentales, es suficiente para aplicar la ecuación (4.3) y obtener las experimentales sin identificar. Sin embargo, también es posible calcular cualquier otro entre las frecuencias analíticas y sus semejantes experimentales identificadas, y actualizar el modelo con éste.

##### **4.3.2.1. Actualización con la ecuación alternativa**

La actualización con la ecuación alternativa, se realiza empleando el coeficiente de error relativo de la segunda y cuarta.

En la tabla 4.4 se muestra la actualización y el error relativo presente entre las frecuencias experimentales identificadas y las actualizadas. A primera vista, el valor de las frecuencias actualizadas mediante ambos coeficientes, no presenta una variación significativa en comparación

con la actualización realizada con el modelo de correlación lineal. Sin embargo, al analizar el error relativo entre las frecuencias experimentales identificadas y las actualizadas con el coeficiente de error relativo de la segunda frecuencia, se aprecia una disminución en éste. La frecuencia fundamental actualizada indica un error menor al 1 % en relación con la identificada. En la cuarta frecuencia existe un error relativo menor al obtenido con el modelo de correlación lineal, reduciéndolo de 3.76 a 3.61 %. También se aprecia un error relativo negativo en la frecuencia fundamental y uno positivo en la cuarta.

**Tabla 4.4. Frecuencias experimentales actualizadas con la ecuación alternativa y error relativo existente entre éstas y sus contrapartes identificadas**

No	<i>fea</i> con el coeficiente de error relativo de la segunda frecuencia (Hz)	Error relativo entre las <i>fei</i> y <i>fea</i> (%)	<i>fea</i> con el coeficiente de error relativo de la cuarta frecuencia (Hz)	Error relativo entre las <i>fei</i> y <i>fea</i> (%)
1	5.56	- 0.11	5.36	- 3.7
2			16.44	- 3.53
3	24.73		23.87	
4	28.28	3.61		
5	37.59		36.28	
6	37.65		36.34	
7	43.84		42.31	
8	78.85		76.09	
9	123.86		119.53	
10	152.58		147.25	
11	235.30		227.07	
12	238.17		229.84	
13	312.65		301.71	
14	366.35		353.53	
15	485.94		468.94	

*fea* (frecuencias experimentales actualizadas), *fei* (frecuencias experimentales identificadas)

La actualización con el coeficiente de error relativo de la cuarta frecuencia, produce errores relativos negativos, subvaluando al modelo experimental. El error relativo entre la frecuencia fundamental experimental actualizada y la identificada de -3.7 %. Por otro lado, el error relativo en la segunda frecuencia es de -3.53 %. Este último, incrementó 32 veces en comparación con el producido por el modelo de correlación lineal, en la misma frecuencia.

Analizando los resultados producidos por ambos coeficientes, se concluye que la ecuación alternativa de actualización, con un mismo coeficiente de error relativo, puede sobrevaluar y subvaluar las características dinámicas del modelo experimental.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Al realizar el modelo de elementos finitos de una estructura, se deben tomar en cuenta todos los detalles que la caracterizan, desde los aspectos geométricos y propiedades físicas de los materiales, hasta las condiciones de frontera de la misma. En primera instancia, cada característica de los elementos estructurales debe ser modelada lo más acertada posible. Si el programa de cómputo carece de la capacidad de asimilar un aspecto real, se debe buscar la modelación más precisa con las herramientas disponibles, sin que difiera en gran medida. Definitivamente, nunca se tendrá un modelo de elementos finitos cien por ciento igual a su contraparte real. La acumulación de suposiciones, incertidumbres y consideraciones de manera excesiva, puede llevar a que el modelado se aleje de la realidad y sea incorrecto. Reduciendo éstas, se puede llegar a la realización de un excelente modelo.

Las técnicas de actualización de modelos son efectivas para el mejoramiento de modelos de elementos finitos. Éstas corrigen errores en el modelado, con la finalidad de que las características dinámicas analíticas se asemejen a las experimentales. Sin embargo, aunque dichas propiedades tengan una buena concordancia posterior a la actualización, se debe revisar el modelo de elementos finitos y asegurarse de que sea correcto. Aunque la actualización ajuste ciertas características del modelo, no es un método para modificarlo íntegramente y producir uno idéntico al real.

La actualización de modelos emplea datos analíticos y experimentales de cualquier estructura. Los primeros se pueden obtener de manera completa mediante algún programa de cómputo especializado, en virtud de que realiza procedimientos matemáticos para su extracción. Por otro lado, en las pruebas de vibración, la identificación de características dinámicas generalmente es incompleta. Para abordar el problema anterior, se puede emplear una ecuación que relaciona los datos analíticos y los experimentales registrados (Ángeles, 2012), con la cual se obtienen los datos experimentales sin identificar.

En el presente trabajo, del ensayo de una estructura de acero a escala, en la mesa vibradora del Instituto de Ingeniería de la UNAM se consiguieron tres frecuencias de quince totales. Aplicando la ecuación mencionada, fue suficiente la frecuencia fundamental experimental y las frecuencias analíticas de un modelo de elementos finitos de la estructura, para obtener las frecuencias no identificadas en la prueba de vibración.

El procedimiento evaluado es efectivo, ya que al comparar las frecuencias calculadas con la ecuación y las experimentales registradas, el error relativo entre ambas no excedió el 5 %.

La actualización también se efectuó con una nueva ecuación aquí propuesta que utiliza un coeficiente de error relativo entre las frecuencias identificadas y sus contrapartes analíticas.

Empleando el coeficiente de error relativo de la segunda frecuencia, se obtuvo un error relativo menor que  $\pm 0.5\%$  entre la frecuencia fundamental experimental actualizada y la identificada. En lo que respecta al error relativo entre la cuarta frecuencia experimental actualizada y su contraparte identificada, este disminuyó de 3.76 %, obtenido con el modelo de correlación lineal, a un 3.61 % generado por la ecuación alternativa de actualización con el coeficiente de error relativo de la segunda frecuencia.

Con el uso del coeficiente de error relativo de la cuarta frecuencia, el error relativo entre las frecuencias experimentales actualizadas e identificadas se haya entre - 4 y 0 %. Adicionalmente, se

produjo un error relativo en la segunda frecuencia de vibración de - 3.53 %, contrario al generado por el modelo de correlación lineal, que tuvo un valor de 0.11 %.

A partir de los resultados obtenidos para el modelo estudiado, se puede confirmar que en el proceso de actualización es recomendable emplear el modelo de correlación lineal y la ecuación alternativa de actualización. Finalmente, utilizar aquel que genere el error relativo con el valor más cercano a 0, entre  $\pm 5$  %.

Técnicamente se realizó un proceso de actualización inversa, ajustando el modelo experimental al modelo de elementos finitos. Esto en la práctica puede ser una herramienta poderosa. Actualmente es común realizar y analizar el modelo de una estructura la cual se planea construir. Sin embargo, no se tendrá la certeza de qué tan adecuada fue su construcción, hasta que ésta se encuentre funcionando bajo condiciones de servicio y se tengan parámetros para compararla con el modelo de elementos finitos. Un seguimiento constante y periódico a medida que avanza la obra, puede generar resultados comparables con su contraparte analítica. Esto puede ser útil para determinar si la construcción se está desarrollando adecuadamente o existe alguna característica que deba ser corregida.

El modelo de elementos finitos puede ser desarrollado antes o después de que la estructura se construya. Si se tiene la certeza de que no difiere en gran medida de la estructura real y la actualización es adecuada, entonces puede ser usado para diversos propósitos, por ejemplo:

- Predecir la respuesta de la estructura real bajo diversas acciones.
- Identificar algún daño existente en la estructura real.
- Revisar la viabilidad de potenciales modificaciones en la estructura real.

Con el uso del modelo de correlación lineal y la ecuación alternativa de actualización propuesta en el presente trabajo, se actualizó adecuadamente el modelo de acero estudiado. Sin embargo, estas ecuaciones no garantizan la actualización apropiada de cualquier estructura. Por ello, para generalizar el uso de éstas y validar su aplicación, es necesario realizar modelos de elementos finitos de estructuras existentes, comparar las características dinámicas analíticas con las experimentales, actualizar los modelos reales con las ecuaciones presentadas y observar los resultados que produzcan. La existencia de un error menor que el 5 % entre las características dinámicas analíticas experimentales y las actualizadas, sugeriría que el uso del modelo de correlación lineal y la ecuación alternativa de actualización, es útil para actualizar modelos experimentales.

Lo anterior sería aplicable a modelos sin daño. Para optar por el empleo de éstas en estructuras con algún tipo de daño estructural, primero se tendría que abordar el problema del modelado de daño en los programas de cómputo destinados a la realización de modelos de elementos finitos. Una vez resuelto este inconveniente, se podrían aplicar las ecuaciones mencionadas y observar los resultados que generen.

## BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

ABAQUS (2005), Dassault Systems, *ABAQUS/CAE*, versión 6.9, Manual de usuario.

Acelerómetros [Fotografía]. Tomada del sitio: [http://www.mmf.de/miniature\\_accelerometers.htm](http://www.mmf.de/miniature_accelerometers.htm)

Ángeles P.I. (2012), “Identificación de daño en edificios mediante instrumentación estructural”, Tesis de maestría. Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería, UNAM, México.

ANSYS (2005), SAS IP Inc. *ANSYS*, versión 10.0, <http://www.ansys.com>

Barton E., Middleton C., Koo K., Crocker L. y Brownjohn J. (2011), “Structural finite model updating using vibration tests and modal analysis for NPL footbridge – SHM demonstrator”, *Journal of Physics: Conference Series*, **305**(1), pp. 1-10.

Baruch M. (1978), “Optimization procedure to correct stiffness and flexibility matrices using vibration test data”, *AIAA Journal*, **16**(11), pp. 1208-1210.

Berman A. y Nagy E.J. (1983), “Improvement of large analytical model using test data”, *AAIA Journal*, **21**(8), pp.1168-1173.

Boller C. y Staszewski W.J. (2004), “Aircraft structural health and usage monitoring”, en *Health monitoring of aerospace structures: Smart sensor technologies and signal processing*, Boller C., Staszewski W.J. y Tomlinson G.R. (editors), John Wiley & Sons, Ltd, pp. 29-71.

Celebi M. (2000), “Seismic instrumentation of buildings”, U.S. Geological Survey open-file report, pp. 1-52, EUA.

Celebi M. (2013), “Seismic monitoring of structures and new developments”, en *Earthquakes and health monitoring of civil structures*, Garevski M. (editor), Springer Environmental Science and Engineering, Springer Holanda, pp. 37-84.

Celebi M. y Sanli A. (2002), “GPS in pioneering dynamic monitoring of long-period structures”, *Earthquake Spectra*, **18**(1), pp. 47-61.

Doebbling S.W., Farrar C.R., Prime M.B. y Shevitz D. W. (1996), “Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: A literature review”, Los Alamos National Laboratory report LA-13070-MS, pp. 1-127, EUA.

ETABS (2013), Computers & Structures, Inc., *ETABS*, versión 2013, <http://www.csiamerica.com>

Friswell M.I. y Mottershead J.E. (1995), “Finite model updating in structural dynamics”, Kluwer Academic Publishers, Holanda, 283 pp.

Jung H. (1992), “Structural dynamic model updating using eigensensitivity analysis”, Tesis doctoral, Imperial College of Science, Technology and Medicine, University of London. Gran Bretaña.

- Martillo instrumentado TDR2 [Fotografía]. Tomada del sitio: <http://www.testconsult.co.uk/itemdetail.aspx?id=55&dept=test-equipment-sales>
- Mordini A., Savov K. y Wenzel H. (2007), “The finite element model updating: A powerful tool for structural health monitoring”, *Structural Engineering International*, **17**(4), pp. 352-358.
- Mottershead J.E. y Friswell M.I. (1993), “Model updating in structural dynamics: A survey”, *Journal of Sound and Vibration*, **167**(2), pp. 347-375.
- Mottershead J.E., Link M. y Friswell M.I. (2011), “The sensitivity method in finite element model updating: A tutorial”, *Mechanical Systems and Signal Processing*, **25**(7), pp. 2275-2296.
- OpenSees (2006), Pacific Earthquake Engineering Research Center. *OpenSees, Open System for Earthquake Engineering Simulation*, versión 1.7.3, <http://opensees.berkeley.edu>
- Puente carretero-ferroviario sobre el río Yangtsé en Nanjing [Fotografía], (2011). Tomada del sitio: [http://news.everychina.com/vz405c1c-nanjing\\_yangtze\\_river\\_bridge.html](http://news.everychina.com/vz405c1c-nanjing_yangtze_river_bridge.html)
- Rojahn C. y Matthiesen R.B. (1977), “Earthquake response and instrumentation of buildings”, *Journal of the Technical Councils of ASCE*, **103**(1), pp. 1-12.
- Rytter A. (1993), “Vibration based inspection of civil engineering structures”, Tesis doctoral, Department of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg University, Dinamarca.
- SAP2000 (2010), Computers & Structures, Inc., *SAP2000*, versión 14, <http://www.csiamerica.com>
- Scilab (2006) Scilab Consortium. *Scilab, A Free Scientific Software Package*, versión 4.1, <http://www.scilab.org>
- Sohn H., Farrar C.R., Farrar C.R., Hemez F.M., Shunk D.D., Stinemates D.W., Nadler B.R. y Czamecki J.J. (2004), “A Review of Structural Health Monitoring Literature: 1996-2001”, Los Alamos National Laboratory report LA-13976-MS, pp. 1-301, EUA.
- STAAD (2007), Bentley Systems, Inc., *STAAD.Pro*, versión 2007, <http://www.bentley.com>.
- Termografía de una superficie de concreto reforzado. Conductividad térmica de las áreas de daño [Fotografía]. Tomada del sitio: <http://www.pentaocean.co.jp/english/business/civil/thermography.html>
- Teughels A. (2003), “Inverse modeling of civil engineering structures based on operational modal data”, Tesis doctoral, Katholieke Universiteit Leuven, Bélgica.
- Viga instrumentada [Fotografía], (2009). Tomada del sitio: [http://iti.northwestern.edu/news/2009/01-2009\\_jfk\\_ae.html](http://iti.northwestern.edu/news/2009/01-2009_jfk_ae.html)
- Vista aérea de la mesa vibradora del Centro de Investigación en ingeniería sísmica de Hyogo, Japón [Fotografía], (2009). Tomada del sitio: <http://www.kpaa.com/news/2009/7/16/6-story-wood-framed-condo-building-subject-of-worlds-largest.html>
- Wei-Xin R. y Hua-Bing C. (2010), “Finite element model updating in structural dynamics by using the response surface method”, *Engineering Structures*, **32**(8), pp. 2455-2465.

Xu-hui H., Zhi-wu Y. y Zheng-qing C. (2008), "Finite model updating of existing steel bridge based on structural health monitoring", Journal of Central South University of Technology, **15**(3), pp. 399-403.



## APÉNDICE A. Laboratorio de la mesa vibradora del Instituto de Ingeniería de la UNAM

El Laboratorio de la mesa vibradora del Instituto de Ingeniería de la UNAM, se localiza en el Jardín Botánico exterior, en la zona poniente de Ciudad Universitaria. El complejo cuenta con el único sistema en México posible de simular sismos con diferentes características y uno de los mejores de América Latina.



a) Fachada oeste del laboratorio



b) Fachada norte del laboratorio



c) Interior del laboratorio

**Figura A.1. Laboratorio de la mesa vibradora del Instituto de Ingeniería de la UNAM**

La realización del proyecto fue posible gracias a la donación de equipo por parte del Instituto de Investigación Técnica de Kajima, así como las aportaciones de las siguientes instituciones:

- Banco Interamericano de Desarrollo
- Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología
- ICA Construcción Urbana, SA de CV
- Cámara Nacional de la Industria del Hierro y el Acero
- Aceros DM, SA de CV
- Atlax, SA de CV
- Ferro Tultitlán, SA de CV
- Grupo Villacero SICARTSA
- HYLSA, SA de CV
- Metalúrgica Veracruzana, SA de CV
- Talleres y Aceros, SA de CV
- ANIPPAC
- Grupo CIFRA, SA de CV
- Novaceramic, SA de CV

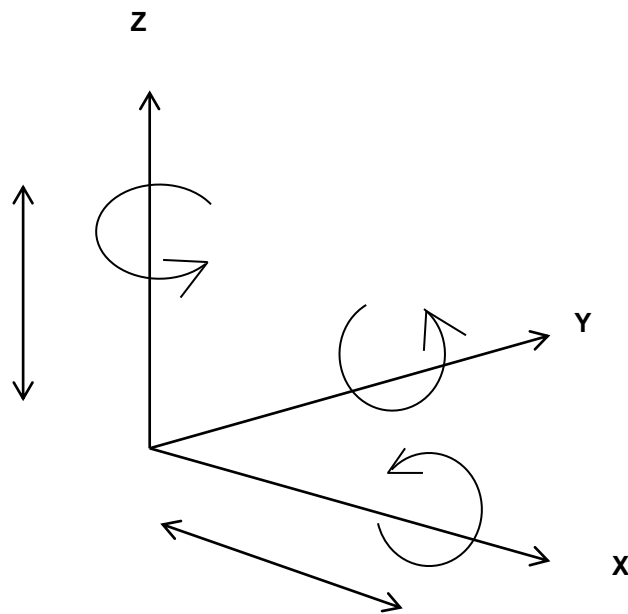
En la mesa vibradora se llevan a cabo pruebas con diferentes propósitos:

- Estudio de la respuesta dinámica de elementos y sistemas estructurales.
- Demostración de la validez de conceptos estructurales.
- Desarrollo y validación de modelos analíticos.
- Evaluación y validación del comportamiento de equipo mecánico, eléctrico, electrónico y de comunicaciones ante sismos.

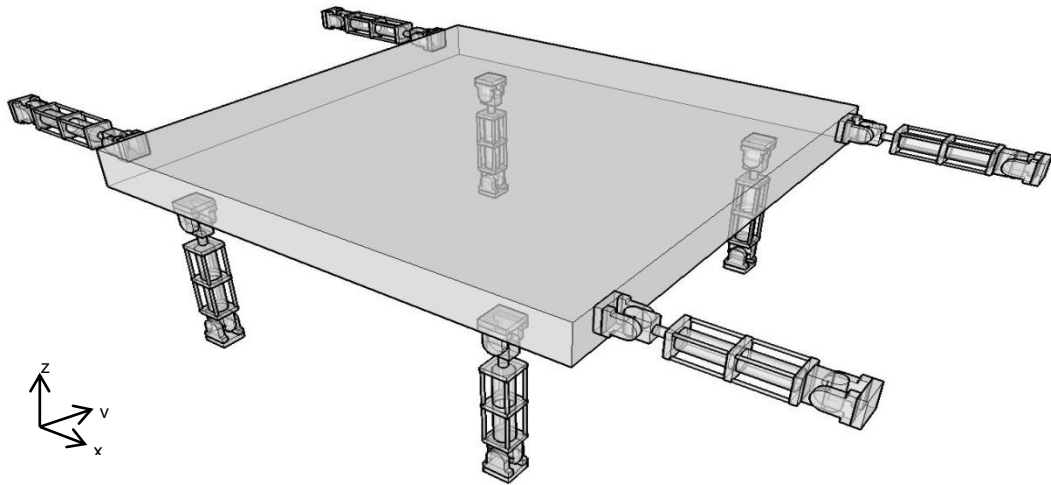
La mesa es una de las más modernas del mundo y fue fabricada por la empresa MTS Systems Corporation de los Estados Unidos de América. Las principales características de la mesa son:

- Cinco grados de libertad controlados: desplazamiento sobre el eje  $x$  (longitudinal), desplazamiento sobre el eje  $z$  (vertical), rotación alrededor del eje  $x$ , rotación alrededor del eje  $y$  y rotación alrededor del eje  $z$  (Figura A.2).
- Dimensiones de la mesa: 4 x 4 m

- Plataforma de aluminio de 8.5 t (Figura A.3)
- Peso máximo de los modelos que pueden ser ensayados en la mesa: 20 t
- 4 actuadores horizontales MTS con capacidad de 10 t (Figura A.3)
- 4 actuadores verticales MTS con capacidad de 20 t (Figura A.3)
- Desplazamiento horizontal máximo: +/- 150 mm
- Desplazamiento vertical máximo: +/- 75 mm
- Velocidad horizontal máxima: 1100 mm/s
- Velocidad vertical máxima: 450 mm/s
- Aceleraciones horizontal y vertical máximas:  $9.81 \text{ m/s}^2$  (1 g) con un modelo de 20 ton y un momento de volteo de 100 ton-m
- Intervalo de frecuencia: 0.1 a 50 Hz
- Cuarto de máquinas con un par de unidades con bombas de pistón y flujo variable.



**Figura A.2. Grados de libertad controlados**



**Figura A.3. Vista tridimensional de la plataforma de la mesa vibradora y los actuadores horizontales y verticales**

El complejo está provisto de una grúa viajera con capacidad de 10 t (Figura A.4.a), para facilitar el transporte y colocación de los elementos a probar en la mesa. Posee un laboratorio de instrumentación dotado con gran cantidad de herramientas y transductores, empleados durante las pruebas de vibración para la medición de la respuesta de los sistemas y elementos ensayados. En algunas pruebas se utiliza el marco de referencia (Figura A.4.b) con el propósito de medir desplazamientos absolutos.



**a) Grúa viajera**



**b) Marco de referencia**

**Figura A.3. Grúa viajera y marco de referencia del laboratorio de la mesa vibradora del Instituto de Ingeniería de la UNAM**

Desde la sala de control, mediante convertidores análogo-digitales, se manipulan los movimientos que desempeña la mesa durante el ensayo. En la misma sala, se realiza el análisis de datos y se determinan las propiedades de interés (aceleraciones, desplazamientos, frecuencias, entre otras) del sistema o elemento estudiado.

La infraestructura del laboratorio está disponible para investigadores de la UNAM y otras instituciones de investigación y docencia, así como para prestar servicio a la industria en general.