



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE AGUASCALIENTES

Centro de Ciencias del Diseño y de la Construcción

Departamento de Construcción y Estructuras

Tesis

**EVALUACIÓN DEL EMPLEO DEL MODO DE VIBRAR
COMO INDICADOR DE LA CONDICIÓN ESTRUCTURAL
DE EDIFICIOS HISTÓRICOS**

Presenta:

Héctor Animas Rivera

Para obtener el grado de Doctor en Ciencias

Tutor:

Dr. Jesús Pacheco Martínez

Comité Tutorial:

Dr. Gerardo Araiza Garaygordobil

Dr. Pere Roca Fabregat

Aguascalientes, Ags., 23 de Febrero de 2015



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE AGUASCALIENTES



ANIVERSARIO
uaa

Asunto: Voto aprobatorio impresión
Tesis de Héctor Animas Rivera

DR. MARIO EDUARDO ZERMEÑO DE LEÓN
DECANO DEL CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCIÓN
P R E S E N T E

Por medio del presente, como Tutor designado del estudiante **HÉCTOR ANIMAS RIVERA**, con ID 147959, quién realizó la tesis titulada: **EVALUACIÓN DEL EMPLEO DEL MODO DE VIBRAR COMO INDICADOR DE LA CONDICIÓN ESTRUCTURAL DE EDIFICIOS HISTÓRICOS**, y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia, me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que el pueda proceder a imprimirla, así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Pongo lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, me permito enviarle un cordial saludo.

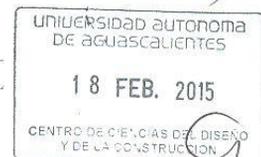
ATENTAMENTE
"SE LUMEN PROFERRE"

Aguascalientes, Ags., a 18 de febrero de 2015

DR. JESÚS PACHECO MARTÍNEZ
TUTOR DE TESIS DEL ALUMNO

Vo.Bo.

DR. GERARDO ARAIZA GARAYGORDOBIL
COTUTOR



c.c.p. MTR. HÉCTOR ANIMAS RIVERA, ALUMNO DEL DOCTORADO EN CIENCIAS DE LOS ÁMBITOS ANTRÓPICOS, CON ÉNFASIS EN ARQUITECTURA, INGENIERÍA CIVIL Y URBANISMO (DCAA) PNPC.
c.c.p. MTRA. MARÍA GUADALUPE VALDÉS REYES, JEFA DEL DEPARTAMENTO DE APOYO AL POSGRADO.
c.c.p. DR. SERGIO IGNACIO MARTÍNEZ MARTÍNEZ, CONSEJERO ACADÉMICO DEL ÁREA DE INGENIERÍA CIVIL DEL CA, DCAA PNPC.
c.c.p. Archivo



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE AGUASCALIENTES

Centro de Ciencias del Diseño
y de la Construcción

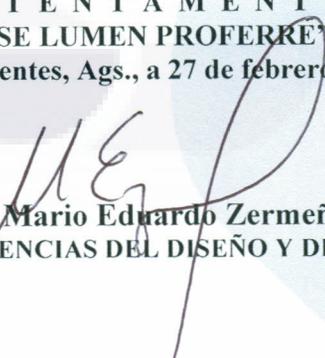
OFICIO No. CCDC-D-084-2015
ASUNTO: Conclusión de Tesis

DRA. GUADALUPE RUIZ CUELLAR
DIRECCIÓN GENERAL DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO
PRESENTE.

Por medio de este conducto informo que el documento final de tesis titulado: **EVALUACIÓN DEL EMPLEO DEL MODO DE VIBRAR COMO INDICADOR DE LA CONDICIÓN ESTRUCTURAL DE EDIFICIOS HISTÓRICOS**. Presentado por el sustentante: **M. EN ING. HÉCTOR ANIMAS RIVERA**. Con ID **147959** egresado de **DOCTORADO EN CIENCIAS DE LOS ÁMBITOS ANTRÓPICOS**, cumple las normas y lineamientos establecidos institucionalmente. Cabe mencionar que el autor cuenta con el voto aprobatorio correspondiente.

Para efecto de los trámites que al interesado convengan se extiende el presente, retirándole las consideraciones que el caso amerite.

A T E N T A M E N T E
"SE LUMEN PROFERRE"
Aguascalientes, Ags., a 27 de febrero de 2015


Dr. en Ing. Mario Eduardo Zermeño de León
DECANO DEL C. DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCIÓN

- c.c.p.- M. en Ing. José Luis López López – Secretario de Investigación y Posgrado del CCD y C.
- c.c.p.- Dr. Alejandro Acosta Collazo – Secretario Técnico del Doctorado.
- c.c.p.- Dr. Jesús Pacheco Martínez – Tutor.
- c.c.p.- Dr. Gerardo Araiza Garaygordobil – Cotutor.
- c.c.p.- M. en Ing. Héctor Animas Rivera – Egresado del Doctorado en Ciencias de los Ámbitos Antrópicos.
- c.c.p.- Expediente del Alumno.

MEZL/rbv

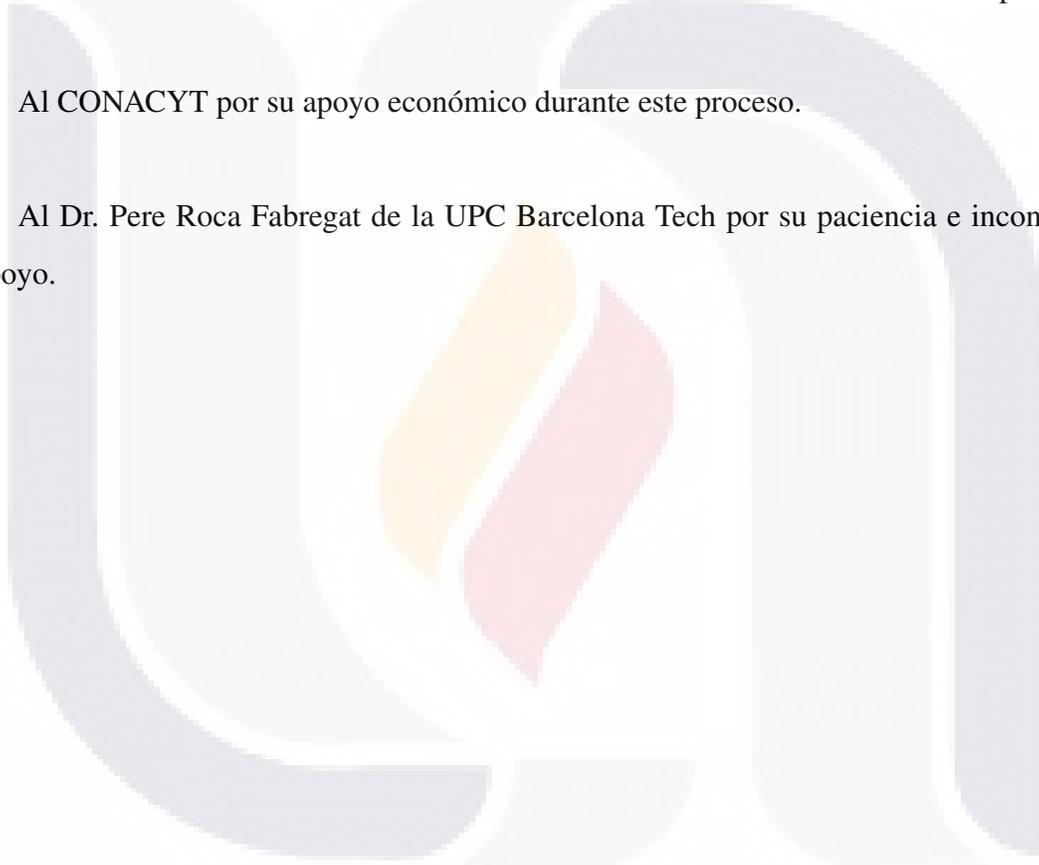
Agradecimientos

Al Dr. Jesús Pacheco Martínez por ser un excelente guía y creer en el proyecto desde un inicio. Gracias por todos sus observaciones, consejos y regaños.

A todo el comité académico del Doctorado en Ciencias de los Ámbitos Antrópicos.

Al CONACYT por su apoyo económico durante este proceso.

Al Dr. Pere Roca Fabregat de la UPC Barcelona Tech por su paciencia e incondicional apoyo.



Dedicatoria

"Wish You Were Here"

Pink Floyd (Waters, Gilmour)

So, so you think you can tell

Heaven from Hell,

Blue skys from pain.

Can you tell a green field

From a cold steel rail?

A smile from a veil?

Do you think you can tell?

And did they get you to trade

Your heros for ghosts?

Hot ashes for trees?

Hot air for a cool breeze?

Cold comfort for change?

And did you exchange

A walk on part in the war

For a lead role in a cage?

How I wish, how I wish you were here.

We're just two lost souls

Swimming in a fish bowl,

Year after year,

Running over the same old ground.

What have we found?

The same old fears.

Wish you were here.



Resumen

El estudio de las vibraciones como fuente de información para monitorizar cambios en la salud estructural, se emplea como técnica alterna a la inspección visual en los programas de mantenimiento de puentes en varias partes del mundo. El principio de la metodología consiste en medir las vibraciones de las estructuras por efecto del ruido ambiental y determinar las características dinámicas de la estructura (frecuencia natural, modos de vibrar, entre otros). La hipótesis principal de la metodología propone que al reducirse la eficiencia estructural, hay un cambio en las propiedades dinámicas de la estructura (asociadas a la rigidez o envejecimiento de los materiales). Generalmente los edificios patrimoniales no pueden ser evaluados en su salud estructural mediante las técnicas tradicionales invasivas o destructivas (por ejemplo: pruebas de carga, extracción de muestras). El uso de vibración ambiental es una opción viable para conocer el estado de la salud estructural de este tipo de edificios y poder proponer un plan de mantenimiento preventivo para mejorar su conservación, o las medidas correctivas para garantizar su estabilidad.

Abstract

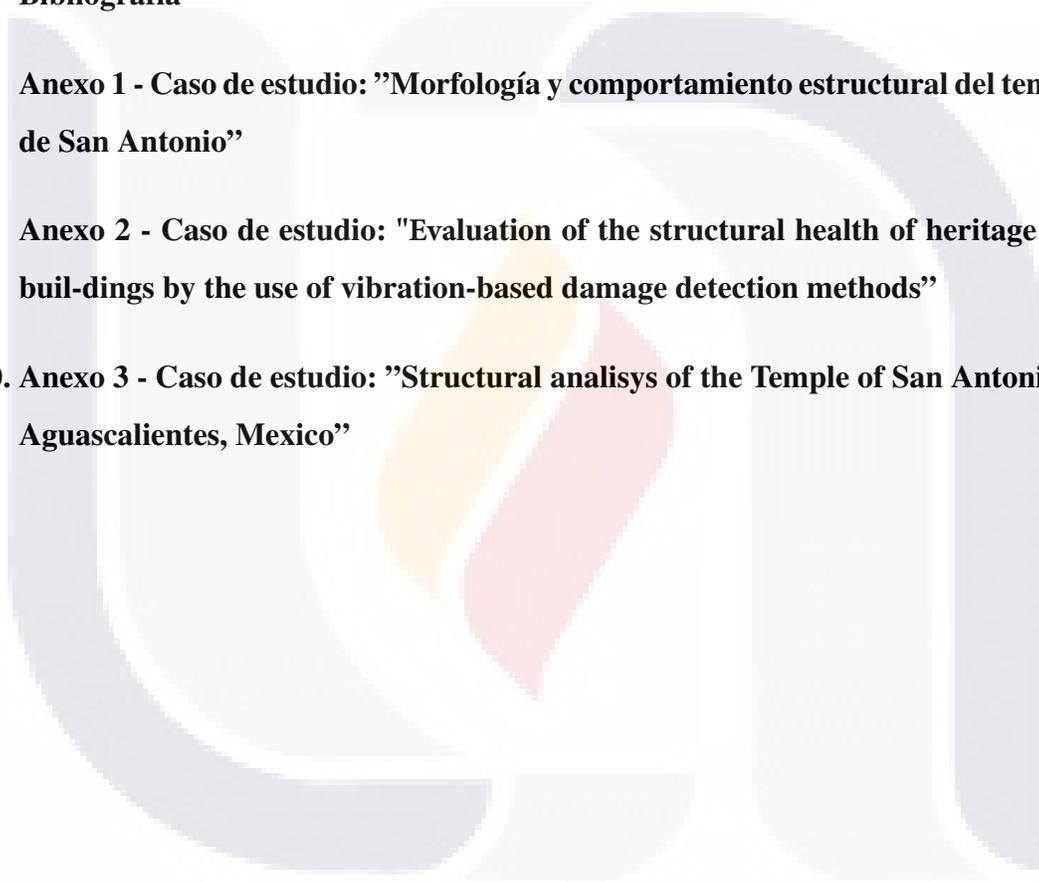
The study of the vibrations as a source of information to monitor changes in the structural health, are used as alternating technique to the visual inspection in the programs of maintenance of bridges in several parts of the world. The principle of the methodology consists to measure the vibrations of the structures for effect of the environmental noise and determine the dynamic characteristics of the structure (i.e. natural frequency, modal characteristics, etc.). The main hypothesis of the methodology proposes that when decreasing the structural efficiency, there is a change in the dynamic properties of the structure (i.e. associated to the stiffness or aging of the materials). The heritage buildings cannot generally be evaluated in their structural health by traditional techniques (load tests, extraction of samples). The ambient vibration monitoring is a viable option to know the structural assessment of these buildings and propose a plan of preventive maintenance to improve its conservation, or the maintenance campaigns to guarantee its stability.

Índice general

Lista de figuras	XI
1. Introducción	1
1.1. Planteamiento del problema	5
1.1.1. Daño en estructuras históricas	8
1.2. Justificación de la investigación	11
1.2.1. Importancia social	14
1.3. Hipótesis	16
1.4. Caso de estudio	21
1.4.1. Justificación del caso de estudio	22
1.5. Objetivo de la investigación	23
2. Antecedentes	25
2.1. Monitoreo de la salud estructural	25
2.1.1. Métodos clásicos no destructivos de S.H.M.	32
2.1.2. S.H.M. Moderno	34
2.1.3. S.H.M. de construcciones históricas	37
2.1.4. Estudios de monitoreo de estructuras de mampostería	51
2.1.5. Estudios de monitoreo en estructuras históricas de mampostería	53
2.1.6. Otros métodos de monitoreo de construcciones históricas	65
2.2. Normativa de vibraciones en edificaciones históricas	68
2.3. Recomendaciones de ICOMOS para el monitoreo de estructuras históricas	73

3. Estado del arte	77
3.1. Análisis estructural de construcciones históricas	77
3.2. S.H.M. mediante el uso de vibraciones	93
3.2.1. Sistemas de monitoreo estructural	94
3.2.2. Respuesta ante la vibración ambiental	95
3.2.3. Marco teórico (S.H.M.)	96
3.2.4. Monitoreo de la salud global	123
3.2.5. Factores que alteran el monitoreo	125
3.3. Detección de daño basado en vibraciones	129
3.3.1. Niveles de daño	133
3.3.2. Métodos locales y globales	136
3.3.3. Objetivo de los métodos de detección de daño	138
3.4. Métodos de detección de daño basado en vibraciones	140
3.4.1. Actualización modal	145
3.4.2. Sintonización de modelos	150
3.4.3. Búsqueda global	155
3.4.4. Detección de daño (problema hacia adelante)	156
3.4.5. Detección de daño (problema hacia atrás)	156
3.4.6. Detección de daño (teorema de Bayes)	157
3.4.7. Detección de daño basado en el cambio de curvatura	157
3.4.8. Detección de daño basado en el cambio de frecuencia	162
3.4.9. Detección de daño basado en el cambio de flexibilidad	170
3.4.10. Detección de daño basado en el cambio de rigidez	172
3.4.11. Detección de daño basado en el cambio de formas modales	173
3.4.12. Criterios de confiabilidad modal	174
3.4.13. Criterios de confiabilidad de la flexibilidad modal	178
3.4.14. Criterios de confiabilidad en coordenadas	178
3.4.15. Observaciones importantes de expertos en la materia	179
3.4.16. Observaciones para su uso en edificios históricos	181

3.4.17. Opiniones de expertos respecto al tema	183
4. Metodología propuesta para la identificación de daños	185
5. Discusión de resultados	201
6. Conclusiones	215
7. Bibliografía	217
8. Anexo 1 - Caso de estudio: "Morfología y comportamiento estructural del templo de San Antonio"	244
9. Anexo 2 - Caso de estudio: "Evaluation of the structural health of heritage buildings by the use of vibration-based damage detection methods"	262
10. Anexo 3 - Caso de estudio: "Structural analysis of the Temple of San Antonio in Aguascalientes, Mexico"	276



Índice de figuras

1.1. Estructura con frecuencia natural propia.	18
1.2. Cambio de frecuencia natural en las estructuras debido al daño.	18
1.3. Cambio de frecuencia natural de una estructura la ser rehabilitada.	19
1.4. Cambio de rigidez en una estructura.	20
1.5. Templo de San Antonio.	22
2.1. Composición del S.H.M. (Dong, 2010).	27
2.2. Métodos para adquisición de datos.	30
2.3. Esquematación de la respuesta ambiental (Torres, 2009).	34
2.4. Diagrama de funcionamiento del S.H.M. (Xu, 2012).	43
2.5. Metodología de evaluación propuesta por ICOMOS.	45
2.6. Metodología de evaluación propuesta por (Rainieri, 2011).	46
2.7. Límites de vibración en la literatura (Wilson, Ihrig and Associates, Inc., 2012).	72
3.1. Herramientas o fuentes de información para investigar una estructura histórica.	80
3.2. Modelos estructurales de construcciones históricas.	85
3.3. Actividades fundamentales del monitoreo estructural.	106
3.4. Respuesta estructural.	130
3.5. Diagrama general de la V.B.D.D. (Zhou, 2006).	132
3.6. Propuesta de procedimiento de detección de daño (Atienza, 2004).	133
3.7. Niveles en el proceso de identificación de daño en estructuras.	134
3.8. Procedimiento para detección de daño basado en vibraciones en puentes (Wang, 2009).	138

3.9. Principales métodos de detección de daño (Wang, 2009). 144
3.10. Validación de la actualización de modelos (Wilhelmina, 1992). 148
3.11. Detección de daño basado en el cambio de curvatura. 161
3.12. Tres primeros modos de vibrar de una viga empotrada. 176
4.1. Metodología. 199



Capítulo 1

Introducción

La construcción con mampostería simboliza el inicio de la época en la que los habitantes de la cueva dieron paso hacia la vida civilizada. El hombre primitivo, con el tiempo descubrió el método para organizar las piedras, de tal manera que podría proporcionar un resguardo aparte de la cueva para la construcción de un mejor hábitat. Las técnicas para ensamblar piedras, ladrillos y bloques son esencialmente los mismos que los desarrollados hace unos mil años. Y naturalmente, innumerables variaciones de materiales de albañilería, técnicas constructivas y aplicaciones se produjeron durante el transcurso del tiempo (Lourenço, 1996).

Casas primitivas fueron construidas mediante arreglos cuidadosos de las piedras donde no se utilizaban morteros o materiales de unión. La mampostería de piedra fue reemplazada por construcciones de mampostería de ladrillos de arcilla en Asia occidental, esto debido a que carecían de afloramientos de piedra, pero era rico en depósitos de arcilla. La humanidad ganó mucha experiencia en el proceso de construcción, diferentes ideas vinieron en forma de tipologías de construcción que impedían la falla prematura de las construcciones, que tomó mucho tiempo para ser entendido. Los egipcios tenían templos techados con losas de piedra, los griegos utilizaron vigas de madera cubiertas con piedra fina, y los romanos construyeron sistemas innovadores de piedras en forma de arcos dando una brillante solución a la falla por gravedad. El arco romano sufrió una modificación importante en la Edad Media en la evolución de la ojiva, que proporcionó un fuerte esqueleto que descansaba sobre pilares

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

adecuadamente espaciados. Las estructuras de mampostería masivas de los romanos dieron lugar a crecientes bóvedas apoyadas por contrafuertes. Y con el advenimiento de las formas góticas. La construcción con mampostería en un sentido histórico, estructuralmente fue utilizada en su totalidad como un material empleado para trabajar a compresión (el uso adecuado en el diseño más eficaz para la piedra).

Con la introducción de la armadura en el siglo XVI, el auge de los análisis científicos estructural en el siglo XVII, y el desarrollo de materiales de alta resistencia (acero y concreto) en el siglo XIX, la importancia de la albañilería como material declinó. En la cuarta década del siglo XX, el descubrimiento de hormigón casi tomó la posición de la mampostería ya que proporciona una mayor manejabilidad y también superó la desventaja con respecto a la falta de resistencia a la tensión en la mampostería. El refuerzo de acero se convirtió en parte integrante de concreto para mejorar la resistencia. De esta manera la atención sobre el estudio y la perspectiva de la mampostería se debilitó durante el siglo anterior (Kumar, 2008).

Dentro de dicha evolución en el ámbito constructivo, quedó como vestigio una amplia gama de edificaciones de distinta índole, conocidas actualmente como estructuras históricas. La herencia cultural incluye una diversidad amplia de monumentos arquitectónicos y arqueológicos considerados trascendentales tanto para las poblaciones locales como la comunidad internacional. Los cuales toman importancia por ser un legado cultural que requiere ser preservado para futuras generaciones debido a la riqueza de su arquitectura y la autenticidad de sus materiales, dicha jerarquía se basa en diferentes actores: i) identidad cultural; ii) imaginarios; iii) valor social; iv) marco histórico; v) valor arquitectónico; y vi) valor artístico (Animas, et al., 2014).

Actualmente la preservación del patrimonio arquitectónico se considera una cuestión fundamental en la vida cultural de las sociedades modernas. Debido a que además de su interés histórico, los monumentos contribuyen significativamente a la economía de las ciudades y varios países (Ramos, 2007a). Desde las últimas décadas del siglo XX, el estudio analítico

de las estructuras históricas de mampostería ha llamado la atención de un pequeño número de investigadores, pero debido a que son pocos los expertos que trabajan en este campo, el progreso de la investigación para la comprensión de su comportamiento no ha sido satisfactorio (Lourenço, 1996). A partir de la década de los 90's la importancia de las estructuras patrimoniales, ha sido reconsiderada, esto debido a que para tener seguridad respecto a su capacidad, ya no es suficiente ejecutar obras de rehabilitación, sino también es obligatorio llevar a cabo una actividad de monitoreo continuo (Lisman, 2012). Hay que reconocer de igual forma, el actual círculo de investigación de la ingeniería estructural está orientado a materiales y sistemas modernos. El análisis estructural de las edificaciones patrimoniales antiguas, es un gran desafío, se ha admitido por parte de los expertos en este campo, que es inherente a la complejidad geométrica y edad de las construcciones (Lourenço, 2001; Roca, 2001; Modena, 2004). Debido a la falta de investigación, los códigos no están suficientemente desarrollados y hay una falta de conocimiento sobre el comportamiento de este material compuesto. El punto fundamental de la investigación de hoy en mampostería estructural se enfoca en normalizar el diseño de ingeniería de la mampostería estructural.

La conservación de estas estructuras presenta una fascinante y diversa gama de retos científicos, en particular, la necesidad de protegerlas de manera efectiva debido a la degradación que presentan. Existe una gran complejidad en su análisis, ya que cuentan con una gran heterogeneidad de materiales (generalmente mampostería con fragmentos de roca y aglutinantes de diversos orígenes y características), así como el hecho de que este tipo de edificios se construyeron en un lapso de tiempo de varios años; hace que sea muy difícil hacer una caracterización representativa de las propiedades de los diversos materiales usados, e inclusive en muchos casos con técnicas constructivas distintas aplicadas dentro de su lapso de construcción.

Generalmente los edificios patrimoniales no pueden ser evaluados en su salud estructural mediante las técnicas tradicionales invasivas o destructivas (pruebas de carga y extracción de muestras). El empleo de la respuesta dinámica ante la vibración ambiental es una opción

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

viable para evaluar el estado de la salud estructural de este tipo de construcciones (Pacheco, et al., 2012a).

Es sabido que las propiedades dinámicas de una estructura son función de su masa, rigidez y capacidad de disipación de energía. Un cambio en estas propiedades, ya sea debido a pérdida del material, corrosión, degradación o fatiga del material, erosión o grietas, van a tener una influencia directa en el comportamiento dinámico de la estructura (Vázquez, et al., 2004). La hipótesis principal de la metodología propone que al reducirse la eficiencia estructural, hay un cambio en las propiedades dinámicas de la estructura (asociadas a la rigidez) (Pacheco, et al., 2012a). El principio de la metodología del presente trabajo a grandes rasgos, consiste en medir las vibraciones de las estructuras por efecto del ruido ambiental para determinar las características dinámicas de la estructura (frecuencia natural y modos de vibrar), y mediante la comparación ante modelos analíticos, determinar condiciones de seguridad estructural y patrones de degradación o pérdida de propiedades resistentes de los materiales.

El hecho de que el cambio de las propiedades estructurales causen cambios en la frecuencia de vibración, es una razón para usar métodos dinámicos para la identificación de daño considerando que la frecuencia natural es una propiedad global de la estructura (Zhu, et al., 2005). El análisis dinámico puede ser usado para cuantificar la degradación de las propiedades mecánicas de construcciones de mampostería, tiene la ventaja sobre técnicas convencionales ya que la frecuencia con que vibre el elemento estará en función de la condición de los materiales como un "todo", por lo que se puede clasificar la calidad de la mampostería dependiendo de sus propiedades dinámicas (Herrera, et al., 2008). A partir dicha conjetura, parece que la propuesta es útil y aplicable a estructuras históricas de mampostería. La observación de la frecuencia natural parece ser un enfoque fiable para la detección de daños (Lourenço, 2008).

El uso de los métodos basados en las características dinámicas para evaluar los daños es una herramienta atractiva para aplicar en este tipo de estructuras debido a que los requeri-

mientos actuales, la intervención física es prácticamente mínima y se respeta la construcción original. La suposición de que el daño se puede vincular a una disminución de la rigidez parece ser razonable para este tipo de estructuras (Ramos, 2007b).

1.1. Planteamiento del problema

La edificación en la antigüedad se practicaba a base de conocimientos tradicionales y los procesos constructivos obedecían reglas prácticas muy generales, no fue sino hasta final del siglo XVII, cuando se desarrollaron teorías de análisis estructural que permitieron dimensionar los elementos de las construcciones. Por lo anterior, desde las últimas décadas del siglo XX, el estudio analítico de las estructuras históricas de mampostería ha llamado la atención de un pequeño número investigadores, pero debido a que son pocos los expertos que trabajan en este campo, el progreso de la investigación para la comprensión de su comportamiento, no ha sido satisfactorio (Lourenco, 1996).

Cualquier tipo de estructura de ingeniería se encuentra expuesta a cargas estáticas y dinámicas que pueden ser de origen natural o transitorio (Zuluanga, 2012). A medida que el tiempo transcurre, las construcciones dejan de servir de la misma manera que cuando fueron construidas; es decir, sus propiedades tanto mecánicas como geométricas e incluso estéticas se degradaran paulatinamente. Diferente es el caso cuando una estructura que se encuentra en plena capacidad de servicio es afectada por eventos extremos, tales como sismos, huracanes, tornados, inundaciones, explosiones o medio ambientes agresivos, pues entonces se provoca una degradación mecánica acelerada, que puede verse reflejada de diversas formas en el comportamiento estructural de la misma. Todas las situaciones expuestas anteriormente, son causantes de daño (Ancona, 2010). En base a los daños existentes es muy importante poder predecir si la estructura es estable o bien si requiere algún tipo de reparación (Botello, 2006).

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

Las estructuras históricas requieren intervenciones periódicas con el fin de preservarlas del deterioro, y de vez en cuando necesitan restauración más precisa con el fin de corregir los daños causados por los fenómenos naturales (Anastasi, 2009). El daño en las estructuras de mampostería se refiere principalmente a: grietas, los asentamientos diferenciales, la degradación de los materiales y las deformaciones. Cuando se producen las grietas, por lo general pueden ser localizadas, al igual que la división entre elementos estructurales. El conocimiento del nivel de salud del edificio y de sus diferentes secciones, permitirá el planificar las acciones de preservación y restauración no sólo de las partes ornamentales del edificio, sino también de los elementos que permiten que permanezca estable y con los niveles de seguridad adecuados para su uso y permanencia en el tiempo.

El estudio del patrimonio histórico desde el punto de vista estructural plantea varios desafíos: i) la caracterización de materiales por la diversidad de calidades y tipos de materiales (materiales compuestos) y por la degradación de sus propiedades; ii) la geometría de los edificios por su complejidad; iii) la discontinuidad en los elementos causadas por los rellenos, cavidades e inserciones; iv) el determinar las acciones de diferente naturaleza que actuaron a lo largo del tiempo histórico; v) la integración a la modelación numérica de los daños, miembros deformados o agrietados; vi) la adquisición de datos está limitada por el respeto de las condiciones originales del monumento y las pruebas no destructivas o no invasivas tienen un alcance limitado; vii) existe documentación que recopila la historia del edificio que desapareció al paso del tiempo por diversos factores (Roca, et al., 2009). Aunado a lo anterior, cabe agregar que existen grandes variaciones de las propiedades mecánicas de los materiales debido a: viii) el empleo de distintos bancos de materiales; ix) las secuencias o periodos del proceso de construcción no se tienen registradas con claridad; y x) que debido a la gran cantidad de mano de obra empleada, se tiene como resultado el mismo número de técnicas de fabricación de elementos ejercidas.

Las estructuras de mampostería antiguas muestran propiedades mecánicas muy inciertas debido a las siguientes razones (De Stefano, 2006): i) no siempre las irregularidades geométri-

cas y la textura interna de mampostería son visibles, ya que pueden implicar la falta de continuidad de materiales, volúmenes vacíos ocultos, paredes más o menos llenas de escombros; ii) variabilidad local de la resistencia del material y la rigidez, debido a defectos originales o degradación electroquímica; iii) distribución de grietas; iv) efectos de los últimos daños y reparaciones (cambios de arquitectura y manipulaciones locales).

El análisis estructural de las construcciones patrimoniales antiguas, construidas utilizando el sentido filosófico y la práctica tradicional, es un gran desafío. Se ha admitido, sin duda, por los expertos en este campo que la complejidad es inherente a la propia construcción. La ramificación de conocimientos avanzados para el estudio de las estructuras modernas, propias de este campo es relativamente nueva. Y el análisis de las construcciones históricas sigue siendo un tema complejo (Blinda, 2000; Lourenço, 2001; Roca, 2001; Modena, 2004).

Saber la integridad de una estructura en relación con su edad, uso y su nivel de seguridad para resistir eventos es importante y necesario. En vista del número apreciable de las estructuras viejas todavía hoy en uso existe una atención grande respecto a la preservación y a asuntos de rehabilitación. Una valoración de seguridad por medio de métodos convencionales y acústicos no puede estar basada únicamente en la observación visual de rajaduras y señales de daño en elementos estructurales (Carpinteri et al., 2006).

Para realizar una correcta determinación del estado de la salud estructural de una edificación, se debe de tomar en cuenta la caracterización de las propiedades mecánicas de sus elementos. Actualmente la práctica habitual consiste en la obtención de núcleos o corazones de roca que forma la estructura de mampostería para realizar pruebas de laboratorio en ambientes controlados. De lo anterior se observa la necesidad de implementar una metodología para la caracterización global de la estructura, de tal manera que se tomen en cuenta las variaciones, heterogeneidades y patologías para poder dar una evaluación certera de su estado de condición estructural.

1.1.1. Daño en estructuras históricas

Cualquier tipo de estructura de ingeniería, ya sea un edificio, puente, barco o avión, se encuentra expuesta a cargas estáticas y dinámicas que pueden ser de origen natural o transitorio, como las debidas al viento o a movimientos sísmicos y acción antrópica. Estas cargas generalmente varían en intensidad, dirección y posición de forma repentina (Zuluanga, 2012). A medida que el tiempo transcurre, las construcciones dejaran de servir de la misma manera que cuando fueron construidas; es decir, sus propiedades tanto mecánicas como geométricas e incluso estéticas se degradaran paulatinamente. Diferente es el caso cuando una estructura que se encuentra en plena capacidad de servicio es afectada por eventos extremos, tales como sismos, huracanes, tornados, inundaciones, explosiones, actos terroristas o medio ambientes agresivos, pues entonces se provoca una degradación mecánica acelerada, que puede verse reflejada de diversas formas en el comportamiento estructural de la misma. Todas las situaciones expuestas anteriormente, son causantes de daño (Ancona, 2010).

En los términos más generales, daño serán todos aquellos cambios que deterioran un sistema afectando negativamente al rendimiento del mismo (Arun, 2013). En el ámbito de la ingeniería civil, el daño se puede definir como el cambio en las propiedades materiales y/o geométricas de la estructura, incluyendo sus condiciones de frontera, conectividad entre elementos, secciones transversales geométricas, cargas, propiedades materiales y cualquier otro factor capaz de provocar un comportamiento inusual, presente o futuro, de la estructura (Doebbling, 1998). El daño introduce cambios a un sistema que afectan de manera adversa su desempeño actual o futuro. En esta definición se encuentra implícito el hecho de que este concepto de daño, cobra significado únicamente mediante una comparación entre dos estados de la estructura, uno de los cuales se considera el estado inicial siendo en algunos casos el estado sin daño (Anaya y Barajas, 2011). Por lo tanto, cambios tan mínimos como una fisura en un elemento estructural produciría cambios locales en la flexibilidad del mismo, que se traducirían en cambios del comportamiento estático y dinámico de la estructura (Robles, 2005). En resumen, daño es el conjunto de cambios introducidos en un sistema que puede llegar a provocar la pérdida de funcionalidad del mismo (Hernandez, 2005).

Algunos monumentos históricos como muchos del resto de los demás edificios, siguen en servicio aun estando dañados por diversas razones, y en condiciones de riesgo para los usuarios del inmueble, por lo que requieren que se les determine el grado de daños y el riesgo en el que subsisten, para posteriormente, realizar los trabajos de restauración y de re-estructuración necesarios a que sean candidatos, para su uso sin riesgo evidente. La evaluación de la seguridad estructural de una edificación requerirá determinar su capacidad resistente. Dicha capacidad podrá determinarse mediante los métodos del análisis elástico convencional, y estará definida por el nivel de acciones con el cual la estructura alcanza un primer estado límite de falla o de servicio (Carpio, 2011).

Tres factores principales propician la degradación de las propiedades de los materiales de construcción usados en la construcción de dichos edificios: 1) intemperismo; 2) procesos de biodeterioración; y 3) acción humana o contaminación antrópica (Herrera, et al., 2012). Hay una interrelación íntima entre los tres factores mencionados aquí como las causas principales de la decadencia de los materiales. El clima influye con las condiciones ambientales locales al aumentar la biodeterioración a través de los efectos de cinéticos directamente. La micro flora mejora el nutriente y los niveles de humedad necesarios para el crecimiento microbiano moldeando sobre la superficie. Cabe de igual forma agregar otros tres factores adicionales: 4) abandono; 5) falta de mantenimiento; e 6) invasión de fauna local. La presencia de los excrementos de las palomas pueden convertirse en causa del deterioro de elementos de mampostería, ya que afectan a la composición de los ladrillos de arcilla y desencadenan una reacción química dentro de sus componentes (Merluzzi, 2008). Otro problema para la estabilidad de los edificios antiguos es la presencia masiva de tráfico de automóviles y vehículos pesados, que causa vibraciones aleatorias.

La intemperie produce efectos mecánicos y químicos sobre la mampostería tanto en la roca como el aglutinante. Para el primero efecto, la mampostería es violentada por procesos físicos (golpeo, fricción, sobrecarga); para el segundo, la mampostería pasa por cambios

químicos que resultan en su desintegración paulatina. El clima junto con las condiciones ambientales locales influye también en la degradación de la mampostería al aumentar la biodeterioración a través de los efectos de organismos como la micro flora y micro fauna. La micro flora mejora los nutrientes y los niveles de humedad necesarios para el crecimiento microbiano establecido sobre la superficie de la mampostería (Herrera, et al., 2008, Carpinteri, et al., 2006; Kumar, 2008; Herrera, 2008; Török, 2010).

Los cambios ambientales, como los cambios climáticos y el deterioro de calidad del aire, son manifestados a menudo sobre superficies de piedra. Las típicas características del impacto ambiental que pueden ser detectadas fácilmente que incluyen el cambio de color, la formación de sulfatos o manchado superficial. Humedad o contenido de sal están también en parte conmovidos por los cambios ambientales y también se relacionan con la composición mineral de piedra. Algunos de los parámetros que se observan para identificar daños en la mampostería son: 1) cambios del color, 2) variaciones de la temperatura de un punto a otro, 3) el contenido de agua, 4) la absorción de agua, 5) la textura y aspereza de la mampostería, 6) la resistencia superficial al impacto y 7) la densidad (Kumar, 2008; Herrera, et al., 2008). Aunque las técnicas de diagnóstico pueden ser usadas muy eficientemente en la evaluación de la condición de calidad actual de la mampostería, no proveen resultados representativos relacionados con la naturaleza de heterogénea de la mampostería, ya que por ser un material de construcción con insumos naturales (roca) tiene diferencias importantes en mineralogía y en propiedades mecánicas de un punto a otro aún en un mismo elemento estructural (Török, 2010).

El daño estructural afecta la rigidez original resultando, por lo tanto, mayor flexibilidad de la estructura y consecuentemente mayor vulnerabilidad a las acciones dinámicas, razón por la cual se hace necesaria su auscultación a efectos de adoptar, de acuerdo a los resultados, medidas correctivas que permitan que la estructura continúe con las prestaciones establecidas en el proyecto (Peralta, 2008). A los efectos de clasificar el daño, estamos interesados en la extracción de las características de los datos observados que basadas en representaciones

tiempo-frecuencia pueden idóneamente para esta tarea caracterizar la representación física (Chakraborty, 2008).

1.2. Justificación de la investigación

Las estructuras históricas constituyen una parte importante de nuestro patrimonio cultural que a su vez, tenemos el deber de transmitir a las generaciones futuras por toda la riqueza de su arquitectura y la autenticidad de sus materiales. La conservación de estas estructuras presenta una fascinante y diversa gama de retos científicos, en particular, la necesidad de protegerlas de manera efectiva debido a la degradación del medio ambiente. El conocimiento del nivel de salud del edificio y de sus diferentes secciones, permitirá el planificar las acciones de preservación y restauración no sólo de las partes ornamentales del edificio, sino también de los elementos que permiten que permanezca estable y con los niveles de seguridad adecuados para su uso y permanencia en el tiempo.

Los valores intrínsecos por los cuales es importante realizar el mantenimiento y monitoreo de una estructura histórica, son todos aquellos que se podrían perder, sean tangibles o intangibles, en caso de la desaparición del inmueble histórico, como: su arquitectura, su arte, los bienes conservados en el interior del edificio, su valor histórico y cultural, entre otros (Peña, 2010):

a) Arquitectura: además del estilo arquitectónico, la distribución de espacios, usos y modificaciones a lo largo de su historia forman parte del valor cultural del edificio histórico;

b) Arte: el valor artístico reside tanto en su arquitectura, como en todos los demás elementos que le proporcionan una identidad al edificio, como pueden ser: frescos y pinturas murales, elementos de adorno (cielos rasos, adornos en columnas y muros, pisos, etc.), bienes muebles conservados en el interior del edificio, entre otros;

c) Económico: los edificios y centros históricos son, muchas veces, la atracción principal de una ciudad, creando beneficios económicos directos e indirectos;

d) Historia: el valor cultural histórico de un inmueble no se refiere únicamente a la época en que fue construido, sino también a todos los hechos de que ha sido testigo mudo. Como por ejemplo, ser la casa en donde vivió cierto personaje de la historia, lugar donde se redactó o firmó cierto acuerdo;

e) Ingeniería: la concepción estructural de un edificio histórico es también parte de su valor cultural. Ésta muestra en forma tangible las antiguas técnicas de construcción y los materiales usados. Las estructuras de los monumentos constituyen sin duda alguna un documento histórico y un legado vivo de las habilidades de los antiguos constructores.

Existe un interés enorme en todas partes del mundo por tener lugares de interés arquitectónico ya que desde la segunda mitad del siglo pasado el turismo relacionado con las construcciones históricas se convirtió en una industria de rápido crecimiento en Europa, así como en el este de Asia, el norte de África.

Para enfatizar la importancia del estudio de la conservación de estructuras históricas como espacios antrópicos fundamentales, haremos referencia al "Documento de Nara de 1994" sobre la "Autenticidad del patrimonio cultural". Desde un punto de vista muy general, puede decirse que el valor del patrimonio cultural reside en:

- 1.- Sus méritos técnicos, artísticos y espirituales;
- 2.- Su contribución a la identidad de las culturas, las regiones del mundo y los pueblos;
- 3.- Su carácter como documento sobre conocimientos ancestrales, prácticas, cultura, tec-

nología e historia;

4.- Su aportación como recurso económico en tanto que atracción cultural o turística con gran capacidad para generar economía secundaria;

5.- Su importante contribución a la diversidad cultural, al patrimonio cultural mundial y al desarrollo humano.

Este documento, redactado en el marco del congreso internacional en 1994 auspiciado por UNESCO e ICOMOS, tuvo por finalidad establecer la importancia de la autenticidad en relación con la conservación del patrimonio cultural mundial.

Toda intervención en el patrimonio cultural debe, por tanto, orientarse a conservar y mejorar el valor que éste presenta desde todos estos puntos de vista. Cabe notar que todas las fuentes de valor anteriormente mencionadas descansan en la autenticidad del patrimonio como legado cultural e histórico.

La posibilidad de prevenir la ocurrencia de fallas por defectos que puedan surgir en una construcción a través de una detección temprana de los mismos, ha motivado a los investigadores a desarrollar métodos de evaluación que permitan conocer la condición o deficiencias en los elementos estructurales. En otros casos, los defectos pueden estar en una parte de la estructura a la cual no se tiene acceso y por consiguiente no es posible una inspección visual (Drianfel, 2004). Una herramienta aceptable para investigar las características dinámicas de las estructuras existentes son las pruebas de vibración ambiental, las cuales se relacionan con resultados de modelos matemáticos permiten determinar el deterioro progresivo de las estructuras debido a las acciones sísmicas y así la vulnerabilidad de las mismas (J. I. Cruz, 2007).

Por otra parte toda edificación debe de cumplir cierta normativa que satisfaga su segu-

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

ridad estructural tal que su comportamiento estático y dinámico brinde continuidad de los servicios básicos proporcionados por el inmueble y minimice daños a la propiedad por eventos de cualquier tipo que provoquen un aumento en la fatiga interna. Dinámicamente debemos satisfacer de igual forma la rigidez necesaria para que la estructura resista las deformaciones esperadas; teniendo como propósito el obtener una seguridad adecuada tal que, bajo el sismo máximo probable, no habrá fallas estructurales mayores ni pérdidas de vidas, aunque pueden presentarse daños que lleguen a afectar el funcionamiento del edificio y requerir reparaciones importantes (NTC-RDF-2004).

1.2.1. Importancia social

El concepto del patrimonio cultural implica un valor heredado de los ancestros que es fundamental en el concepto de herencia cultural y que no ha cambiado con el tiempo. Debe de considerarse como un valor o activo económico heredado, concepto que se ha ampliado particularmente en virtud del adjetivo calificativo “cultural” (Querejazu, 2010).

El patrimonio cultural está formado por los bienes culturales que la historia le ha legado a una nación y por aquellos que en el presente se crean y a los que la sociedad les otorga una especial importancia histórica, científica, simbólica o estética. Es la herencia recibida de los antepasados, y que viene a ser el testimonio de su existencia, de su visión de mundo, de sus formas de vida y de su manera de ser, y es también el legado que se deja a las generaciones futuras. El patrimonio material o tangible mueble comprende los objetos arqueológicos, históricos, artísticos, etnográficos, tecnológicos, religiosos y aquellos de origen artesanal o folclórico que constituyen colecciones importantes para las ciencias, la historia del arte y la conservación de la diversidad cultural del país (Farfán, 2014).

Aquí, es pertinente introducir el concepto de “imaginario”, que ha venido adquiriendo una creciente presencia en la teoría social y en la investigación aplicada. Diversos autores y estudios empíricos recurren a este concepto para enfatizar el carácter construido de la realidad

social, es decir, que toda comunidad de sujetos actúa en función de instituciones que son creadas por ellos mismos y que tienen la capacidad de determinar la praxis de las personas (Moreno, et al., 2008). Los imaginarios sociales producen valores, las apreciaciones, los gustos, los ideales y las conductas de las personas que conforman una cultura. El imaginario es el efecto de una compleja red de relaciones entre discursos y prácticas sociales, interactúa con las individualidades.

El imaginario no es "imagen", sino condición de posibilidad y existencia para que una imagen sea "imagen de". Y porque no "denota" nada y lo "connota" todo no puede ser captado de manera directa sino de manera derivada, como el centro invisible de lo real-racional-simbólico que constituye toda sociedad y que se hace presente en la conducta efectiva de los pueblos y de los individuos. Por eso es una significación operante con graves consecuencias históricas y sociales (Cabrera, 2004).

También se pueden identificar flujos de servicios no económicos del patrimonio, aquellos que satisfacen necesidades sociales o espirituales de los individuos. En esta categoría de valores socioculturales se incluyen valores que son generalmente difíciles de conceptualizar, más aún de medir. Se reconocen: valores estéticos, vale decir el beneficio que genera a miembros de la comunidad el estar en presencia de un objeto que consideran bello; valores espirituales, que se relacionan con la asociación que individuos y comunidades hacen de edificios o lugares con el culto religioso o el recuerdo de los antepasados; valores sociales que surgen cuando los componentes del patrimonio potencian relaciones entre individuos que son valoradas por la comunidad.

La importancia de un recinto religioso suele darse por la identidad y creencia de la gente en el orden de lo sagrado: bien puede definirse, a grandes rasgos, como un conjunto de prácticas simbólico-rituales que el ser humano establece en relación con el orden de lo sagrado. Lo sagrado va a desbordar, a exceder, la identificación con el campo específico de la religión institucionalizada. Lo sagrado puede adoptar una fisonomía religiosa, pero no exclusivamente.

Puede también adoptar otras modulaciones: la política, el individuo, el progreso, etc. Conviene, entonces, primeramente, elucidar cuales son los rasgos de la religiosidad en general como fenómeno sociológico y más concretamente la persistente fisionomía de lo sagrado en la vida social (Carretero, 2006).

1.3. Hipótesis

Varios procesos externos impactan y fatigan la vida de las estructuras, provocando cambios en la geometría de las mismas y de las propiedades mecánicas de los materiales que las constituyen (National Instruments, 2011). Dichos procesos externos afectan a los parámetros propios de la edificación, estos parámetros son cualquier variable estructural que describa al modelo (ejemplos de los parámetros estructurales son: el módulo de elasticidad y rigidez, la densidad, la geometría, el amortiguamiento, etc.) (Quintana, 2009). Es sabido que las propiedades dinámicas de una estructura son función de su masa, rigidez y capacidad de disipación de energía. Un cambio en estas propiedades, ya sea debido a pérdida del material, corrosión, degradación o fatiga del material, erosión o grietas, van a tener una influencia directa en el comportamiento dinámico de la estructura (Vázquez, 2004).

La hipótesis principal que plantea el monitoreo de la condición estructural de edificios históricos es que cada estructura tiene su comportamiento dinámico típico, el cual puede ser representado en forma vibracional. Los cambios en la estructura, tales como todo tipo de daños que entonces conducirían a disminuir de capacidad de carga, a lo cual se tendrían efectos sobre la respuesta dinámica. Al reducirse la eficiencia estructural, hay un cambio en las propiedades dinámicas de la estructura (asociadas a la rigidez o envejecimiento de los materiales). La utilización de dichos parámetros dinámicos, permitiría determinar un indicador que posibilite evaluar el comportamiento estructural de forma confiable. En este sentido, a partir de un cambio en las características dinámicas de una estructura se puede inferir si presenta una pérdida de rigidez. Esto sugiere el uso de la característica de respuesta dinámica

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

para la evaluación de una integridad estructural, y el seguimiento de la respuesta dinámica de estructuras haría posible obtener un conocimiento muy rápido de su estado real (Wenzel, 2004). Las pruebas de vibración ambiental y Análisis Modal Operacional son medios eficientes para determinar dichas características dinámicas de las estructuras (Peeters, 2011).

El concepto se basa en el axioma de que el grado de degradación se refleja en los cambios en el comportamiento de la estructura, es decir, cambios en las respuestas de salida, y a su vez depende de los cambios en los parámetros estructurales a nivel de elemento en términos de la rigidez y el amortiguamiento como características locales y de sus variaciones con el tiempo. En el enfoque propuesto, el historial del tiempo de la respuesta en aceleración debe estar disponible en los puntos de estudio que quieran ser utilizados en la representación de elementos finitos (Katkhuda, 2005).

Debido a que las frecuencias naturales pueden proveer la información global de las estructuras, pueden exactamente ser medidas por técnicas modernas con sensores y el uso del análisis de modal experimental, lo más importante es que pueden ser obtenidas fácilmente incluso con un bajo nivel de excitación como en la prueba ambiental (Zhu, 2005b). El cambio medurado en las características de vibración como consecuencia de variación de las características de la estructura es un indicador de daño. El indicador de daño más común es el cambio en la frecuencia natural, así como su cambio en las formas de modo de vibrar, muchas otras formas de las características de vibración globales pueden ser extraídas de las mediciones de vibración de dominio de tiempo sin procesar (Prabhu, 2011a).

Toda edificación tiene una frecuencia natural (figura 1), tal en la que ella se encuentra en un estado de equilibrio y a su vez tiene la rigidez necesaria para soportar óptimamente cualquier evento, lo cual es el estado ideal de cualquier construcción.

Todo sistema tiene una o varias frecuencias de vibrar características, dichas frecuencias se determinan según las leyes de la dinámica del movimiento, según esta, dado un sólido rígido;

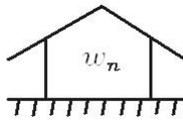


Figura 1.1: Estructura con frecuencia natural propia.

es posible determinar su posición de equilibrio estable. Ahora bien cuando un sistema físico se somete a un estímulo; esto puede dar lugar a la inestabilidad en el sistema o simplemente a la ruptura de algún punto del mismo.

Pero gran parte de las estructuras históricas sufren cambios en sus propiedades internas por una gran variedad de fenómenos que inciden en ellas como pueden ser: asentamientos, subsidencia, agrietamientos de suelo, desmoronamiento de muros elementos, sismos, vibraciones ambientales y envejecimiento de los materiales. Tres factores principales propician la degradación de las propiedades de los materiales de construcción usados en la construcción de dichos edificios: 1) la intemperie de materiales expuestos al ambiente; 2) procesos de biodeterioración; y 3) acción humana y contaminación antrópica. Dichos factores provocarán un cambio de su rigidez y por ende una variación de su frecuencia natural. Los cambios de las propiedades modales (figura 2), indicarán cambios en la estructura en función de la posibilidad de usar dichos parámetros que cambiaron como indicadores para detectar o hasta posiblemente cuantificar el daño estructural existente.

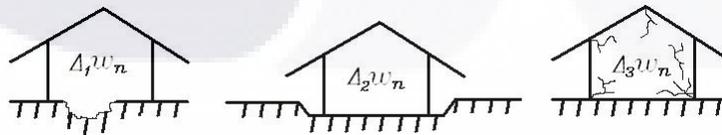


Figura 1.2: Cambio de frecuencia natural en las estructuras debido al daño.

Debido a que las frecuencias naturales pueden proveer la información global de las estructuras, pueden exactamente ser medidas por técnicas modernas con sensores y el uso del análisis de modal experimental, lo más importante es que pueden ser obtenidas fácilmente incluso con un bajo nivel de excitación como en la prueba ambiental (Zhu, 2005b). El

cambio medurado en las características de vibración como consecuencia de variación de las características de la estructura es un indicador de daño. El indicador de daño más común es el cambio en la frecuencia natural, así como su cambio en las formas de modo de vibrar, muchas otras formas de las características de vibración globales pueden ser extraídas de las mediciones de vibración de dominio de tiempo sin procesar (Prabhu, 2011a).

La hipótesis principal de la metodología propone que al reducirse la eficiencia estructural, hay un cambio en las propiedades dinámicas de la estructura (asociadas con la rigidez).

La generación de discontinuidades entre los elementos estructurales de un edificio debido a fracturas y cuarteaduras, y el cambio de las propiedades mecánicas de los materiales debido al intemperie o fatiga, propicia cambios en las propiedades dinámicas que comienzan cuando se modifican las propiedades estructurales, principalmente la rigidez. Basándose en esta relación entre la degradación en la salud estructural y los cambios en la respuesta dinámica del edificio, el monitoreo de la salud estructural aspira a la detección del daño así como a la ubicación de la zona o elemento dañado, el grado de afectación y la extensión de la zona dañada (Prabhu, 2011). De la misma manera una estructura dañada al ser rehabilitada (figura 3) sufre una variación en su rigidez, que puede ser cuantificada teóricamente, es decir, mediante análisis numéricos:

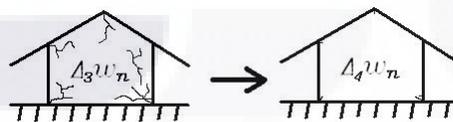


Figura 1.3: Cambio de frecuencia natural de una estructura la ser rehabilitada.

Dado a que no puede ser medida directamente la salud estructural de un edificio, se debe realizar un análisis a partir de datos empíricos derivados de la estructura (respuesta a la vibración ambiental).

Retomando nuestra hipótesis y lo expuesto anteriormente; el comportamiento ideal de

una estructura”sufre un cambio (figura 4) debido a que existen distintos factores que alteran su frecuencia natural propia, dando lugar a una inestabilidad estática y una apertura del rango de comportamiento dinámico que provocan que la ”salud estructural”decaiga.

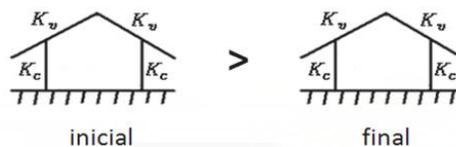


Figura 1.4: Cambio de rigidez en una estructura.

Los cambios de las propiedades modales indicarán cambios en la estructura en función de la posibilidad de usar dichos parámetros que cambiaron como indicadores para detectar o hasta posiblemente cuantificar el daño estructural existente. El que algún cambio en las propiedades estructurales cause cambios en la frecuencia de vibración es una razón para usar métodos dinámicos para la identificación de daño considerando que la frecuencia natural es una propiedad global de la estructura, de igual forma, hay que tomar en cuenta que: ”la frecuencia no puede proveer la información espacial sobre los cambios estructurales en general”(Zhu, 2005).

Aunque la pérdida de elementos estructurales importantes de la estructura resulta en los cambios medibles de la frecuencia natural del edificio, en estructuras hiperestáticas no se puede detectar daños y afectaciones que se compensan mediante una redistribución de esfuerzos hacia otros elementos. Por lo tanto, la metodología no proporcionará la información para caracterizar el daño a nivel local en una estructura (Chang, 2003).

Para poder conocer los cambios en las características dinámicas de los edificios, será necesario recurrir a la instrumentación sísmica para obtener datos experimentales. La instrumentación consiste en la instalación de aparatos que registran datos bien sea de movimientos o deformaciones de una estructura o sitio del que se desea obtener información. Esta información puede ser de desplazamientos, velocidades, aceleraciones, fuerzas, entre otros y

permiten la caracterización de la estructura y la identificación de las propiedades dinámicas de la estructura (Henaó, 2013). Esta implica determinar la cantidad y ubicación adecuada de los dispositivos necesarios para conocer la respuesta de las estructuras. Los parámetros modales identificados experimentalmente durante el monitoreo pueden ser representativos del comportamiento estructural en condiciones de funcionamiento, y que pueden ser utilizados para validar o actualizar los modelos de elemento finito. Por otra parte, los cambios en los parámetros modales pueden ser relacionados con el daño estructural. La combinación de los modelos numéricos y los datos experimentales puede ofrecer oportunidades interesantes en el campo de la protección sísmica de estructuras estratégicas o históricas. De hecho, los modelos analíticos actualizados se pueden utilizar para evaluar de manera efectiva el riesgo de estas estructuras (Conte, 2011).

1.4. Caso de estudio

El edificio propuesto como caso de estudio, se trata del templo de San Antonio ubicado en el centro histórico de la ciudad de Aguascalientes (figura 5). El edificio es considerado emblemático e icónico de la ciudad de Aguascalientes, y único en México por su arquitectura ecléctica resultado de la combinación de diversos estilos (Villegas, 1974), por lo que su preservación es de primera importancia para la imagen urbana del centro histórico de la ciudad de Aguascalientes.

La evaluación de la salud estructural de edificios patrimoniales como el templo de San Antonio no puede ser determinada mediante las técnicas tradicionales, las cuales incluyen muestreo de materiales y pruebas de calidad destructivas, o inclusive pruebas de carga. Aunado a esto la gran heterogeneidad de materiales usados, generalmente mampostería con fragmentos de roca y aglutinantes de diversos orígenes y características, así como el hecho de que este tipo de edificios se construyeron en un lapso de tiempo de varios años hace que sea muy difícil hacer una caracterización representativa de las propiedades de los diversos

materiales usados, inclusive en muchos casos las técnicas constructivas de algunos elementos no permite conocer si son elementos huecos, macizos o rellenos con otros materiales.



Figura 1.5: Templo de San Antonio.

Actualmente el edificio muestra cuarteaduras en su fachada principal que van desde la base de sus torres hasta el dintel del acceso principal, los daños denotan una patología cuyas causa y efectos finales aún no han sido determinados. El edificio ha mostrado daños en diferentes secciones observados por primera vez hace 25 años, los cuales se han incrementado en número e intensidad. No hay un estudio que explique las causas, ni los efectos en la estructura de dichos daños, sin embargo se cree que las diferentes intervenciones con materiales diferentes al de la construcción original, así como el incremento del tránsito vehicular de los últimos años son las causas de los daños observados (García-Ruvalcaba, 2012).

1.4.1. Justificación del caso de estudio

Los edificios patrimoniales como el templo de San Antonio son parte de la historia y del entorno Urbano del Centro de la ciudad de Aguascalientes. Las acciones realizadas para su

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

mantenimiento se han programado principalmente en base a inspecciones oculares, guiándose por el aspecto de la parte más superficial del edificio y no por su comportamiento estructural. Estas intervenciones preservan "la piel" del edificio (acabados, pinturas murales, ornamentos adosados etc.), sin embargo no se conoce el estado o condición de salud de la estructura del edificio, la cual consiste en los elementos que mantienen de pie al templo (muros de carga, columnas, cúpulas, arcos, cerramientos etc.).

El conocimiento del nivel de salud del edificio y de sus diferentes secciones, permitirá el planificar las acciones de preservación y restauración no sólo de las partes ornamentales del edificio, sino también de los elementos que permiten que permanezca estable y con los niveles de seguridad adecuados para su uso y permanencia en el tiempo.

1.5. Objetivo de la investigación

Plantear una metodología viable para evaluar la salud estructural de monumentos y edificios históricos sin el uso de técnicas invasivas, mediante el monitoreo de la respuesta estructural ante vibración ambiental, aunado con la interpretación matemática del modelo físico de estudio.

El proyecto propuesto dará con la metodología para realizar una evaluación de la salud estructural de edificios patrimoniales mediante el estudio de su comportamiento dinámico (prácticamente sin tocar el inmueble más que para la colocación de los sensores para la obtención de datos). La metodología que resulte de esta investigación será de gran valía como herramienta de diagnóstico de cualquier tipo de edificio patrimonial en donde las técnicas tradicionales (pruebas de carga, extracción de probetas, etc.) no se pueden emplear por el "daño colateral" que causan al edificio estudiado.

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

Capítulo 2

Antecedentes

2.1. Monitoreo de la salud estructural

El concepto de salud se asocia a un estado de bienestar físico, mental y social, según la definición de la O.M.S. (Organización Mundial de la Salud). Sin embargo, esta definición también se aplica a las estructuras y construcciones a través de un concepto denominado "Monitoreo de Salud Estructural"(S.H.M., con sus siglas en inglés). El monitoreo de la salud estructural, corresponde a un campo de reciente investigación dentro de la dinámica estructural-experimental. Entre los objetivos de esta materia se destaca la generación de un diagnóstico y caracterización de la respuesta de una estructural ante diversas condiciones y acciones, mediante el uso de sistemas de medición y observación (Boroscheck, 2010). El S.H.M. ha sido definido como la observación e interpretación del desempeño de la infraestructura civil (puentes principalmente), es la identificación ininterrumpida del comportamiento de una estructura mediante el uso de datos dependientes del tiempo (Chang, 2003; Doebling, 1998; Farrar, 2006; Kie, 2001; Prabhu, 2011b; Ventura, 2010). El SHM es un campo emergente en la ingeniería civil, que ofrece la posibilidad de una evaluación continua y periódica de la seguridad y la integridad de la infraestructura civil. Con base en el conocimiento del estado de la estructura, es posible tomar algunas medidas preventivas para prolongar la vida útil de la estructura y evitar alguna falla catastrófica. El sistema S.H.M. a menudo ofrece la oportunidad de reducir el costo para el mantenimiento y la reparación para incrementar la vida útil

de la estructura (Arun, 2013).

A finales de 1970, la consideración de la relación física y tangible entre la rigidez, masa y los cambios de frecuencia naturales fue el impulso para el uso de métodos modales en la identificación de los daños. En teoría, cuando se produce el daño, las frecuencias naturales de una estructura disminuyen. Desde los primeros trabajos, una gran cantidad de investigaciones se han llevado a cabo mediante el uso los cambios de frecuencias naturales como indicadores de daño. No sólo es el tema más estudiado en la identificación de daños basados en la vibración, sino también es el enfoque que más se aplica. La razón principal de su gran popularidad es que las frecuencias naturales son bastante fáciles de determinar con un nivel relativamente alto de confianza y en muchas aplicaciones se requiere un solo sensor. Además, las frecuencias naturales tienen mucho menos variación estadística de fuentes de error aleatorios que otros parámetros modales , lo que los convierte en un medio viable en la evaluación de daños (Dackermann, 2010).

El término S.H.M. aparece originalmente a finales de la década de 90's, donde anteriormente fueron desarrolladas las tecnologías de monitoreo y adquisición de datos (figura 6). Cuando se implementa en la práctica el S.H.M. existen varias preguntas acerca del rendimiento estructural durante la vida de servicio, el mantenimiento y administración de la estructura con todos los avances tecnológicos que vienen detrás del monitoreo. El "monitoreo basado en vibraciones"(vibration- based monitoring, V.B.M. con sus siglas en inglés) se enfoca en el comportamiento dinámico de una estructura que se constituye como el mayor componente del S.H.M. del que es una sub-rama, en el cual más allá de la observación e interpretación, su base es la continua identificación de parámetros físicos de una estructura mediante el uso de datos dependientes del tiempo, donde dentro de su estudio existen abundantes reportes de experimentos realizados en laboratorios en condiciones muy controladas o mediante simulación numérica en los cuales mediante el uso de datos de vibración en estructuras se localiza el daño, mientras que su práctica fuera de los laboratorios ha tenido varias fallas debido a los vastos problemas de implementación con los que se ha tenido que lidiar e impactan directa-

mente con la recolección de datos y la revisión de los parámetros obtenidos, aunque a pesar de lo anterior existen gran variedad de estructuras, que por lo general son puentes, donde se ha tenido éxito en la valoración de su comportamiento estructural (Brownjohn, 2011a).

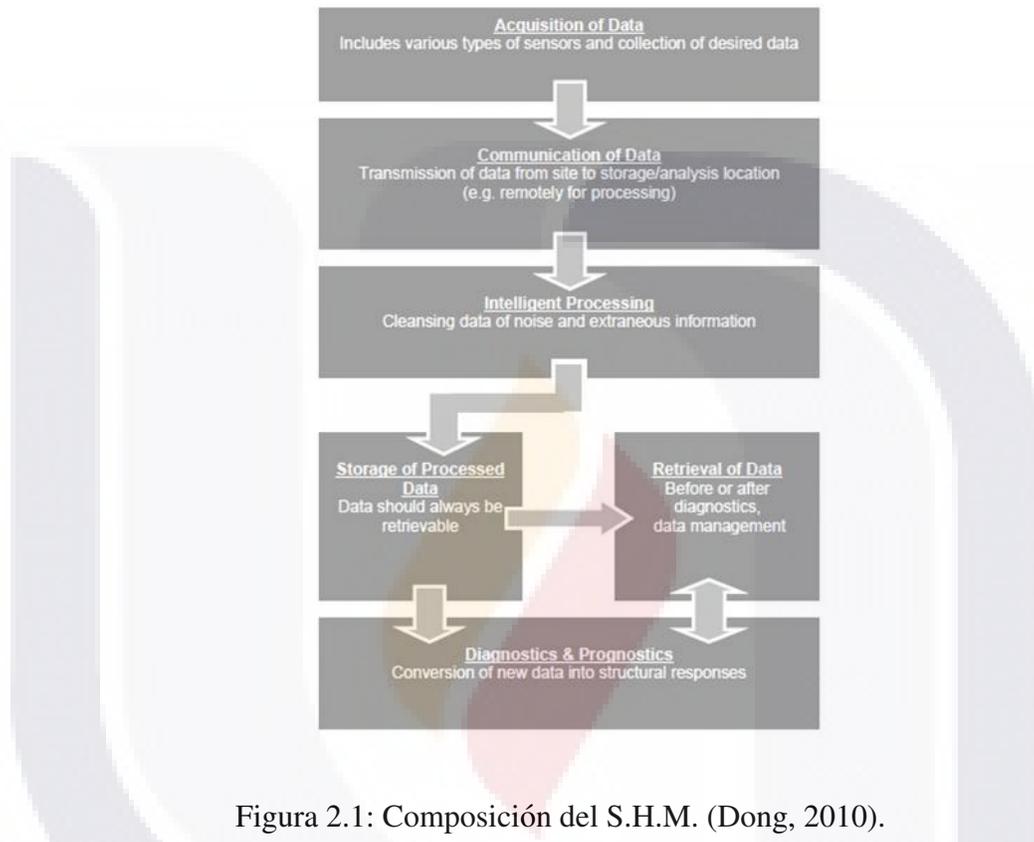


Figura 2.1: Composición del S.H.M. (Dong, 2010).

El S.H.M. puede ser considerado como una técnica de vigilancia global de un sistema físico (edificio histórico de estudio) enfocada a la observación, seguimiento y diagnóstico de daño en un sistema estructural (con el objetivo de prever que la integridad y estabilidad de la estructura no llegue a una etapa crítica). Aunque el S.H.M. ha demostrado ser un método prometedor para monitorear sistemas de ingeniería civil modernos de concreto reforzado o acero, la aplicación de esta nueva tecnología para otros sistemas estructurales, como en estructuras de mampostería no reforzada, todavía es una tarea considerada sin resolver (Ventura, et al., 2011).

El campo del monitoreo estructural es amplio y se desarrolla y aplica con mayor frecuen-

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

cia en aeronáutica, civil y mecánica, principalmente, aunque también hay avances en otras como en la eléctrica y la electrónica (Achenbach, 2008). El S.H.M. ha sido relativamente un nuevo paradigma entre los especialistas interesados que incluyen: operadores, consultores y contratistas, la cual en las dos últimas décadas ha acaparado la vista de investigadores académicos en las áreas de: tecnología de sensores, identificación de sistemas estructurales, interpretación de datos y comportamiento estructural (Brownjohn, 2011a). En función del diagnóstico, podríamos estimar que el S.H.M. es una forma nueva y mejorada para hacer una evaluación no destructiva. Esto es parcialmente cierto, pero S.H.M. es mucho más. Se trata de la integración de sensores, materiales inteligentes, la transmisión de datos, el análisis de datos y la capacidad de procesamiento dentro de las estructuras. Esto hace que sea posible conocer el comportamiento completo de la estructura en sí y como parte de sistemas más amplios (Balageas, 2006).

Una de las formas tempranas de detección de daño basado en vibraciones para estructuras de la ingeniería fue desarrollada en la década de 1970 en el contexto de pruebas no destructivas, analizando cambios de frecuencia naturales (Brownjohn, 2011b). Ésta investigación fue dirigida a analizar un tipo específico de componente estructural aeroespacial. El método fue adaptado y usado con éxito en el análisis de un edificio en condiciones controladas, sin embargo su aplicación se ha intentado (con éxito muy limitado) con otro tipo de estructuras civiles, con varias diferencias sobre la técnica original propuesta (Brownjohn, 2011c). Las actividades de monitoreo basado en vibraciones se han aplicado principalmente en puentes de grandes claros actualmente. La detección de daño basado en vibraciones ha tenido más éxito en la ingeniería aeroespacial donde la detección de daño ha probado ser una herramienta viable, aplicándose en un sistema de inspección modal de un transbordador espacial (Hunt, et al., 1990). La metodología identificó el daño que había eludido a los métodos de prueba no destructivos tradicionales, debido a la inaccesibilidad para la verificación visual de los componentes dañados, y ha sido adoptada como una herramienta de inspección estándar para las estructuras del orbitador espacial Shuttle. La misma técnica ha sido empleada también en la industria para la evaluación de elementos de maquinaria, principalmente en la industria aérea

en donde se usa para la detección de daños incipientes en aviones y helicópteros.

La práctica del monitoreo de la salud estructural se basó en sus inicios principalmente en inspecciones visuales periódicas o sondeos de las condiciones del inmueble, pero durante la última década, el desarrollo de software y hardware, ha hecho posible la monitorización continua (Chang, 2003). Aun así, es factible realizar una inspección visual previa a cualquier otro análisis, a pesar de que ésta no sea una metodología de evaluación del todo confiable, debido a que sólo puede detectar fallas en la superficie de los elementos y no puede identificar la condición interna de cada uno (Vazquez, 2004).

La monitorización de salud estructural se ha trabajado desde finales del siglo XIX, cuando los trabajadores de las vías escuchaban las emisiones acústicas de la misma a fin de detectar fallas o grietas. Estas técnicas de reconocimiento visual o auditivo, son las alternativas más utilizadas cuando se carece de la tecnología para realizar un estudio más adecuado. Gracias al avance computacional de los últimos 30 años, se han desarrollado varias técnicas basadas en principios físicos y análisis más profundos, con respecto de los realizados en épocas anteriores (Quintero, 2010).

Desde finales del siglo XX, se han propuesto métodos de detección de daño analíticos, los cuales se basan en que el daño estructural provoca cambios en los parámetros dinámicos de una estructura cualquiera. Dichos métodos han tomado gran popularidad debido al gran avance tecnológico debido a la invención de sensores y sistemas de adquisición de datos avanzados (figura 7). En algunas evaluaciones estructurales realizadas en obras civiles, se ha comprobado que es posible utilizar el cambio de los parámetros dinámicos para determinar el daño en una estructura (G. J. Cruz, 2012).

La vigilancia de la salud estructural se concebirá entonces, como todo aquel conjunto de tecnologías que se utilizan para evaluar la integridad de las estructuras, para detectar el daño temprano y antes de alcanzar el estado límite, para proporcionar información periódica

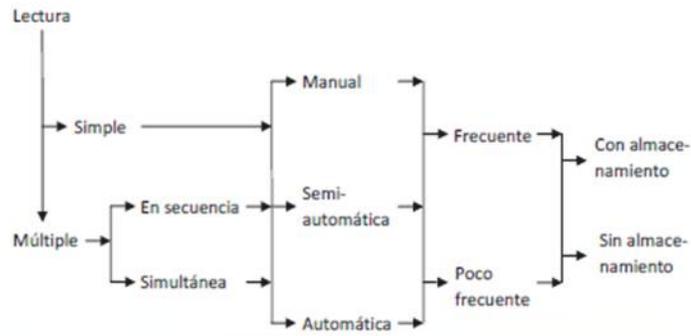


Figura 2.2: Métodos para adquisición de datos.

o continua para realizar un mantenimiento eficiente y tomar decisiones rentables. En general, este concepto se aplica a la industria aeroespacial, mecánica y estructuras de ingeniería civil. Asimismo, es evidente que existen grandes diferencias entre el seguimiento de una estructura histórica y una aeronave o de un puente. Muchos edificios históricos, más allá de su vida útil y su diseño original, todavía se conservan y son utilizadas debido a su valor artístico o importancia cultural (Zonta, 2010). Y el objetivo de la investigación actual es el de identificar por los medios más simples y más confiables; el adquirir, gestionar, integrar e interpretar datos de rendimiento estructural fiables para información útil máxima a un costo mínimo. Se trata de un problema de optimización, cuya solución está evolucionando gradualmente (Brownjohn, 2004).

La evaluación estructural y la detección de daño son de suma importancia para una comprensión adecuada de la integridad estructural y para la proposición del fortalecimiento y las intervenciones de restauración necesarias en un monumento histórico. La identificación dinámica no da una respuesta directa a las necesidades recordadas anteriormente, pero podría mediante (Dusi, 2012):

- El monitoreo del ambiente: este podría ser determinado con un muy bajo nivel de excitación en la estructura; es el nivel habitual que la estructura se somete bajo sus actuales condiciones de carga, por lo tanto, ningún daño se debe esperar para la estructura;

- La comparación de la respuesta de la estructura con el comportamiento de un modelo numérico es deseable, dicho detallado y equivalente permitiría identificar los parámetros mecánicos de deformación de la estructura, en relación con las condiciones reales de estrés, y también para extrapolar los parámetros de resistencia utilizando una correlación;

- La excitación dinámica de la construcción: aquí se induce el movimiento en la estructura global y se movilizan todas las conexiones entre los miembros estructurales, por lo tanto, representa el comportamiento de la estructura en su totalidad. Por un lado, esto puede ser complejo para la identificación de las características estructurales, pero podría dar información para la calibración de un número de parámetros que interactúan que caracterizan la respuesta dinámica.

La identificación se refiere a la extracción de parámetros dinámicos que representan las características dinámicas en una forma más compacta (Atamturktur, 2008b).

El monitoreo dinámico exige dos retos (Panplona, 2008):

- La capacidad de capturar una cantidad muy densa de información durante un intervalo de tiempo muy corto. Pueden ser necesarias miles de lecturas por minuto para caracterizar adecuadamente la oscilación de la estructura causada por una fuente externa de vibración, para posteriormente realizar el procesamiento de señales que conduce a las propiedades dinámicas importantes, tales como las formas de los modos de vibración, frecuencias y de amortiguamiento.

- Es la única forma experimental de proporcionar experimentalmente los parámetros relacionados con el comportamiento estructural global de una construcción. Sin embargo, la comprensión de la propagación de los daños estructurales se limita fuertemente. Los parámetros relacionados con la respuesta dinámica de la estructura se comportan siempre en el rango no lineal (al menos los de interés para la detección de daños) y son muy sensibles a las pro-

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

iedades de los materiales locales o globales y las condiciones de apoyo.

2.1.1. Métodos clásicos no destructivos de S.H.M.

Antes de que se estableciera un marco teórico para estudiar la estimación del daño que una estructura ha sufrido por un siniestro, la capacidad destructiva de los mismos se estimaba observando el daño que causaban. Este proceder empírico, con algunas modificaciones se continúa empleando (Escobar, 2007).

Los métodos clásicos no destructivos consisten en procedimientos visuales o experimentales, tales como (Amezquita, 2012):

a) Inspección visual. Este tipo de métodos incluyen algunas variantes de niveles de especialización que van desde una evaluación óptica a simple vista hasta microscopio de barrido electrónico para obtener información detallada de las micro fracturas. La evaluación óptica aunque es la más simple y barata tiene sus limitaciones en materiales compuestos donde las fallas muchas veces ocurren en capas interiores. Para estructuras a gran escala este tipo de métodos resultan ineficientes y poco efectivos.

b) Emisión ultrasónica. Este método consiste de dos cabezales hidrodinámicos acoplados en tándem que al pasar por la superficie del elemento envían ondas ultrasónicas por medio del chorro de agua en un lado del espécimen, mientras que del otro lado se reciben las ondas acústicas transmitidas. El inconveniente de este método además del tamaño y del costo del equipo es la necesidad de tener acceso a ambos lados de la superficie o incluso el tener que desmontar los elementos de la estructura.

c) Rayos X. Este método basa su principio de funcionalidad en la variación de absorción de rayos X a través de una superficie. Para acentuar los daños en materiales compuestos esta técnica puede ser mejorada si se combina con la técnica de líquidos penetrantes. Sin embargo,

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

es de un alto costo y presenta la necesidad de tener acceso a ambos lados de la superficie con el fin de emitir y coleccionar los rayos X.

d) Corrientes de Eddy. El principio de funcionamiento se basa en los cambios de impedancia electromagnética debido a deformaciones en el material. El método es simple y no requiere gran equipamiento; sin embargo, no es una tecnología madura para materiales compuestos además de que requiere considerable potencia y sus resultados son de los más complicados de interpretar.

Todas estas técnicas experimentales requieren que las proximidades de los daños se conozcan con anticipación y que la parte de la estructura a inspeccionar sea accesible (Sotelo y Acevedo, 2009).

La mayoría de los métodos de evaluación estructural clásicos son basados en la inspección visual y dependen del punto de vista ingenieril del evaluador. Es decir, pueden haber distintas opiniones acerca de la condición estructural de una edificación, en la mayoría de las ocasiones ninguna de ellas está cerca de describir la condición estructural real (Molina, 2012).

Una de las técnicas utilizadas para monitorear la integridad de una estructura es basada en la medición de impedancia electromecánica. Esta técnica monitorea la variación de impedancia mecánica de una estructura, causada por la existencia de uno o más daños, por medio de la medición de la impedancia eléctrica de las pastillas de material piezoeléctrico acopladas en la superficie de la estructura. La impedancia eléctrica de las pastillas piezoeléctricas está directamente relacionada con la impedancia mecánica de la estructura, es por eso que a partir de la variación de las señales de impedancia medidas se puede concluir la presencia o no de un daño. El cuantificar daño se hace por este medio se define al atribuirle un valor escalar característico a los materiales piezoeléctricos, que actúan directamente produciendo una tensión eléctrica cuando sufren una deformación mecánica, e inversamente (Vargas, 2011).

2.1.2. S.H.M. Moderno

El S.H.M. moderno integra sensores, sistemas de comunicación y cómputo de técnicas no destructivas, donde se integra al análisis datos geométricos y mediciones de las vibraciones registradas. Existe un gran interés de la comunidad académica respecto a la respuesta de las estructuras debido a la vibración ambiental para identificar las características modales de la misma, dichos parámetros modales y sus derivaciones reflejan en datos como la masa de la estructura (figura 8), la rigidez y sus propiedades de amortiguamiento, que dependen de igual forma de la condición de la estructura. La información obtenida del monitoreo se utiliza generalmente para planificar el mantenimiento, aumentar la seguridad, verificar funcionamiento, reducir la incertidumbre y ampliar el conocimiento de la estructura que está siendo estudiada (Gajanan, 2011).

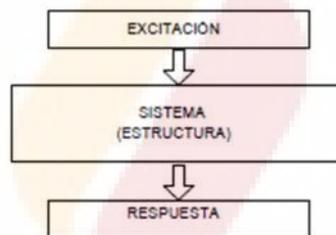


Figura 2.3: Esquematzación de la respuesta ambiental (Torres, 2009).

Históricamente las actividades de monitoreo estructural se han aplicado en puentes de grandes claros (Doebling, et al., 1998; Farrar, et al., 1999; Kie, et al., 2001; Chang, et al., 2003; Ventura, et al., 2010; Prabhu, et al., 2011; Brownjohn, et al., 2011). Uno de los casos más conocidos y bien documentado fue realizado por Dean S. Carder en 1935 en el Golden Gate en San Francisco, en el cual se midieron los períodos de varios de sus componentes durante su construcción, para aprender sobre su comportamiento dinámico y estimar su desempeño esperado ante un posible sismo.

Actualmente las evaluaciones de puentes son complementadas con análisis de elementos finitos. El problema con este método analítico es que es difícil determinar el modelo estructu-

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

ral real para la mayoría de los edificios y puentes. Los modelos generalmente son construidos asumiendo muchas simplificaciones, tal como suponer que la estructura es monolítica. Otro problema es la dificultad de determinar cuáles elementos estructurales y en qué medida se han degradado por el envejecimiento o alteración de los materiales (Chang, 2003).

Un sistema de S.H.M. requiere algunos componentes que pueden ser agrupados en tres categorías: a) los instrumentos para medir las vibraciones, b) la adquisición de datos automatizado, y c) la transmisión de datos para su procesamiento y análisis (Kasal, et al., 2010). Tradicionalmente, los instrumentos usados son acelerómetros que miden aceleraciones en la estructura, cuyos datos son transmitidos a una ubicación lejana vía Internet o por telemetría para su procesamiento y análisis para conocer el comportamiento del puente. Además los mismos datos pueden ser usados para determinar las características dinámicas del suelo en las inmediaciones del puente. Uno de los beneficios de usar mediciones de vibración de la estructura, es que la información para determinar el comportamiento global del puente puede ser obtenida con rapidez mediante la colocación de pocos sensores. Sin embargo, las mediciones de vibración brindan desafíos en cuanto al procesamiento de datos, particularmente para la detección del daño atribuible a las vibraciones de ruido ambiental, así como a las condiciones climático-ambientales las cuales producen cambios pequeños en la respuesta de la estructura (Kasal, et al., 2010).

Algunos trabajos de S.H.M. muestran que la pérdida de un miembro en una estructura, puede resultar en cambios de la frecuencia natural fundamental de hasta un treinta por ciento (Chang, et al., 2003). Esto se explica por el cambio de la rigidez global de la estructura por la pérdida del elemento. Por su parte si un miembro no está sujeto al modo fundamental (elemento no estructural, por ejemplo muro divisorio, elemento ornamental), la pérdida de ese miembro no tiene ningún efecto sobre la rigidez global de la estructura, y si la masa de dicho elemento es despreciable entonces tampoco cambiará la frecuencia fundamental o el modo de vibrar de la estructura. En el mismo orden de ideas si la estructura fuera estáticamente determinada, entonces la pérdida de cualquier miembro resultaría en una estructura inestable.

Aunque la pérdida de elementos estructurales importantes de la estructura resulta en los cambios medibles de la frecuencia natural del edificio, en estructuras hiperestáticas no se puede detectar daños y afectaciones que se compensan mediante una redistribución de esfuerzos hacia otros elementos. Por lo tanto, la metodología no proporciona la información para caracterizar el daño a nivel local en una estructura (Chang, et al., 2003). Además, algunas formas del daño no producen cambios en el comportamiento dinámico ante niveles bajos de la vibración de la estructura, lo que es un inconveniente para la evaluación de la salud estructural del edificio (Brownjohn, et al., 2011). Esto se explica por el cambio de la rigidez global de la estructura por la pérdida del elemento. Por su parte si un miembro no está sujeto al modo fundamental (elemento no estructural), la pérdida de ese miembro no tiene ningún efecto sobre la rigidez global de la estructura, y si la masa de dicho elemento es despreciable entonces tampoco cambiará la frecuencia fundamental o el modo de vibrar de la estructura. En el mismo orden de ideas si la estructura fuera estáticamente determinada, entonces la pérdida de cualquier miembro resultaría en una estructura inestable.

Los métodos de detección de daño en estructuras basados en vibraciones pueden también ser usados para diagnosticar la degradación de las propiedades de los materiales, y la respuesta dinámica de la estructura en función de la interacción con el suelo (Ventura, et al., 2010). Idealmente, la monitorización de la salud de la infraestructura civil consiste en determinar la ubicación y la gravedad del daño, sin embargo los métodos no dan la información suficientemente exacta para determinar la extensión del daño. Actualmente, estos métodos pueden determinar el nivel de daño que está presente en la estructura completa. Tales métodos son conocidos como "monitoreo de la salud global", y son los que se utilizan comúnmente para determinar la seguridad estructural de puentes. La mayoría de los métodos de monitoreo de la salud global están centrados en la observación de los cambios en la frecuencia natural como un indicador del cambio en el desempeño estructural, la premisa de que los cambios en las características dinámicas de una estructura demuestran el daño, es comprometida por el hecho de que las variaciones de temperatura, de la humedad y de otros factores ambientales

también causan cambios en las características dinámicas (Brownjohn, et al., 2011).

Debido a que el S.H.M. depende de las características de vibración globales de la estructura, la ubicación de las mediciones no necesita coincidir con la ubicación de las zonas o elementos dañados. El daño estructural causa una reducción local de la rigidez en las inmediaciones del daño, lo cual a su vez causa una reducción a la rigidez global de la estructura. Para una detección eficiente del daño, los cambios en las propiedades globales deben ser suficientemente altos para que puedan ser evidenciados por los cambios en la forma de vibrar de la estructura ante los niveles de ruido ambiental que generalmente son muy bajos (Prabhu, et al., 2011).

2.1.3. S.H.M. de construcciones históricas

En las iglesias o castillos, los elementos estructurales típicos son torres, arcos o elementos combinados. Aquí los métodos clásicos de pruebas de vibración ambiental son aplicadas por el posicionamiento de los acelerómetros en posiciones adecuadas predeterminados. Debido al bajo nivel de excitación de estos instrumentos sólo deben establecerse en la parte superior de la estructura. Mediante la medición y combinando el número necesario de puntos de las frecuencias propias y modos propios se pueden determinar con precisión. Estos tienen que ser comparados con el modelo de elementos finitos que se establezcan para la estructura. En estructuras del patrimonio cultural a menudo el modelo de elementos finitos es calibrado por medición. Esto significa que una actualización, lo más cerca posible a la realidad del modelo está disponible para ser evaluada. Aquí, en particular, se demuestra el valor del análisis de los modos propios (Wenzel, 2004). Así mismo, el comportamiento estructural de un edificio antiguo de mampostería difiere sustancialmente de una estructura moderna. Esto se debe, principalmente, al tipo de estructuración y a los materiales usados. Por lo que, los estudios analíticos de este tipo de estructuras requieren de procedimientos específicos. Debido a esto, es necesario que el ingeniero conozca los materiales y técnicas constructivas usados en el pasado para que pueda hacer una buena descripción del comportamiento estructural del edificio

histórico (Peña, 2010).

El proceso de supervisar técnicamente implicará la observación de la estructura durante un tiempo prolongado mediante un muestreo periódico de las mediciones de respuesta dinámica, capturada a través de sensores instalados en el sitio en observación, uno de los objetivos deseables en el monitoreo es la creación de un modelo del comportamiento del edificio que se observa, y analizar sus reacciones a esfuerzos externos, posiblemente seguido del proceso de extracción de características propias, además de la inclusión de adaptaciones y ajustes dinámicos en el transcurso del tiempo para ajustarse a los cambios posteriores que se vayan dando en la estructura monitorizada (Anastasi, 2009). El uso de sistemas de control utilizados en condiciones normales e instaladas sobre estructuras, puede permitir (Casarin, 2012): i) validar el funcionamiento de los modelos estructurales adoptados, ii) identificar los procesos dañinos en curso; iii) validar la efectividad de las intervenciones de fortalecimiento.

El implementar de un sistema de monitoreo de salud estructural basado en mediciones de vibración de las construcciones históricas plantea dos grandes desafíos (Ruocci, 2009):

1) El primero se refiere al diseño adecuado del sistema de diagnóstico. Se requiere la integración de las tecnologías experimentales, analíticas y de información, junto con áreas de especialización específicas de diferentes disciplinas. Varios aspectos relacionados con la construcción y el medio ambiente circundante se deben tener en cuenta con el fin de adaptar el sistema de supervisión para los fines de la investigación. Por otra parte, el diseño de un sistema de control fiable no puede prescindir de una caracterización adecuada de la construcción junto con la identificación de sus vulnerabilidades. Estructuras antiguas muestran varias peculiaridades que influyen en forma de problemas de seguimiento importantes, como el despliegue de la red de sensores, la calibración del sistema de adquisición y la evaluación de los datos adquiridos. La conformación arquitectónica, las tecnologías de la construcción y los materiales empleados representan fuentes de debilidad que influyen significativamente en el desarrollo de eventos de daño y degradación producidos por el medio ambiente y la

intervención humana. Una cuidadosa investigación de los posibles fenómenos que afectan a la integridad estructural y la comprensión de sus efectos consiguientes en la estructura son elementos esenciales para identificar el objetivo de vigilancia y establecer la estrategia adecuada para detectar los síntomas de daño.

2) El segundo desafío importante es la identificación de los daños que puedan detectarse, así como anomalías en la estructura. Existen varios métodos de identificación de los daños validados con éxito en las estructuras de ingeniería civil moderna. Sin embargo, la extracción de las características más adecuadas para la detección de daños de la enorme cantidad de datos comúnmente adquiridos por un sistema de seguimiento de diagnóstico es un punto crucial que todavía requiere más investigación.

Algunas recomendaciones realizadas por (Panplona, 2008), para realizar el monitoreo de edificios históricos:

- Antes o al llevar a cabo un programa de seguimiento, se necesita tener una caracterización detallada del edificio. Se necesita realizar una investigación histórica, estudios geométricos y morfológicos para permitir la interpretación correcta de los datos de salida de la monitorización. El monitoreo normalmente realiza en conjunto con ensayos de caracterización basados en pruebas no destructivas o destinados a la determinación de la morfología interna de los miembros estructurales y las propiedades mecánicas de los materiales. Los patrones de daño (en particular, las principales grietas) también deben ser reconocidos y cuidadosamente documentados;

- Las acciones que afectan a la construcción, se deberán supervisar en combinación con su respuesta estructural. Esto normalmente requiere un control de los parámetros ambientales y climáticos (temperatura y humedad), los parámetros del viento (velocidad y dirección), asentamientos de movimiento de tierra y de suelo sísmicos, y los cambios volumétricos debidos a variaciones térmicas , entre otros. El objetivo evidente es relacionar las causas (acciones)

con los efectos (respuesta estructural o material);

- Incluso si las acciones climáticas no son el objetivo, tendrán que caracterizarse, ya que su impacto en la estructura suele ser muy prominente y puede alterar o incluso enmascarar deformaciones causadas por otros posibles efectos. En este caso, la caracterización de las acciones climáticas es necesario con el fin de determinar y cancelar la componente climática en la salida de monitorización. Con el fin de caracterizar, procesos incrementales a largo plazo, el monitoreo debe ser diseñado para permitir una clara distinción entre las componentes reversibles o cíclicas de los parámetros medidos, por una parte, y sus componentes irreversibles;

- La caracterización de las acciones en el dominio del tiempo, permite que la simulación numérica pueda prestarse a la comparación entre la predicción numérica y la respuesta real medido. Un proceso de identificación puede entonces llevarse a cabo modificando adecuadamente tales hipótesis hasta que se obtiene una coincidencia satisfactoria entre las predicciones numéricas y las mediciones;

- El monitoreo debe llevarse a cabo durante un período de tiempo suficiente como para cubrir toda la duración de las acciones cíclicas. Dado que las variaciones anuales de temperatura deben ser consideradas en todos los casos, un período sugerido es un año completo, aunque esto tiene que ser adaptado en cada caso de estudio;

- A fin de proporcionar información significativa, los puntos críticos de la estructura o materiales deben ser seleccionados. Simulación numérica previa puede ayudar a determinar los puntos de configuración y de localización óptima;

- La naturaleza global de la respuesta estructural se debe tener en cuenta al diseñar la estrategia de seguimiento o en la interpretación de sus resultados;

- El sistema de vigilancia debe ser diseñado para permitir la medición de efectos desea-

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

dos, lo cual permitiría interpretar los resultados de manera más consistente. Por ejemplo, el desplazamiento o la rotación de una fachada que experimentan una gradual fuera de plomada se puede medir en combinación con aberturas de fisura relacionados experimentalmente en la unión de la fachada con otras paredes;

- Un uso adecuado y racional del análisis estructural puede ayudar a definir el estado de peligro y pronosticar el comportamiento futuro de la estructura. Con este objetivo, la definición de las propiedades mecánicas de los materiales, es necesaria mediante la aplicación de las leyes constitutivas de los materiales y los métodos de análisis de daño estructural. Sin embargo, cuando la estructura es compleja, sólo los modelos elásticos lineales son fácilmente utilizables. Los modelos no lineales o modelos de diseño de estado límite son difíciles de aplicar, también porque las leyes constitutivas necesarias para el material son raramente disponibles.

Recomendaciones realizadas por (Meli, 2012), para la adquisición de datos, son:

- Reunir la información histórica (o arqueológica) sobre la concepción de la estructura, las técnicas de construcción de las modificaciones realizadas y del desempeño a lo largo del tiempo y de la situación actual;

- Determinación de características estructurales ; propiedades geométricas y mecánicas; preparar planos estructurales, levantamiento de daños y deterioros; determinar si los daños se han estabilizado;

- Estudios de campo pruebas para determinar las propiedades mecánicas de los materiales estructurales y del subsuelo;

- Monitoreo, especialmente de grietas, desplomes y asentamientos.

Hay que recordar que las principales funciones del SHM según (Xu, 2012), que deberán

de ser tomadas en cuenta para el estudio de estructuras históricas son:

- Monitorear y evaluar las condiciones de carga;
- Examinar la eficiencia de la filosofía de diseño actual;
- Verificar los nuevos métodos analíticos y simulaciones;
- Evaluar el desempeño estructural y detectar daños;
- Facilitar la inspección y mantenimiento de las obras;
- Ayudar a las autoridades para tomar decisiones rápidas en casos de emergencia;
- El objetivo final es asegurar la capacidad de servicio, seguridad y sostenibilidad de las construcciones.

En el patrimonio cultural, los métodos clásicos de pruebas de vibración ambiental son aplicados mediante el posicionamiento de los instrumentos de registro en los lugares adecuados (Figura 9). Dicho orden permite que, las frecuencias propias y modos propios de la estructura se puedan determinarse con precisión. Así, un modelo de elementos finitos de la estructura puede entonces ser calibrado sobre la base de mediciones, lo que resulta en una actualización cercana a la realidad, dicho modelo permitiría la evaluación. La comparación entre los resultados experimentales procedentes de la excitación dinámica y la respuesta numérica del modelo F.E.M. permiten definir los parámetros de deformación de las estructuras luego de extrapolar las características mecánicas (Dusi, 2012). Los análisis preliminares numéricos utilizando un modelo de elementos finitos pueden contribuir significativamente para estimar la respuesta estructural y para la planificación de las pruebas estáticas y dinámicas (Ramos, 2007a).

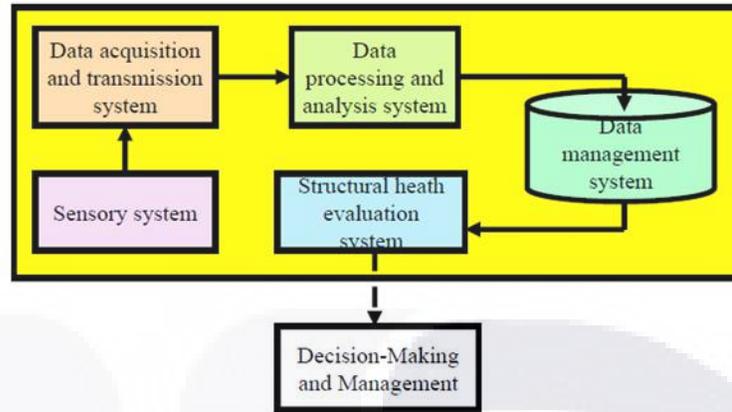


Figura 2.4: Diagrama de funcionamiento del S.H.M. (Xu, 2012).

Se requiere un enfoque multidisciplinario para el estudio de la particularidad de las estructuras patrimoniales, con historia compleja, se requiere de una buena organización de estudios y análisis en varios pasos: Encuesta de las condiciones, la identificación de las causas del daño y el deterioro, la elección de las medidas correctoras y de control de la eficiencia de las intervenciones. La comprensión del comportamiento estructural y las características del material es esencial para cualquier proyecto relacionado con el patrimonio arquitectónico. El diagnóstico se basa en la información histórica y los enfoques cualitativos y cuantitativos. El enfoque cualitativo se basa en la observación directa de los daños estructurales y la degradación material, así como la investigación histórica y arqueológica, mientras que el enfoque cuantitativo exige material y pruebas estructurales, el seguimiento y el análisis estructural (Lourenco, 2011a).

En cuanto a la supervisión de estructuras de mampostería históricas, la tarea se puede dividir en cuatro fases (Ramos, 2007b):

- 1) La primera fase es la recopilación de datos de la estructura, incluyendo la información histórica, el estudio geométrico y topográfico, el estudio de daños, la caracterización de materiales mecánicos mediante pruebas no destructivas, pruebas globales dinámicas y un

análisis de los modelos numéricos para la calibración estática y dinámica. Esta es la primera aproximación al comportamiento estructural en la condición sana asumido en el momento de "cero".

2) En la segunda fase del plan de vigilancia de la salud se puede realizar con un número limitado de sensores (por ejemplo, un par de acelerómetros de referencia, medidores de tensión en las secciones críticas, sensores de temperatura y humedad, etc.). Los datos deben ser almacenados periódicamente y el sistema de monitoreo debe ser capaz de enviar las alarmas correspondientes. Los efectos ambientales deben ser estudiados y la presencia de daño deben ser observados por los parámetros modales globales.

3) En la tercera fase, se debe realizar la activación de alarma, una encuesta dinámica a gran escala con más sensores y puntos de medición. En esta fase, el "estado de salud" de una estructura se estudia con más detalle. Métodos de identificación de daños se deben aplicar a la estructura después de la filtración de los efectos ambientales. El objetivo de los métodos dinámicos es confirmar y localizar la (posible) el daño de una manera global.

4) En la última fase, un enfoque local con pruebas no destructivas y complementarias se debe realizar para evaluar los daños a nivel local y clasificarlo. Esto puede llevarse a cabo con pruebas de ensayo o de radar sónicas, dependiendo de las condiciones de acceso de la estructura. Este enfoque local puede dar una mejor definición de los daños.

ICOMOS recomienda (Figura 10), una metodología consta de cuatro fases a saber: la recogida de datos, control de la salud simplificada, un seguimiento detallado de la salud y de los ensayos no destructivos local (Lourenco, 2011b). Como una ilustración, las dos primeras fases se aplicaron a dos complejos monumentos portuguesas utilizando sensores convencionales. Para estos monumentos, los resultados de la identificación modal, el desarrollo del modelo estructural con técnicas de modelado actualizado, para su posterior evaluación con modelos de elemento finito, se presentaron la instalación de sistemas de seguimiento y la

recuperación automática de parámetros. A partir de la experiencia con los dos casos, la metodología propuesta para la identificación de daños parece ser útil y aplicables a las estructuras de mampostería, especialmente para construcciones históricas complejas. En particular, la supervisión de la frecuencia parece ser una cantidad fiable para la detección de daños.

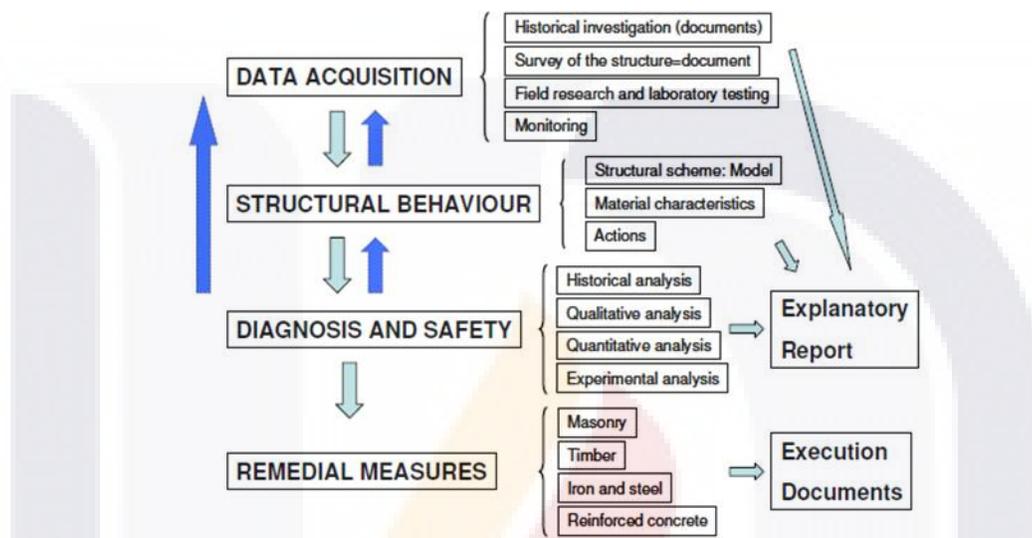


Figura 2.5: Metodología de evaluación propuesta por ICOMOS.

La metodología recomendada por el ICOMOS para la evaluación de las estructuras antiguas requiere la adquisición de datos en primer lugar, que incluye; por ejemplo: la geometría y recopilación histórica del edificio, y en segundo lugar la inspección de la condición actual del edificio por medio de inspección visual y las pruebas experimentales. Posteriormente, realizar el modelado numérico para simular y evaluar el comportamiento sísmico de la estructura y, por fin, se realiza la evaluación de la seguridad y el diseño de las medidas correctivas, de ser necesario (Araujo, 2011).

Otras recomendaciones como las de (Meli, 2012), para el diagnóstico son:

- Análisis histórico: evaluar el desempeño en el pasado puede permitir prever el desempeño futuro y dar indicaciones sobre el nivel de la seguridad de la estructura en su situación

actual.

- Realizar un análisis cualitativo (procedimiento inductivo), basado en comparar la situación actual de la estructura con la de otras similares cuyo comportamiento ha podido ser evaluado y confirmado.

- En análisis cuantitativo los modelos matemáticos deberán de ser resueltos con los principios y herramientas de la ingeniería estructural.

Otros autores sugieren metodologías diferentes para la evaluación de estructuras históricas, (Figura 11).

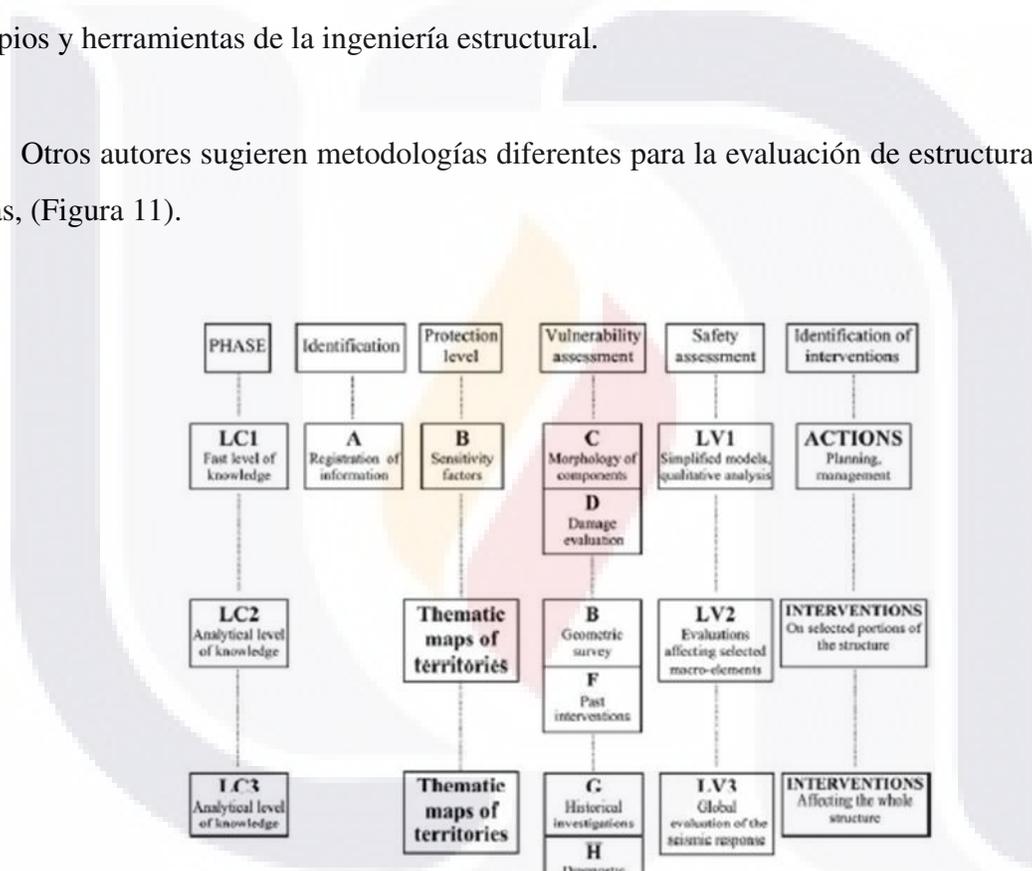


Figura 2.6: Metodología de evaluación propuesta por (Rainieri, 2011).

El análisis de las condiciones pasadas permitía conocer la historia de la edificación a lo largo del tiempo, esto se refiere a identificar los valores intrínsecos del inmueble, así como ayuda a entender la condición actual del mismo. Las condiciones presentes permiten, precisamente, saber el grado de afectación del inmueble. Aquí se planea la posible intervención a

realizar. Por último, es necesario que se reconozca la importancia de tener un análisis o previsión de las condiciones futuras del inmueble. Esto se debe a que uno de los objetivos de la conservación es la de prever las posibles acciones a futuro, para permitir que el inmueble se mantenga vivo, conserve su identidad original y se evite la pérdida de sus valores intrínsecos. Es decir, que el Patrimonio Arquitectónico se conserve con la dignidad que merece (Peña, 2012).

Los parámetros modales identificados experimentalmente durante el monitoreo pueden ser representativos del comportamiento estructural en condiciones de funcionamiento, y que pueden ser utilizados para validar o actualizar los modelos de elemento finito. Por otra parte, los cambios en los parámetros modales pueden ser relacionados con el daño estructural. La combinación de los modelos numéricos y los datos experimentales puede ofrecer oportunidades interesantes en el campo de la protección sísmica de estructuras estratégicas o históricas. De hecho, los modelos analíticos actualizados se pueden utilizar para evaluar de manera efectiva el riesgo sísmico de estas estructuras (Conte, 2011). Para extraer las propiedades modales, la señal grabada se transforma en una digital utilizando la Transformada Rápida de Fourier (F.F.T.) y otros algoritmos similares. La identificación dinámica puede ser abordada basándose en el análisis de los modos de vibración y comparando las formas deformadas expresadas por desplazamientos o rotaciones en los diferentes modos de vibración. Las mediciones dinámicas experimentales unidas con la identificación dinámica de las estructuras tienen un carácter importante en el nivel de garantía de las construcciones. Las vibraciones de las estructuras dan información sobre los períodos de vibración y formas, las interacciones no controladas con los edificios cercanos y el comportamiento dinámico real de la estructura. La comparación y correlación entre los parámetros modales experimentales y los predichos por un modelo de elementos finitos, nos permiten identificar las posibles causas de las discrepancias entre las propiedades predichas y medidas. En particular, la información obtenida podría estar relacionada con las condiciones de salud reales de una estructura, frecuencias naturales más bajas con respecto a las predichas por el modelo de elementos finitos pueden indicar la carencia rigidez; formas de modos anómalos pueden señalar un movimiento inde-

pendiente de las partes estructurales debido a grandes grietas. Una actividad de seguimiento debe basarse en la repetición periódica de las mediciones, con el fin de señalar la eventual reducción de la integridad estructural (Pau, 2005).

Además, las pruebas modales de vibración ambiental y el análisis parecen ser herramientas ideales complementarias metodológicamente para investigaciones llevadas a cabo en la actualidad, para evaluar la seguridad estructural de los edificios históricos, por varias razones (Gentile, 2009):

- a)** Es una forma no destructiva fácil, realizada mediante la medición de sólo la respuesta estructural bajo excitación ambiente.
- b)** La sostenibilidad de las pruebas, esto quiere decir que no se interfiere con el uso normal de la estructura y no se provocan sobrecargas adicionales.
- c)** La naturaleza de múltiples entradas y el contenido de frecuencia de banda ancha de excitación ambiental asegura que la respuesta incluye la contribución de un número significativo de los modos normales.
- d)** El gran número de altamente sensible de sensores piezoeléctricos o de fuerza equilibrada, acelerómetros, que pueden ser utilizados y disponibles en el mercado.
- e)** El gran número de las técnicas de identificación modal disponibles en la literatura, que van desde la técnica de Peak Picking sencillo a la frecuencia más avanzada de descomposición de dominios y los modelos estocásticos de identificación subespaciales.

La evaluación estructural y la detección de daño serán entonces de suma importancia para una comprensión adecuada de la integridad estructural y para la proposición del fortalecimiento y las intervenciones de restauración necesarias en un monumento histórico. La

identificación dinámica no da una respuesta directa a las necesidades recordadas anteriormente, pero podría mediante (Dusi, 2012):

- El monitoreo del ambiente: este podría ser determinado con un muy bajo nivel de excitación en la estructura; es el nivel habitual que la estructura se somete bajo sus actuales condiciones de carga, por lo tanto, ningún daño se debe esperar para la estructura;

- La comparación de la respuesta de la estructura con el comportamiento de un modelo numérico es deseable, dicho modelo equivalente permitiría identificar los parámetros mecánicos de la deformación de la estructura, y realizar una relación con las condiciones de esfuerzos reales que provocan dichas deformaciones, al igual para extrapolar los parámetros de resistencia residual (o faltante de los elementos antes de llegar a su límite), mediante el empleo de alguna correlación que describa dicho comportamiento del material;

- La excitación dinámica de la construcción: aquí se induce el movimiento en la estructura global y se movilizan todas las conexiones entre los miembros estructurales, por lo tanto, representa el comportamiento de la estructura en su totalidad. Por un lado, esto puede ser complejo para la identificación de las características estructurales, pero podría dar información para la calibración de un número de parámetros que interactúan que caracterizan la respuesta dinámica.

El análisis modal experimental es una herramienta de análisis de vibraciones fiable, que proporciona información sobre las características de la estructura y la excitación. Cuando se establece un modelo modal es esencial validar el modelo. La validación de un modelo generalmente se logra mediante varios instrumentos de identificación de modo que la ayuda localizando el número de modos en una banda de frecuencias. Entre las técnicas más comunes de estas técnicas, están los criterios de confiabilidad modal (M.A.C., con sus siglas en inglés), el cual es un método comúnmente utilizado para evaluar el grado de correlación entre dos vectores formulados (Samali, 2007). Este método define la correlación entre dos

conjuntos de vectores forma del modo, que van de 0 a 1. Un valor M.A.C. de 1 implica una correlación perfecta de los dos da forma a modo de vectores, mientras que un valor cercano a 0 indica vectores (ortogonales) no correlacionadas. Para las estructuras de mampostería históricos, un valor M.A.C. mayor que 0,80 se puede considerar una buena correspondencia, mientras que un valor inferior a 0,40 MAC se considera una mala correspondencia (Gentile, 2004).

El análisis modal experimental tradicional, adolece de varias limitaciones que tendremos que considerar de igual manera, como se describe (Rainieri, 2011), a continuación:

- Se requiere de excitación artificial para evaluar las funciones de respuesta de frecuencia (F.R.F.) o las funciones de impulso-respuesta (I.R.F.). En algunos casos, tales como estructuras civiles, proporcionar la excitación adecuada es difícil, más no imposible.

- Las condiciones de operación a menudo son diferentes de las adoptadas en las pruebas porque el análisis modal tradicional se lleva a cabo en un ambiente de laboratorio.

- Las pruebas generalmente se realizan en un entorno de laboratorio.

En comparación con el análisis modal experimental tradicional, el análisis modal operacional (monitoreo), es atractivo según (Rainieri, 2011), debido a una serie de ventajas:

- Es más rápido y más barato que el análisis modal experimental tradicional.

- Ningún equipo de excitación o de condición de contorno simulaciones es necesitado.

- No se interfiere con el uso normal de la estructura.

- Permite la identificación de los parámetros modales que son representativos de todo el sistema en condiciones reales de servicio.

- El análisis modal operacional se puede utilizar para la vigilancia de la salud estructural basado en vibraciones y para detectar daños en las estructuras.

El éxito del monitoreo estructural dependerá en gran medida de la correcta interpretación de la información que se obtiene a través de los sensores. Es por ello que la selección del tipo de sensores, la ubicación de éstos, la configuración del sistema de adquisición de datos (frecuencia de monitoreo) y el post- procesamiento de datos, son fundamentales para obtener información suficiente, pero no excesiva, para poder identificar cambios que pudieran estar asociados con condiciones de daño o falla. Dada la gran cantidad de datos que se pueden obtener, es importante tener estrategias de análisis y reducción de datos para calcular indicadores de desempeño que sirvan, a largo plazo, para identificar variaciones críticas. Lo anterior no obsta la importancia de la información medida directamente, ya que es la que se emplea para calibrar modelos de simulación y en algunos algoritmos para identificación de daño. En todo caso, la configuración del sistema de sensores es fundamental y de éste depende la sensibilidad del sistema para identificar los potenciales problemas que pudieran llegar a presentarse en un determinado puente (T. J. Perez, 2007).

2.1.4. Estudios de monitoreo de estructuras de manpostería

Estudios de laboratorio realizados por (Ramos, 2007a), donde pruebas estáticas y dinámicas en arcos con escenarios de daños progresivos y controlados, sometidos a ciclos estáticos de carga y descarga, indicaron que la pruebas de identificación dinámicas de respuesta ante efectos de vibración del medio ambiente, después de cada prueba estática, que los parámetros modales podían ser identificados. Los análisis realizados indicaron que las primeras seis formas de los modos de la estructura fueron en el estudio bien estimados, dichos modos pueden ser utilizados en el análisis de identificación de daños basándose en la respuesta dinámica.

Estudios de laboratorio realizados, donde pruebas estáticas y dinámicas en muros con es-

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

cenarios de daños progresivos y controlados, sometidos a ciclos estáticos de carga y descarga, indicaban que el análisis de identificación de daños de los parámetros globales muestra que las propiedades modales de la pared eran sensibles al daño inducido (Ramos, 2007a). Mostraron que los valores de frecuencia disminuyen significativamente con el daño progresivo. Los cambios son más altos que los reportados para otras estructuras en la literatura. En cuanto al coeficiente de amortiguamiento, hay una tendencia a su aumento con daño progresivo, pero debido a las dificultades en la estimación de parámetros los resultados no permitieron una conclusión definitiva.

Con base en las pruebas realizadas en un puente de mampostería fabricado a escala, con un diseño adecuado de la distribución de sensores basado en modelos numéricos, en busca de la determinación del grado de la falta de homogeneidad y la localización de afectaciones mediante la técnica de emisión acústica (Xu, 2013). Mostraron como resultados de la prueba que para una disposición de sensores razonable es necesario indagar en el comportamiento probable para la correcta elección de las localizaciones y de gran importancia para maximizar la capacidad de sensibilidad del equipo. La precisión más alta se puede lograr para las fuentes de daño localizado entre las distribuciones de los sensores. Las distancias de las fuentes lejos de la red de sensores son menos precisas. Los tiempos de inicio de señales a diferentes sensores están vinculados a la velocidad de propagación en el interior del material, el algoritmo se puede utilizar para localizar las fuentes de emisión y para predecir su posterior desarrollo.

Recientemente, la investigación sobre las pruebas de vibración de sistemas de mampostería históricos ha comenzado a aumentar. Los primeros sistemas de mampostería estudiados fueron puentes de arco de mampostería. El éxito de los programas de investigación en la identificación de los parámetros modales de monumentos históricos se plantea la cuestión de si los temas emergentes de la vigilancia de la salud estructural y detección de daños son aplicables a los monumentos. Para responder esta pregunta, es necesario identificar claramente la sensibilidad de los parámetros modales a los tipos de daño típicos observados en los sistemas de mampostería. Tal investigación sólo es posible si los estados no dañados y dañados de

la misma estructura pueden ser probados por separado. Sin embargo, no es preferible dañar estructuras históricas exclusivamente para fines de investigación (Atamturktur, 2008a).

2.1.5. Estudios de monitoreo en estructuras históricas de mampostería

Estudios recientes (solo algunos de los últimos 15 años) en estructuras históricas como en: el puente Côa (40's) en Portugal (Blinda, 2000), la vieja escuela S. Sisto, en L'Aquila, Italia (Sortis, 2004), la Basílica de S. Gaudencio en Novara (siglo XVII), los campanarios de la Catedral de S. Lorenzo, Alba (siglo XIII), la iglesia renacentista SS. Annunziata, en Rocca-verano (siglo XVI), la Torre di Matilde (siglo XII), en S.Miniato, cerca de Pisa (De Stefano, 2006), la catedral de Reggio Emilia (siglo IX) (Casarin, 2007), la Torre del Reloj de Mogadouro y la Iglesia del Monasterio de los Jerónimos, en Lisboa (Siglo XVII), (Ramos, 2007), el puente de la Victoria, construido en 1923, en Lecco, Italia (Gentile, 2007), el Beverley Minster (Siglo XIII) (Atamturktur, 2008), la iglesia de Santa Teresa (Siglo XVII) (Anastasi, 2009), la Colegiata de San Vittore (Siglo XVIII) (Gentile, 2009), en una chimenea de la albañilería (Siglo XIX), en L'Aquila, Italia (Eusani, 2009), el Coliseo (79-81 DC) (Monti, 2010), la Torre Aquila (Siglo XIII) (Zonta, 2010), la Basílica de San Bernardino (Siglo XV) (Peeters, 2011), la torre del Palazzo Margherita en la Piazza Palazzo, anteriormente Piazza Sallustio (Siglo XVI) (Peeters, 2011), la antigua torre de campanario de mampostería situado en los alrededores de la zona Mostra D' Oltremare en Nápoles (Rainieri, 2011), la torre del edificio de la Administración Provincial (Siglo XX) (Diaferio, 2011), la Catedral de San Juan el Divino (siglo XX) (Prabhu, 2011c), el anfiteatro romano o "Arena"(siglo XIV) (Casarin, 2012), la catedral de Mallorca (siglo XIV) (Caselles, 2012), el Templo San Francisco de Asís (siglo XX), ubicado en Bucaramanga- Santander, Colombia (Franco, 2012), la Torre Gabbia (Siglo XII) (Saisi, 2013), la Basílica de Santa María di Collemaggio (Siglo XIII) (Gattulli, 2013), el "Hotel Comercio"(siglo XIX) (Aguilar, 2013) y la Columna de Trajano, puente construido a finales del Siglo XIX (Pau, 2014), han demostrado que es posible encontrar la frecuencia natural de las edificaciones históricas, sin embargo la detección local de daño no ha sido posible debido a que la metodología es una técnica de obtención de características

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

globales. Ahora bien, una de las partes fundamentales para mejorar la aplicación del método será el buen diseño de la prueba experimental. Las pruebas experimentales consisten en la medición de la respuesta de la estructura por efecto de una fuerza de excitación conocida en condiciones de prueba controladas.

El puente C \hat{o} a, construido en los años 40, en Portugal, fue modelado mediante un modelo de elementos finitos tridimensional. El modelo de puente se modeló utilizando elementos homogéneos y materiales elásticos. Las condiciones de contorno iniciales a nivel de base se establecieron utilizando soportes rígidos. La prueba de vibración ambiental en el puente se enfocó en identificar las propiedades modales del puente, incluyendo las frecuencias naturales, modos de vibración y relaciones de amortiguamiento (Blinda, 2000). Esta prueba se realizó sobre la base de una técnica teniendo en cuenta los puntos de referencia fijos y móviles a los puntos y la participación de 12 acelerómetros piezoeléctricos. La respuesta ambiental se evaluó en términos de las aceleraciones en la vertical (z), transversal (y), y dirección longitudinal (x), totalizando 25 puntos de medición situados en la cubierta. La aplicación del método de descomposición de dominio de la frecuencia mejorado para la identificación de los parámetros modales del puente condujo a resultados que muestran una buena concordancia con los resultados obtenidos a través del modelo numérico de elementos finitos. La comparación entre las frecuencias numéricas y experimentales y las formas modales permitieron ajustar los parámetros del modelo (propiedades mecánicas y condiciones de frontera) con el fin de obtener una buena concordancia entre las características dinámicas.

Estudios realizados por (Sortis, 2004), en la vieja escuela S. Sisto, en L'Aquila, Italia, donde dicho edificio de mampostería fue sometido a pruebas de vibración forzada de bajo nivel. La interpretación del comportamiento dinámico fue simple debido a que las características de modo dependían de la ubicación del dispositivo de accionamiento y en el tipo de carga aplicada. El análisis de los datos de salida fue útil para la selección de mediciones más fiables para la evaluación de los parámetros dinámicos de los primeros modos. Las cantidades modales identificadas se utilizan como datos experimentales para estimar los parámetros

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

físicos de un modelo de elemento finito de la estructura. Antes de la identificación, se había aplicado un procedimiento para la selección óptima de los parámetros del modelo y sensores de ubicación. El modelo muestra valores para la rigidez de la pared que son diferentes de los valores iniciales, de modo que las frecuencias y formas de los modos fueron muy similares a las de la estructura real, excepto para la deformación de las plantas, que no se ha reproducido correctamente.

Campañas de preservación y monitorización que simultáneamente se realizaron en algunas construcciones históricas, como la cúpula de la Basílica de S. Gaudencio en Novara (siglo XVII), los campanarios de la Catedral de S. Lorenzo, Alba (siglo XIII), la iglesia renacentista SS. Annunziata, en Roccaverano (siglo XVI), la Torre di Matilde (siglo XII), en S. Miniato, cerca de Pisa (De Stefano, 2006). Las reparaciones consistieron en inyecciones de mortero y cables pretensados. Los resultados arrojaban que hay cambios en las frecuencias fundamentales, hay un aumento del 20-30 por ciento en las frecuencias de flexión (módulo de Young) y un ligero descenso en la torsión (módulo de cizallamiento). Por lo tanto, se concluyó: existe un ligero aumento en G , probablemente un efecto ficticio del aumento de masa, es deducible que el comportamiento de cizalla de la torre no ha cambiado significativamente, y al realizar las intervenciones existe un aumento considerable en el módulo de Young y la resistencia a la flexión, lo cual demuestra la eficacia de las intervenciones.

Estudios realizados por (Casarin, 2007), en la catedral de Reggio Emilia (siglo IX) reportan que las frecuencias naturales, modos y masas participantes correspondientes de la estructura en el modelo de elementos finitos, que después del 10mo modo, el factor de participación de las masas se hace menor que 2 por ciento, que denota modos locales.

La Torre del Reloj de Mogadouro y la Iglesia del Monasterio de los Jerónimos (Siglo XVII), en Lisboa. Han sido estudiados basándose en una metodología para el seguimiento y la identificación de daños mediante el uso de registros de vibración (Ramos, 2007a). Con la comparación entre la respuesta modal de la torre, antes y después de la rehabilitación, fue po-

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

sible concluir que la estructura de la torre sufrió fortalecimiento estructural significativo y que el daño antes de la rehabilitación cambió significativamente el comportamiento dinámico de la torre. Mientras tanto en el caso del monasterio, se obtuvo que la identificación modal de la nave central y las columnas indicaron que la estructura presenta un comportamiento bastante complejo. La respuesta modal se caracterizaba por modos locales en las columnas esbeltas. Se encontraron dificultades durante los ensayos modales experimentales para estimar con precisión los parámetros modales, debido a la baja relación señal -ruido en la estructura.

Un estudios experimentales (Gentile, 2007), realizados en el puente de la Victoria, construido en 1923, en Lecco, Italia, incluyó una amplia medición de las vibraciones ambientales inducidas por el tráfico, y varios modos se identificaron mediante el uso de dos técnicas complementarias: La frecuencia de descomposición de dominios (dominio de la frecuencia) y el subespacio de identificación estocástica (dominio de tiempo). En el estudio teórico, los modos de vibración se determinaron utilizando un modelo de elementos finitos 3D del puente y la información obtenida de las pruebas de campo, fue combinada con una técnica de identificación del sistema, con un modelo elástico lineal, encajando con precisión los parámetros modales del puente en su condición actual. El enfoque demostró ser adecuado para puentes de arco. Las pruebas de vibración ambiental permitieron la identificación de 11 modos de vibración en el rango de frecuencia de 0-20 Hz, de los cuales se obtuvo también las estimaciones de los coeficientes de amortiguamiento modal asociados.

El Beverley Minster (Siglo XIII), estructura gótica inglesa, se sometió a un programa experimental (Atamturktur, 2008a), con el objeto de investigar si los parámetros modales de sus bóvedas de fábrica eran perceptibles en un sistema de monitoreo y si era probable observar los niveles de daño. Para esto, las desviaciones entre los parámetros modales de las bóvedas de mampostería inicialmente idénticas se cuantificaron por ensayos modales. La fuente de excitación fue la primera decisión crítica, en estudios anteriores, las técnicas de excitación tanto ambientales y forzadas se fueron realizadas con éxito. Una vez que se identificaron los parámetros modales para los estados normal y dañado partir de las mediciones, las diferencias

entre las frecuencias naturales y formas de los modos se cuantificaron. La correlación entre los dos conjuntos de formas de los modos se realizó utilizando el criterio de confiabilidad modal (M.A.C.). Recordemos que un valor M.A.C. de 1.0 representa una correlación perfecta entre dos modos idénticos, mientras que 0.0 indica dos modos ortogonales. Debido a las complejidades introducidas debidas a la experimentación, los valores M.A.C. de 80 por ciento o mayor se consideraron satisfactorios para fines de correlación.

La iglesia de Santa Teresa (Siglo XVII), en el distrito Kalsa en Palermo, Italia, fue estudiada mediante un proyecto en el cual era considerado el uso de redes de sensores inalámbricos (Anastasi, 2009). En particular, el objetivo era monitorear un área específica del edificio, donde se estaban llevando a cabo las obras de consolidación con el fin de garantizar la seguridad de toda la estructura. El sistema que se emplea es un proyecto que busca observar el control después de los trabajos de restauración que se han llevado a cabo para restaurar después de un terremoto de menor importancia, en la actualidad, se sigue realizando el experimento en el fin de probar el comportamiento básico de la iglesia, y para recoger una cantidad suficiente de datos para ser utilizados para extraer modelos más refinados de su respuesta dinámica.

La Colegiata de San Vittore (Siglo XVIII), en Muralto, Suiza, fue analizada (Gentile, 2009), encontrando que el comportamiento dinámico de la torre parece ser afectada de manera significativa por la amplitud de la excitación de un elemento propio de ella. Curiosamente, las frecuencias naturales identificadas en la excitación proporcionada por el balanceo de las campanas son ligeramente inferiores a las identificadas cuando la excitación sólo fue proporcionada por el viento y micro-temblores. La comparación entre los parámetros modales medidos y predichos se utilizó para verificar los supuestos adoptados en la formulación de un modelo de elementos finitos de la estructura. Aunque esta parte del estudio no puede considerarse concluida debido a la excesiva falta de información sobre las características mecánicas de los materiales, la correlación entre los parámetros modales teóricos y experimentales proporciona una verificación bastante precisa y robusta de los principales supuestos del modelo. Por lo tanto, el modelo es un buen candidato para su uso en investigación sucesiva incluyendo

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

nuevas pruebas no destructivas sobre los materiales, análisis de sensibilidad más refinada y la aplicación de las técnicas de identificación estructurales para evaluar mejor el estado estructural de la torre.

Resultados de prueba de modales realizada por (Eusani, 2009), en una chimenea de la albañilería (Siglo XIX), en L'Aquila, Italia, antes y después de obras de rehabilitación, actualizadas junto con resultados numéricos de un modelo de elemento finito, con el propósito de analizar la influencia de las modificaciones estructurales en el comportamiento dinámico global, arrojaron que se conservaba casi constante rigidez estructural original después de las modificaciones estructurales. Los valores numéricos de las frecuencias después de las modificaciones estructurales indicaban que el trabajo de rehabilitación necesario se podría ejecutar con seguridad: de hecho, después de las modificaciones, el espectro de frecuencia de la chimenea permaneció casi estable, lo que indicaba que la rigidez global del sistema se mantuvo casi constante.

El Coliseo (79-81 D.C.), por desgracia, sólo en los tiempos modernos, ha sido considerado como un monumento excepcional y por lo tanto en los últimos siglos de su integridad no se ha conservado adecuadamente. Dicho monumento es y ha sido monitoreado mediante una red dinámica de seguimiento (Monti, 2010), dicha red capaz de adquirir la respuesta estructural ante bajos niveles de excitaciones, siendo el viento y las vibraciones provocadas por el tráfico de las cargas dinámicas que prevalecen. A la par modelos matemáticos han sido calibrados con dichas mediciones obteniendo como resultados que, las frecuencias naturales estimadas están en acuerdo satisfactorio con los obtenidos anteriormente por otros investigadores a partir de las mediciones dinámicas, siendo el error medio igual al 7 por ciento.

La Torre Aquila (Siglo XIII), una parte del castillo Buonconsiglio ubicada en la ciudad de Trento. Ha sido estudiada mediante modelos de elementos finitos en tres dimensiones con datos adquiridos in situ y mediante su monitoreo de respuesta ante la vibración ambiental (Zonta, 2010). Los estudios, en particular, han obtenido como resultado que en la torre

está presente la probabilidad de tendencia a la deformación. Por su parte, el monitoreo, en general ha sido registrado hasta la fecha con acelerómetros y con sensores de deformación, sin manifestar ninguna alteración geométrica. Dicho período de monitoreo demostró la estabilidad y fiabilidad de la torre, pero en caso de ocurrencia de una condición anormal, podría estar en riesgo el acervo cultural propio de la construcción (frescos).

La Basílica de San Bernardino (Siglo XV), fue intervenida mediante una campaña de reparaciones de emergencia debido a la magnitud de afectación que tuvo, una primera campaña de medición para el análisis modal operacional se realizó con el fin de evaluar las frecuencias características y detectar las posibles discontinuidades en las paredes (Peeters, 2011). Los trabajos de restauración se realizaron utilizando materiales modernos como plásticos reforzados. Al final de estas intervenciones, se llevaron a cabo nuevas mediciones dinámicas para comparar los parámetros modales de la cúpula antes y después de la restauración. Esto permitió dar una evaluación objetiva de la efectividad de la intervención. Debido a que la excitación ambiental no fue la misma durante las diferentes mediciones, los espectros no fueron idénticos. Sin embargo, la dinámica de la cúpula se identificó correctamente.

La torre del Palazzo Margherita en la Piazza Palazzo, anteriormente Piazza Sallustio (Siglo XVI), fue sometida a estudios con el objetivo de determinar experimentalmente las propiedades dinámicas de la estructura en términos de frecuencias naturales, relaciones de amortiguamiento y las formas modales (Peeters, 2011). Siendo una torre con características geométricas armoniosas (simétrica), fue de esperar que los primeros modos fueran frecuencias muy parecidas, dicha hipótesis se confirmó experimentalmente, donde dichos modos se obtuvieron con tan sólo 0.02 Hz de diferencia.

Pruebas en una antigua torre de campanario de mampostería situado en los alrededores de la zona Mostra D' Oltremare en Nápoles, fueron realizadas para investigar las propiedades mecánicas de los materiales para ser utilizados en un modelo numérico de la estructura (Rainieri, 2011). A la par, se llevaron a cabo algunas pruebas dinámicas para perfeccionar el

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

modelo. La atención se centró en los dos primeros modos de vibración debido a su importancia en los análisis estáticos lineales o no lineales, dichos modos obtenidos con las mediciones de salida únicamente y el modelo numérico corroboraron la efectividad del uso conjunto de ambas técnicas de estudio, la simulación y la medición experimental.

La torre del edificio de la Administración Provincial (Siglo XX) en Bari, Italia (ejemplo típico de la arquitectura fascista), fue investigada basándose en el monitoreo de la vibración ambiental, para evaluar su comportamiento dinámico (Diaferio, 2011). Once distintas adquisiciones de datos consecutivos para la estimación precisa de sus características dinámicas fueron tomadas, además para la evaluación de la repetibilidad estadística de los resultados. Las siguientes conclusiones pudieron extraerse de este estudio: i) el modo fundamental de la torre, con una frecuencia natural de aproximadamente 2.3 Hz, implica flexión dominante; ii) el segundo par de modos de flexión son alrededor de 4 Hz y entre estas dos parejas de modos hay un modo de torsión a un valor inferior a 4 Hz, y de inmediato más alto que el segundo par de modos de flexión; iii) la observación de las mediciones experimentales el modo de torsión fueron realmente claras, probablemente debido a la colocación de los acelerómetros que, por las mismas plantas instrumentados, no ha sido usados suficientes sensores para describir las vibraciones de torsión.

Trabajos de obtención de información durante el análisis modal in situ de la Catedral de San Juan el Divino (siglo XX) de mampostería de estilo gótico (Prabhu, 2011), en Estados Unidos, donde se ha establecido un método en el que se colocaron sensores con una distancia suficiente uno del otro para explorar mejor la estructura, con el fin de reducir los efectos de modelado de error en la colocación del sensor, y aplicando la teoría donde el error que actúa como una restricción sobre la eliminación de sensores críticos que son importantes para la identificación de los modos reales, ha logrado demostrar que es posible optimizar y reducir los recursos necesarios para el ensayo modal a gran escala de las catedrales góticas, como la, el objeto de este estudio.

El anfiteatro romano o "Arena" (siglo XIV), en Verona, ha obtenido interés de estudio en los últimos años donde se ha manifestado un gran interés sobre la monitorización de la respuesta estructural de la Arena a diferentes acciones exteriores. Las vibraciones causadas por conciertos eran y siguen siendo, de hecho, objeto de discusión, especialmente por lo que concierne a la seguridad estructural del monumento, de igual forma los problemas de conservación. Varias campañas de investigación se han realizado en las últimas décadas, tanto para definir el estado de esfuerzos de los materiales que componen y para medir el nivel de vibración de las estructuras de mampostería. El sistema S.H.M. instalado en la Arena de Verona, ha sido diseñado para definir cuantitativamente el P.G.A. (Peak Ground Acceleration, medido en G), real en la base de la estructura durante eventos sísmicos moderados que han ocurrido después de la su instalación (Casarin, 2012), esto ha abierto la posibilidad de evaluar las aceleraciones máximas alcanzadas en la parte superior de la monumento, que al 24 de enero es el evento más significativo (aproximadamente 0.2038 g), y hecho ha sido posible la evaluación de los efectos permanentes sobre la estructura, tanto desde el estático como dinámicos.

En la catedral de Mallorca (siglo XIV), se utilizaron acelerómetros triaxiales para llevar a cabo ensayos dinámicos de vibraciones ambientales. Se usó un modelo de elementos finitos utilizado anteriormente para el estudio (Caselles, 2012). Las mismas propiedades de los materiales también se utilizaron como valores iniciales en el proceso de actualización. En el proceso de actualización del modelo, se encontraron las frecuencias experimentales, numéricas y las formas modales. Las formas de los modos se compararon mediante el criterio de confiabilidad modal. Muchos efectos afectaron los valores obtenidos en el M.A.C., entre las cuales está la interacción suelo-estructura, que no se considera en el análisis modal en la mayoría de los estudios en la literatura, así como las grietas existentes. Además de incluir la influencia del suelo, se mejoró el modelo mediante la simulación de las principales grietas existentes como discontinuidades en la malla del modelo de elemento finito. Los resultados generales indicaron que los patrones de agrietamiento con mayor gravedad se localizaban en bóvedas siendo consistentes con la documentación histórica de varios colapsos de elementos estructurales.

El Templo San Francisco de Asís (siglo XX), ubicado en Bucaramanga-Santander, Colombia, fue estudiado identificando la totalidad de materiales que constituyen la edificación y se valoraron sus propiedades mecánicas (Franco, 2012), a partir de la elaboración y análisis del modelo numérico de la edificación en estudio fue posible estimar las frecuencias naturales y las formas modales. Este análisis preliminar ayudó a tomar decisiones sobre el sistema de adquisición de datos a usar y la instalación de acelerómetros en la estructura. Fue posible identificar los parámetros dinámicos de la edificación: frecuencias, formas modales y amortiguamiento a partir de las mediciones de vibración ambiental en el templo. Se obtuvo un modelo numérico más cercano a la realidad mediante el ajuste de los módulos de elasticidad de los materiales constitutivos de la edificación y la inclusión de los daños estructurales identificados en el templo. Se logró proponer un modelo numérico con la rigidez equivalente en los dos modos de vibración principales, los cuales se encuentran gobernados por flexión en dirección transversal y longitudinal de la estructura.

Estudios realizados en la ciudad de Lima en un edificio patrimonial de sistema de adobequincha tradicional donde se buscó investigar las características de vibración del mismo (Cuadra, 2012), dicho edificio ha sido expuesto a la acción de varios terremotos, las mediciones de vibraciones ambientales en la construcción permitieron determinar el período predominante de vibración del edificio, tales resultados se encuentran en proceso de ser utilizados para construir y calibrar modelos analíticos para futuros análisis sobre el comportamiento sísmico de este tipo de edificios.

La vibración puede provocar daños a través de una serie de mecanismos. Las fuerzas inducidas por las vibraciones pueden causar daño directo a los objetos débiles o frágiles, especialmente aquellos con pigmentos friables o productos de corrosión sueltas. Como consecuencia de la circulación de visitantes, bajo condiciones de uso normal, se ha encontrado que su pueden dar vibraciones excedentes en los museos y casas históricas que pudieran atentar a la integridad de sus acerbos, y dicha vibración se han estudiado que son extremadamente

caros de mantener para poder ser reducidas. Esta es la principal fuente de las vibraciones a las que están expuestos la mayoría de los objetos en los museos. Los niveles de vibraciones ambientales de la circulación de visitantes en los pisos de madera se acercan a los niveles de daño identificados y podrían representar un riesgo en algunos casos. Una investigación de los niveles de vibración alrededor de las galerías del museos inducidos por las actividades del día a día realizado por (Thickett, 2012), mostró como resultados principales que las aceleraciones promedio eran del orden de entre 0.006 g y 0.15 g, siendo las máximas de carácter extremadamente localizables. Las mediciones de las vibraciones sufridas por los objetos mientras se está produciendo el daño, fue identificado que los niveles correspondientes de daño son del orden de 0.2 g a 0.6 g. Según estudios, se ha observado que el daño se restringe a objetos con debilidades pre-existentes y con defectos. La vibración es raramente tomada en cuenta cuando se montan o se diseñan montajes, y gran parte del daño se debe a mecanismos de fijación utilizados. Se ha visto afectada una alta gama de tipos de objetos, incluyendo pinturas de pared, terracota, y las superficies policromas, sin embargo, muchos tipos de materiales pueden no estar expuestos a la vibración. La transmisión de vibraciones a través de un edificio puede ser muy difícil de predecir y ensayos antes del inicio de las obras de construcción son de gran beneficio.

Estudios de evaluación estructural de una construcción de adobe del siglo XIX, ubicada en el centro histórico de Lima, mediante un monitoreo denso consiguió caracterizar adecuadamente sus propiedades dinámicas (Aguilar, 2012). Durante la fase experimental, la fachada fue totalmente equipada con doce acelerómetros uni-axiales lo que permitió la identificación de siete modos complejos. La complejidad de los resultados evidenció graves problemas estructurales en el edificio. Trabajos futuros pueden considerar un análisis detallado, así como la realización de ensayos in situ para evaluar el estado real de las paredes y otros elementos estructurales. Sería también de interés una segunda serie de pruebas de identificación modal, esta vez teniendo en cuenta la medición de más grados de libertad con una densa red de sensores.

La Torre Gabbia (Siglo XII), ubicada en Mantua, de acuerdo con investigaciones recientes, se realizaron las comparaciones entre sus modos de vibración (Saisi, 2013), dicha identificación se hizo mediante la ejecución de dos pruebas dinámicas proporcionan las siguientes evidencias: i) la forma modal de los modos inferiores fue reconocida prácticamente sin cambios; ii) el modo de torsión cambió de forma de modo en la parte superior del edificio. Más específicamente, el componente de torsión es dominante en la parte inferior de la torre, mientras que un componente de flexión local prevalece en la región superior; iii) un nuevo modo local fue identificado, con la participación de la torsión en la parte superior de la torre.

Estudios realizados mediante un sistema de vigilancia de la salud estructural permanente en la Basílica de Santa María di Collemaggio (Siglo XIII) por (Gattulli, 2013), han detectado seis eventos importantes después de las afectaciones a causa del terremoto de L' Aquila de 2009, dichos eventos asociados con sismicidad en la región de Emilia. Desde los meses siguientes a la instalación del sistema de vigilancia se pudieron registrar las vibraciones sísmicas de forma continua gracias al sistema implementado. Durante este tiempo, de igual forma, campañas de ensayos se han realizado con diferentes fuentes de las vibraciones inducidas tales como martillos, vibraciones ambientales y las pruebas de vibración libre. Algunos de los hallazgos más importantes dentro de este estudio ha sido que existe una reducción evidente de la rigidez después de cada terremoto. La estructura actualmente es más flexible, ya que los principales períodos modo pasaron de 0.69s a 0.95s, un aumento del 37 por ciento. Se ha evidenciado la fuerte vulnerabilidad de los muros de la nave, sobre todo los interiores con respecto a acciones transversales sísmicas, incluso en presencia de los sistemas de refuerzo de acero ligero existentes.

Pruebas experimentales in situ llevadas a cabo en el "Hotel Comercio" (siglo XIX) por (Aguilar, 2013), en Lima, Perú, indican que en el caso de elementos dañados, la medición de una red densa de sensores es importante para caracterizar adecuadamente su comportamiento dinámico. La complejidad de los resultados evidenció graves problemas estructurales en el edificio.

La Columna de Trajano, puente construido a finales del Siglo XIX, que se encuentra a lo largo de la línea ferroviaria de Roma-Sulmona, que cruza la región central italiana de Abruzzo. Fue estudiada por (Pau, 2014) en cuanto a su comparación mediante modelos de elementos finitos, demostrado que después de una actualización de las propiedades del material de los modelos de elementos finitos, un acuerdo entre las frecuencias experimentales y numéricas se puede conseguir . Cuando se trata de estructuras de mampostería, esta actualización puede implicar una fuerte reducción del Módulo de Young desde los parámetros de los materiales.

2.1.6. Otros métodos de monitoreo de construcciones históricas

Las pruebas de los materiales estructurales de edificios históricos, implican el examen de las grietas existentes internas y externas, fisuras, pruebas de resistencia a la penetración, determinaciones de la resistencia de compresión, etc. (Lisman, 2012). La tecnología actual ofrece a todos los especialistas involucrados una gama completa de ensayos, aparatos y técnicas, la mayoría de los cuales no destructivos o reducidamente intrusivos, que hacen posible la recogida de los datos necesarios para la construcción y validación del modelo. Estos métodos pueden ser utilizados no sólo en las intervenciones de rehabilitación de la estructura, sino también durante y después de esa intervención, siendo el modelado de la estructura tan sólo una fase específica del proceso global. Pueden ser identificadas siete etapas (Coias, 2006), a las que pueden ser aplicados los métodos: i) investigación y observación preliminar (antes de la intervención); ii) caracterización geométrica de la estructura y la cimentación (antes del modelado); iii) caracterización de las propiedades mecánicas de los materiales (antes del modelado); iv) validación del modelo (durante el modelado); v) control de calidad (durante la intervención); vi) evaluación de los efectos de la intervención (después de la intervención) y; vii) monitorización(después de la intervención).

La aplicación del método de categorización o caracterización (M.C.C.), consiste en una

inspección detallada de los edificios históricos (Preciado, 2007), en el orden de obtener la clase de vulnerabilidad relacionada con la tipología estructural. Esta evaluación se desarrolla basándose en los materiales de construcción por los que está conformado el sistema resistente vertical (muros) del edificio, asignando una de las seis clases de vulnerabilidad A, B, C, D, E o F, donde A es muy vulnerable y F es menos vulnerable. Es muy importante mencionar que la evaluación se realiza tomando en cuenta información adicional como lo es materiales de construcción, análisis histórico, descripción estructural e intervenciones previas. Las clases A y B pertenecen a vulnerabilidad alta, C y D a vulnerabilidad media, E y F a vulnerabilidad baja. En México esta metodología ha sido aplicada (a quince edificios) teniendo como resultados, que trece edificios pertenecen a la clase de vulnerabilidad media y los dos restantes a la clase de vulnerabilidad alta. El procedimiento para aplicar el método de inspección y puntaje consiste en inspeccionar cuidadosamente cada edificio, en el orden de identificar y caracterizar las deficiencias estructurales potenciales correspondientes a once parámetros, asignando a cada parámetro una de las cuatro clases A, B, C, o D (A: menos vulnerable, D: más vulnerable), atribuyendo valores numéricos (puntos) a cada componente significativa, para determinar con la ecuación 1, el índice de vulnerabilidad (I_v), y finalmente, asignar una clase de vulnerabilidad (alta, media, o baja) de acuerdo con los intervalos.

Desde el desarrollo del sistema de posicionamiento global en la década de 1970, dicha metodología ha sido una solución rápida para el problema de localización de puntos en tres dimensiones sobre la superficie terrestre. Sobre esta base se construyó el método de determinación rápida de posicionamiento espacial de los objetos utilizando la técnica de escaneo láser (orto-foto) (Lisman, 2012). Escáneres láser 3D que se asemejan a las cámaras de fotos, mediante la recopilación de información sólo de los puntos visibles, y usando un campo visual cónica, se extrapola la información de los objetos en estudio a través del proceso de reconstrucción. Los sistemas actuales permiten la adquisición de información relativa al color de la superficie de los objetos. Este concepto ha sido adaptado actualmente para la vigilancia mediante la determinación digital de la geometría de un determinado objeto espacial con alta velocidad y precisión.

Entenderemos ahora a la orto-foto como otro producto de la fotogrametría que puede ser utilizada para la codificación y estudio del patrimonio cultural (Alshawabkeh, 2013). La orto-foto es la corrección geométrica de la escala y la posición de la distorsión de los objetos en una fotografía causada por la proyección de la perspectiva de la imagen. La metodología de generación de la orto-foto depende principalmente de la generación de modelos digitales de superficie precisos del objeto estudiado. La foto se genera utilizando representaciones 3D precisas de la superficie, derivada del escaneo láser e imágenes digitales portátiles de área en estudio. Esta técnica tiene la capacidad para detectar con precisión el daño, y cuantificar los desplazamientos del material sin entrar en contacto físico con la estructura. Los resultados permiten determinar los desplazamientos tanto en términos de cuantificación y la dirección del movimiento.

La emisión acústica (EA) (Xu, 2013), es una técnica de monitoreo no destructivo promotor para investigar la ubicación de daño y para evaluar las condiciones de salud estructurales. Esta técnica de investigación es ampliamente utilizada para la supervisión de estructuras metálicas, rocas y estructuras de concreto. La EA es una técnica muy adecuada para ser aplicada en materiales homogéneos o quasi-homogéneas con buena transmisión acústica. Sin embargo, su aplicación en materiales heterogéneos tales como albañilería es mucho más problemático. La localización de las fuentes de AE es importante para evaluar las regiones de daño activo en la técnica de monitorización. Ubicación problemas suelen resolverse mediante diversas técnicas de triangulación basada en el análisis matemático de las trayectorias de ondas acústicas. Este análisis no puede ser simplemente realizado si la estructura de la muestra analizada es geoméricamente complicada. Generalmente, estas técnicas dependen del modo de propagación, el módulo de elasticidad, y atenuación de la señal debido a la heterogeneidad y la anisotropía del material. En esta sección, una visión general sobre el método de localización clásica y el conocimiento correspondiente se representa. La disposición de sensor es otra tarea que debe ser considerada cuidadosamente. La investigación de la exactitud de localización ha demostrado que la distribución de los sensores es esencial para el seguimiento de la

actividad de la EA en la muestra. La condición ideal es asegurarse de que todas las regiones pertinentes están cubiertas superficialmente sensores antes de que comience la monitorización. Los eventos detectables serían sólo una cantidad fraccionaria de todas las señales EA registrados y, de nuevo, sólo un número limitado de todos los eventos detectados pueden ser localizados en una suficiente con exactitud. Para una buena imagen de la progresión de la grieta es necesario que suficientes eventos pudieran ser localizados. Por tanto, la disposición adecuada de los sensores nos puede dar más puntos disponibles. Sin embargo, la localización de la fuente de A.E. en estructuras de fábrica es muy complicada, ya que la atenuación y la velocidad de la onda dependen de la heterogeneidad del material (no sólo la interfaz entre los ladrillos y el mortero, pero también las grietas y cavidades en las estructuras existentes).

2.2. Normativa de vibraciones en edificaciones históricas

Hay que tener muy en cuenta que trabajos de construcciones aledaños, tráfico, entre otras fuentes de ruido ambiental pueden provocar afectaciones en las estructuras históricas, para lo cual existe normatividad que tiene que ser tomada en cuenta: Para comenzar, los niveles de vibración estructuralmente "seguros", son aquellos en los que se considera que es mínimo el riesgo de afectar la cosmética de construcciones y no permite la aparición de grietas, de igual manera, se son aquellos que están muy por debajo de los niveles que tuvieran el potencial de causar daños a la estructura principal (Joint, 2006). El análisis de la respuesta dinámica inducida en una estructura por las vibraciones ambientales es importante por dos razones. Por un lado, el impacto ambiental de las vibraciones es una causa común de preocupación en muchas ciudades de todo el mundo a causa tanto de las consecuencias de este tipo de vibraciones en edificios, especialmente aquellos en condiciones estructuralmente débiles, y en las personas en términos de molestia. Por otro lado, los datos medidos contienen información sobre las características dinámicas de las estructuras, tales como parámetros modales (frecuencias, relaciones de amortiguamiento y formas de los modos) (Pau, 2014).

En general, las vibraciones del suelo a partir de fuentes de construcción pueden afectar a las estructuras adyacentes y remotas, de la siguiente manera (Svinkin, 2004):

- Las vibraciones pueden producir daños directos a estructuras cuando la frecuencia de excitación de las vibraciones del suelo no coinciden las frecuencias naturales de las estructuras. Este daño generalmente ocurre en las estructuras cercanas a distancias sobre una longitud de pelo de pilotes hincados y cerca de 100 m (328 pies) de explosiones. La intensidad de las vibraciones de la estructura depende de interacción suelo-estructura que determina la estructura de la respuesta a la excitación suelo. Las vibraciones de construcción que tienen frecuencias bajas y altas suelen ser generados ondas de compresión. Hay dos rangos de frecuencia de las respuestas de la estructura: 2-30 Hz y 30-450 Hz.

- Respuesta en resonancia: La proximidad de la frecuencia de las vibraciones de la tierra a una de las frecuencias naturales del edificio puede generar la condición de resonancia. Cuando las vibraciones con una frecuencia cercana a la frecuencia natural de la estructura existe, el valor predictivo positivo de la estructura vibraciones se considera en una magnitud de 2.7 veces, dando paso a que las vibraciones de la estructura aumenten después del primer ciclo de las vibraciones del suelo. Bajo la condición de resonancia, la amplificación dinámica máxima podría ser mucho mayor.

En cuanto a los criterios vibración permisibles, la (BS 7385-1, 1990), Parte 2-1993 "Evaluación y Medición de vibraciones en los edificios", es un estándar que prevé la probabilidad de daño a las edificaciones evaluando la vibración del suelo transmitida debido a distintas fuentes de excitación. Las fuentes de las vibraciones que se consideran en la norma incluyen la demolición, voladuras (llevadas a cabo durante la extracción de minerales o la realización de excavaciones), anclaje de pilotes, tratamientos del suelo (por ejemplo, la compactación), vibración debida al uso de equipos de construcción y maquinaria industrial, así como la que transmiten los túneles, carreteras y el tráfico ferroviario.

Según la (BS 7385-1, 1990), para que se tenga un riesgo mínimo de afectación debido a vibraciones, se toman valores en los que en un 95den efectos de daño. En esta norma, los valores orientativos para la vibración transitoria, juzgada para tener un riesgo mínimo de daños estéticos en los edificios son de 3.7 mm/s a 1 Hz, aumentando a 15 mm/s con una frecuencia de 4 Hz, aumentando a 20 mm/s en una frecuencia de 15 Hz, a continuación, a 50 mm/s a una frecuencia de 40 Hz y por encima. Cuando la carga dinámica de un edificio causada por una vibración continua de su base, es tal, como para dar lugar al aumento dinámico de la vibración entre otras partes del edificio debido a la resonancia, que se da especialmente en las frecuencias más bajas.

En relación a los edificios históricos, (BS 7385-1, 1990) señala que "los edificios importantes y de difícil reparación pueden requerir una consideración especial". Un edificio de valor histórico (a menos que sea estructuralmente defectuoso), se supone que es más "sensible". Una clasificación de edificios se da en Anexo A de la norma "BS 7385: Parte 1: 1990", con una indicación de la resistencia relativa a la vibración. En contraste, la norma "DIN 4150. aplica automáticamente el criterio más bajo posible a los edificios históricos sin justificación, basándose en la sensibilidad real del edificio.

La norma americana Council Ground Vibration Limits.^{en} su parte 6 de la ley local 5 dice que la máxima vibración permisible del suelo (velocidad de partícula máxima), es:

- Para edificios históricos, monumentos o ruinas 2 mm/s.
- Para edificios o estructuras visiblemente dañados o agrietados 10 mm/s.

El límite del Consejo de 2 mm/s se ha utilizado para la evaluación de los niveles de vibración en los edificios históricos en varias partes del mundo (Joint, 2006).

Edificios históricos son potencialmente sensibles a daños arquitectónicos de los niveles

de vibración sonora superior a 65 VdB. Este impacto puede afectar negativamente a las características históricas de un edificio (Noise and Vibration, 2004).

Las mediciones de vibraciones utilizado en esta evaluación se expresan en términos de la velocidad de partícula máxima (V.M.P.), y en la unidad de pulgadas por segundo (ips). La V.M.P., es una cantidad comúnmente usada para mediciones de vibración, que es la velocidad máxima experimentada por cualquier punto en una estructura durante un evento de la vibración. Es una indicación de la magnitud de la energía transmitida a través de la vibración. V.M.P. es un indicador frecuentemente utilizado en la determinación de los posibles daños a los edificios de estrés asociados con explosiones y otras actividades de construcción.

En un estudio particular (Garavaglia Architecture, Inc, 2013), del cual se nombra distinta normatividad respecto a límites de vibración permisibles, son rescatables ciertos criterios:

Para los proyectos de construcción dentro de la ciudad de Nueva Orleans, el Gobierno de la Ciudad establece los siguientes límites de vibración admisibles en estructuras históricas de 0.25 cm/seg.

La "Asociación Suiza de Normatividad de Criterios de Daños por Vibración", establece que para construcciones sensibles a las vibraciones, u objetos de interés histórico, un límite de 0,12 ips.

La "Administración Federal de Ferrocarriles"(F.R.A.) proporciona un criterio de umbral de daño por vibración de 12,7 mm/s para edificios frágiles.

En juicios de la "Çhae Building Vibrations Criteria", es aceptable un máximo de 1 cm/s P.P.V. en edificios antiguos.

Los "Whiffen Vibration Criteria for Continuous Vibration", recomiendan un máximo per-

misible de 0.08 cms/seg de vibraciones en ruinas y monumentos antiguos.

No existe una norma o criterio que sea aceptado para evaluar los efectos de la vibración (debido a proyectos u obras de transporte) sobre edificios históricos. Los límites de vibración recomendados tienden a variar considerablemente dentro de la literatura publicada (figura 12).

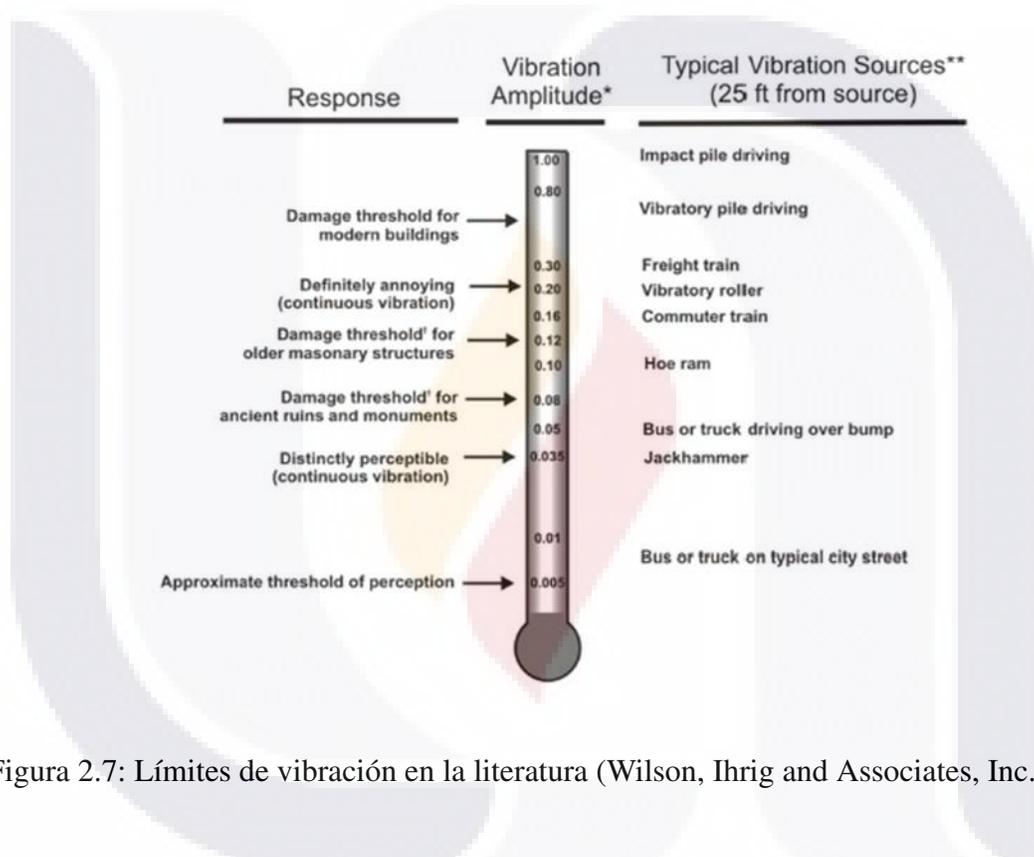


Figura 2.7: Límites de vibración en la literatura (Wilson, Ihrig and Associates, Inc., 2012).

Es evidente que hay una amplia gama de opiniones acerca de los límites de vibración apropiados para edificios y estructuras históricas (Wilson, Ihrig and Associates, Inc., 2012). En un extremo de la gama, el límite conservador es de 0,10 in/seg, excepto en el caso de las antiguas ruinas donde se considera 0,08 in/seg. En el otro extremo de la gama, algunos consideran desde 0.5 in/seg hasta 2.0 in/seg.

2.3. Recomendaciones de ICOMOS para el monitoreo de estructuras históricas

Recomendaciones generales respecto al monitoreo, (ICOMOS, 2004):

- La observación de la estructura durante un cierto período de tiempo puede ser necesaria no sólo para obtener información útil acerca de la existencia de fenómenos progresivos, sino también para el seguimiento de un proceso de renovación estructural de carácter secuencial. En este último caso, se monitoriza el comportamiento en cada fase (enfoque observacional) y los datos que se obtienen proporcionan la base para cualquier acción posterior;

- Normalmente un sistema de monitorización tiene como objetivo registrar los cambios en las deformaciones, fisuras, grietas, temperaturas, etc. La monitorización dinámica se utiliza para registrar aceleraciones, como las que ocurren en zonas sísmicas. La monitorización puede actuar también como un sistema de alarma;

- El método más simple y económico para monitorizar las grietas o fisuras consiste en situar un testigo en ellas. A veces es preciso utilizar sistemas de monitorización informatizados para poder registrar los datos en tiempo real;

- Como regla general, el uso de un sistema de monitorización debe estar sujeto a un análisis de costes y beneficios, de modo que los datos que se registren sean los estrictamente necesarios para caracterizar la evolución de los fenómenos progresivos.

Recomendaciones generales respecto al análisis, (ICOMOS, 2004):

- El enfoque analítico parte de los métodos del análisis estructural moderno, los cuales llegan, a partir de ciertas hipótesis (teoría de la elasticidad, teoría de la plasticidad, estructuras porticadas, etc.), a conclusiones basadas en cálculos matemáticos. En términos filosóficos

se trata de un procedimiento deductivo. Sin embargo, las incertidumbres que pueden afectar a la representación de las características de los materiales y del comportamiento estructural, junto con las simplificaciones adoptadas, pueden llevar a resultados que no siempre son fiables o que incluso están muy alejados de la situación real. La esencia del problema reside en la identificación de aquellos modelos que sean representativos y describan adecuadamente la estructura y los fenómenos asociados en toda su complejidad, con lo cual será posible la aplicación de las teorías disponibles;

- Los modelos matemáticos son las herramientas más frecuentemente utilizadas en el análisis estructural. Los modelos que describen la estructura original, si han sido adecuadamente calibrados, permiten comparar el daño teórico producido por diferentes tipos de acciones con el daño observado en la realidad, y proporcionan así una herramienta útil para identificar sus causas. Los modelos matemáticos de la estructura dañada y de la estructura reforzada ayudan a evaluar los niveles de seguridad actuales y valorar los beneficios de las intervenciones propuestas.

Recomendaciones generales respecto al nivel de seguridad, (ICOMOS, 2004):

- La evaluación del nivel de seguridad es el último paso en la fase de diagnóstico. Mientras que el objetivo del diagnóstico es identificar las causas del daño y del deterioro, la evaluación del nivel de seguridad debe determinar, a partir de un análisis de la condición actual de la estructura y los materiales, si los niveles de seguridad son aceptables o no. La evaluación del nivel de seguridad resulta así un paso esencial en el proyecto de restauración, puesto que con ella se toman las decisiones respecto a la necesidad y el alcance de cualquier medida terapéutica;

- Con todo, la evaluación del nivel de seguridad es también una tarea difícil porque los métodos de análisis estructurales utilizados para construcciones modernas pueden no ser ni exactos ni fiables cuando se aplican a estructuras históricas, lo cual puede llevar a tomar de-

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

cisiones incorrectas. Ello se debe a varios factores, tales como la dificultad de comprender en profundidad la complejidad de un edificio antiguo o de un monumento, las incertidumbres respecto a las características de los materiales, el desconocimiento de los fenómenos previos (por ejemplo, asientos del terreno) y el conocimiento incompleto sobre las alteraciones y reparaciones realizadas en el pasado. Así pues, un enfoque cuantitativo basado en modelos matemáticos no puede ser el único procedimiento utilizado. Como en la fase de diagnóstico, también debe partirse de enfoques cualitativos basados en la investigación histórica y en la observación de la estructura. En algunas situaciones también puede resultar de utilidad un cuarto enfoque basado en ensayos específicos;

- Cada uno de estos enfoques, que se exponen a continuación, puede guiar la evaluación del nivel de seguridad, pero es el análisis conjunto de la información obtenida en cada uno de ellos lo que llevará al mejor "veredicto". Para llegar a ese veredicto deben tenerse en cuenta tanto los aspectos cuantitativos como los cualitativos, que deben ser valorados en función de la fiabilidad de los datos y de las hipótesis admitidas. Todo ello debe exponerse en el informe explicativo ya mencionado;

- Así pues, debe quedar claro que el arquitecto o ingeniero encargado de la evaluación del nivel de seguridad de un edificio histórico no debería verse legalmente obligado a basar sus decisiones únicamente en los resultados de cálculos, puesto que, como ya se ha apuntado, esos datos pueden ser poco fiables o inadecuados;

- Procedimientos parecidos deben seguirse para evaluar los niveles de seguridad después del diseño de ciertos tipos de intervención a fin de valorar sus beneficios y garantizar que su nivel de aplicación sea el adecuado (ni insuficiente ni excesivo).

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

Capítulo 3

Estado del arte

3.1. Análisis estructural de construcciones históricas

La infraestructura civil comprende una gran gama de edificaciones de distintos tipos, las cuales es de gran importancia que tengan un funcionamiento continuo, que se mantengan en condiciones que proporcionen seguridad a los usuarios y tengan un costo de operación económico para el beneficio de la sociedad. La infraestructura civil es raramente sujeta a cualquier tipo de experimento respecto a su condición y comportamiento estructural antes de que entre en servicio, lo cual nos da como resultado el uso en cuestiones de diseño de varios factores de seguridad e incertidumbre para su rendimiento (Brownjohn, 2011a).

El análisis de las construcciones históricas de mampostería es una tarea compleja que requiere una formación específica. Los continuos cambios en los materiales y técnicas de construcción, que rápidamente ocurren en la práctica tradicional, y los avances técnicos y científicos, hacen nuevas posibilidades para todos los agentes implicados en la conservación del patrimonio arquitectónico, estos son aspectos clave en la división entre la ciencia de la construcción y el arte de la conservación y restauración (Lourenco, 2011a). El diseño y construcción de los edificios que hoy son parte del patrimonio cultural de la humanidad, fue posible gracias a la acumulación de conocimientos empíricos, que generalmente fueron transmitidos mediante la experiencia de generación en generación. En contraste, actualmente

se cuentan con conocimientos, técnicas avanzadas de análisis y poderosas herramientas de cálculo automático que permiten modelar numéricamente y con gran precisión, el comportamiento mecánico de estructuras complejas. Sin embargo, el análisis estructural de edificios históricos de mampostería con fines de evaluación sísmica continúa siendo un desafío debido a una serie de factores (Orduña, 2007). Las estructuras de mampostería históricas tienen una geometría compleja, además de contar con intervenciones pasadas sucesivas, en tanto que los materiales que constituyen, se tiende a mostrar variaciones significativas en las propiedades y estructura interna. Por lo tanto, la selección de modelos apropiados para el análisis estructural no es fácil (Lourenco, 2011a).

El comportamiento estructural de un edificio patrimonial o histórico depende de muchos parámetros tales como a) las propiedades de los materiales, b) el proceso constructivo, c) técnicas de fabricación, d) el ambiente de carga, e) condiciones de colindancia, entre otros. La influencia de estos parámetros no es lineal, haciendo el pronóstico de dichos modelos difícil (Kumar, 2008). La generación de discontinuidades entre los elementos estructurales de un edificio debido a fracturas y cuarteaduras, y el cambio de las propiedades mecánicas de los materiales debido a la intemperie o fatiga, propicia cambios en las propiedades dinámicas que comienzan cuando se modifican las propiedades estructurales, principalmente la rigidez. Basándose en esta relación entre la degradación en la salud estructural y los cambios en la respuesta dinámica del edificio, el monitoreo de la salud estructural aspira a la detección del daño así como a la ubicación de la zona o elemento dañado, el grado de afectación y la extensión de la zona dañada (Prabhu, et al., 2011).

En este tipo de estructuras, la elaboración de modelos numéricos también es difícil de poner en práctica, no sólo por la dificultad en la representación de la realidad del daño y la evaluación de las propiedades de los materiales, sino también para una representación adecuada de las condiciones de contorno reales de la construcción (construcciones vecinas, también severamente dañadas, etc.) (Aguilar, 2013). Actualmente las evaluaciones de puentes son complementadas con análisis de elementos finitos. El problema con este método analíti-

co es que es difícil determinar el modelo estructural real para la mayoría de los edificios y puentes. Los modelos generalmente son construidos asumiendo muchas simplificaciones, tal como suponer que la estructura es monolítica. Otro problema es la dificultad de determinar cuáles elementos estructurales y en qué medida se han degradado por el envejecimiento o alteración de los materiales (Chang, 2003).

En la actualidad se cuenta con conocimientos y técnicas avanzadas de análisis que permiten modelar numéricamente, y con gran precisión, el comportamiento de estructuras complejas. Sin embargo, el análisis estructural de edificios históricos de mampostería continúa siendo un desafío debido a una serie de factores. Uno de ellos es la gran heterogeneidad generalmente presente en estas construcciones que dificulta asignar propiedades mecánicas globales al modelo del material. La mampostería es un material compuesto y esto también representa un reto; las características de este tipo de construcciones ha llevado a establecer dos niveles de análisis del comportamiento mecánico de las estructuras: el nivel microscópico y el nivel macroscópico. En el primero se discrimina el comportamiento mecánico de las piezas, de las juntas de mortero y de las interfaces entre ellas. En el segundo nivel de análisis, el estudio se enfoca en el comportamiento de elementos estructurales como muros, arcos y bóvedas, entre otros (Orduña, 2004a).

El análisis estructural es una de las cuatro herramientas diferentes o fuentes de información (Figura 13), que pueden ser consideradas para investigar una estructura histórica. La evidencia proporcionada por ellas se va a integrar en un solo enfoque o entendimiento. La información resultante mediante el análisis estructural no debe estar en contradicción con la proporcionada por las otras fuentes (SA2 Lectures at SAHC (UPC), 2012).

El análisis estructural puede contribuir a las diferentes fases involucradas en el estudio de una estructura histórica, es decir, diagnóstico, evaluación y seguridad (SA2 Lectures at SAHC (UPC), 2012):

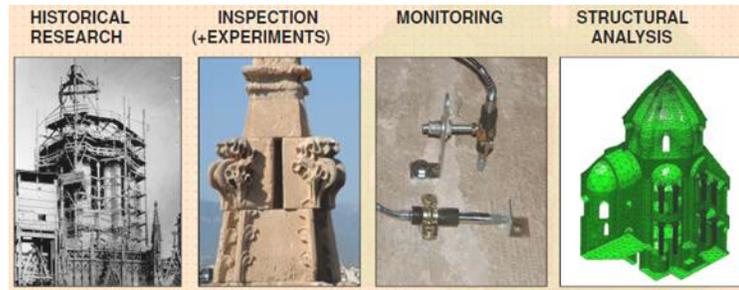


Figura 3.1: Herramientas o fuentes de información para investigar una estructura histórica.

- En el diseño e intervención: en el diagnóstico, análisis estructural contribuye a la capacidad de simulación de posibles acciones y ayudar a una conclusión sobre sus efectos en la estructura;

- En la evaluación de seguridad: el análisis estructural contribuye con una medida (cuantitativa) de la capacidad de la estructura para resistir diferentes acciones posibles o futuras. Que a su vez, proporciona una visión de las debilidades estructurales y las necesidades en cuanto a su fortaleciendo;

- En el diseño de intervención: ayuda a decidir sobre la más eficiente estrategia para el fortalecimiento adecuado y las medidas de seguridad a tomar.

El modelado de una estructura antigua para evaluar su situación actual y prevenir su comportamiento es, normalmente, una tarea muy compleja, que requiere ingenieros de estructuras experimentados y conocedores de esta área, dotados de herramientas de análisis modernas. No obstante, no será posible realizar un modelado seguro sin un conocimiento apropiado de las características relevantes del prototipo. La tecnología actual ofrece a todos los especialistas involucrados una gama completa de ensayos, aparatos y técnicas, la mayoría de los cuales no destructivos o de mínima intrusión, que hacen posible la recogida de los datos necesarios para la construcción y validación del modelo. Estos métodos pueden ser utilizados no sólo en las intervenciones de rehabilitación de la estructura, sino también durante y después de esa intervención, siendo el modelado de la estructura tan sólo una fase específica del proceso

global (Coias, 2006).

Los modelos estructurales a tomar en cuenta para estudio del estado de una estructura histórica pueden ser: icónicos, de materiales, analógicos, a escalas experimentales, en el edificio en sí y mediante métodos numéricos (SA2 Lectures at SAHC (UPC), 2012):

- Modelos materiales: son modelos hechos a escala y contruidos con materiales disponibles para fines arquitectónicos. Su realidad física no está conectada a la de la verdadera estructura. En un principio, se pueden utilizar para evaluar el rendimiento estructural;

- Modelos analógicos: una equivalencia física (analogía) se utiliza para evaluar la estructura;

- Modelos experimentales a escala: el modelo refleja la físicamente en la realidad de la verdadera estructura pero para la escala, el equilibrio de las estructuras esqueléticas de albañilería pueden ser representadas adecuadamente, mediante el uso de modelos no resistentes a la tensión, como es el caso del yeso o piedra;

- La estructura misma: la verdadera estructura se puede utilizar como un modelo de sí mismo a través de la ingeniería (interpretación técnica) de su pasado rendimiento durante la ocurrencia de acciones históricas (terremotos y otros);

- Modelos numéricos: la respuesta de la estructura se simula por medio de la formulación matemática implementada en un código de ordenador (F.E.M.).

Resulta casi obvio que el análisis de la estructura y su modelización exige, como paso previo, la identificación de los elementos estructurales. No es tan obvio porque las estructuras de fábrica, generalmente de tipo masivo, no siempre dejan ver cuáles son sus elementos resistentes, debido a la existencia de postizos, ornamentos, rellenos y otros cuerpos que en-

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

mascaran y hasta falsean el esquema estructural. El técnico debe, pues, estar atento a estas posibles trampas (León, 2000).

Los modelos numéricos son hoy en día preferibles debido a (SA2 Lectures at SAHC (UPC), 2012):

1.- Razones económicas: La preparación y prueba analógica o experimental de los modelos es costosa y consume mucho tiempo. Por lo general permiten un solo uso.

2.- Versatilidad: El ordenador permite muchas variaciones, mejoras, cambios. La asunción de muchas hipótesis de carga distinta, se puede analizar el modelo con un esfuerzo limitado.

3.- Capacidad: En la actualidad existen muchas alternativas y de gran alcance numérico las formulaciones para el análisis de estructuras complejas (incluida la mampostería). La investigación continua continúa ofreciendo modelos mejorados y aplicaciones informáticas.

El diagnóstico de una estructura de mampostería involucra la identificación de las causas de daño y decadencia y la caracterización de la condición de la estructura. La contribución del análisis estructural es esencial, en la combinación con investigación histórica, la inspección, la observación y el análisis estructural. El análisis estructural contribuye con la posibilidad de simular el rendimiento de la estructura, cuando esta es sujeta a movimientos y a conocer en conclusión sobre su influencia posible sobre la condición actual y el daño existente. Algunas clases de daño pueden ser asociadas a las causas históricas estudiadas. La evaluación de la seguridad estructural consiste en determinar la aceptabilidad de los niveles de seguridad analizando la presente condición de estructura y de los materiales. Involucra, en particular, la determinación de la capacidad de la estructura. El análisis estructural provee un enfoque deductivo. Un modelo estructural es usado para obtener un pronóstico cuantitativo de la capacidad de la estructura sujeta a diversas acciones por las que es ser impuesta (la carga descargada la carga viva, sismo, entre otras) (SA2 Lectures at SAHC (UPC), 2012).

Mucho más importante, los aspectos que se deberían tomar en cuenta para seleccionar una herramienta de cálculo son (Lourenco, 2002):

- Información disponible. Es necesario que los datos que se dispongan de la estructura, así como de las solicitaciones actuantes, sean suficientes para poder definir el modelo matemático. Estos datos son recopilados en el paso anterior: adquisición de datos. La falta de información se podría suplir con datos obtenidos de la literatura o tomando valores nominales. Sin embargo, esto involucraría incertidumbres adicionales al problema.

- Resultados esperados. Los resultados que se puedan obtener del método de análisis deben proporcionar la información requerida para el proyecto. Algunas veces, las limitaciones intrínsecas de la herramienta de análisis no permiten obtener la información necesaria. Por ejemplo, un análisis límite no permite conocer las deformaciones de la estructura o un análisis en dos dimensiones no podrá considerar efectos tridimensionales como son las torsiones en algunos elementos.

- Disponibilidad y Compatibilidad. Obviamente la herramienta de análisis debe ser de fácil acceso y manejo (disponibilidad) para el profesional encargado del análisis. Así mismo, es de vital importancia que dicho profesional tenga el conocimiento suficiente de la teoría en que está basado el método de análisis (compatibilidad) para poder hacer un correcto modelado e interpretación de los resultados.

- Costos. Se debe de tomar en cuenta que los recursos disponibles estén de acuerdo con los requeridos por la herramienta de análisis. Los recursos son tanto financieros, como de capacidad de cálculo (cómputo), tiempo disponible para el análisis e interpretación de resultados, entre otros.

- Idealización y Validación. Todo modelo analítico se basa en la idealización de la reali-

dad, por lo tanto, es necesario que sea lo más apropiada posible. En general se hace una idealización de los elementos estructurales, el comportamiento y características del material, las solicitaciones actuantes. Así mismo, el modelo matemático resultante de la idealización de la realidad, debe ser validado con el fin de asegurarse de que la idealización sea correcta. Esta validación se da en el paso tres, como se explica en la siguiente sección.

Trabajar un modelo estructural no está fuera de las actividades científicas, sino es parte de esencial e inseparable, un modelo es un reconocimiento físico, matemático, o la representación lógica de un sistema, entidad, fenómeno o proceso. Una simulación es la puesta en práctica de un modelo dependiente del tiempo. Una simulación ya actuando nos muestra con detalle como el fenómeno actuará. Existen varios tipos de modelos estructurales a ser tomados en cuenta (SA2 Lectures at SAHC (UPC), 2012): modelos icónicos (Figura 14.a), representan de manera ilustrativa la explicación de un fenómeno determinado; modelos materializados (Figura 14.b), modelos a escala son construidos con propósitos arquitectónicos, hay que tomar en cuenta que su realidad física no representa el comportamiento estructural real de la estructura; modelos analógicos (Figura 14.c), se utiliza una equivalencia física para comprender el comportamiento de la estructura; modelos experimentales a escala (Figura 14.d), el modelo refleja la realidad física del elemento a analizar con fin de representar su comportamiento; la estructura misma (Figura 14.e), en este caso pueden ser los casos donde ocurrió un terremoto y en base a las observaciones de los daños se intenta interpretar que fue lo que paso o que factores estructurales intervinieron para terminar en determinadas condiciones; u modelos numéricos (Figura 14.f).

El modelo estructural es en el que va en función nuestra hipótesis, e incluye dos tipos de la hipótesis: 1) los fundamentos de su descripción mecánica y la relación con su reacción de resistencia; 2) cuantificaciones específicas relacionadas con el material, como son las propiedades geométricas, morfológicas de un edificio en específico. El modelo debe ser calibrado y validado en comparación con la información empírica y experimental obtenida. El modelo estructural planteado para el análisis de un monumento histórico debe de ser donde deben de

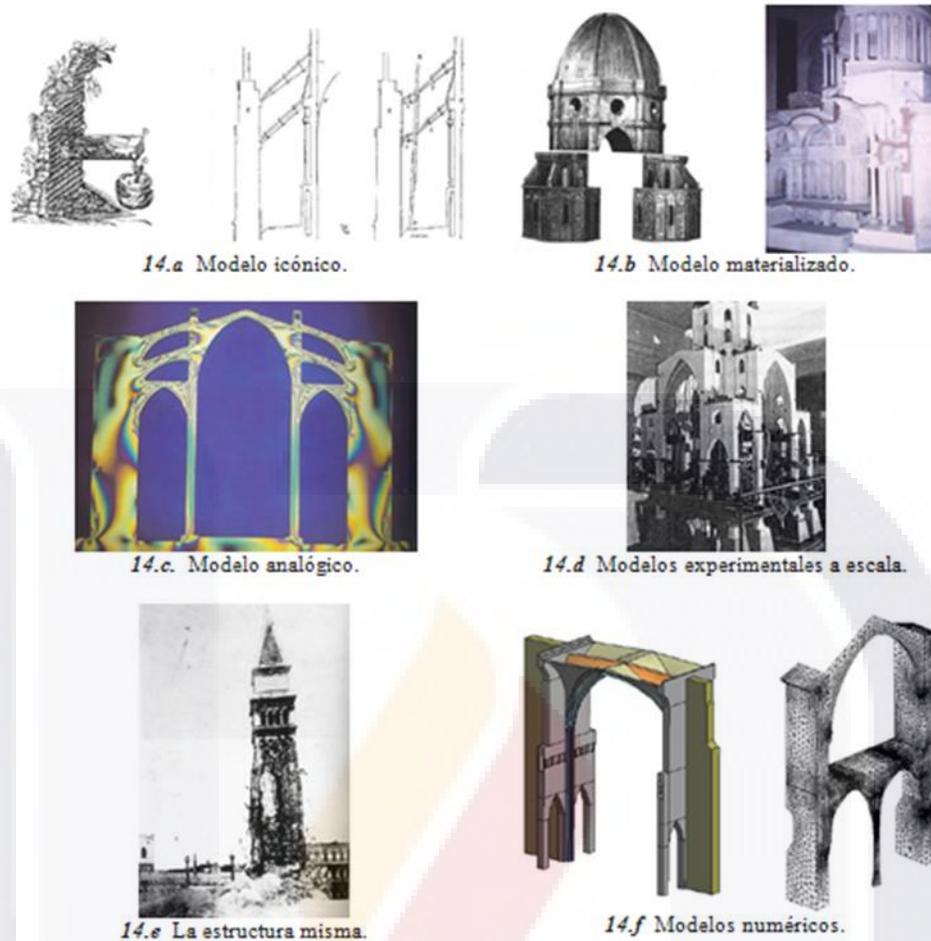


Figura 3.2: Modelos estructurales de construcciones históricas.

encajar completamente todas las hipótesis referentes a su caracterización para comprender su comportamiento real (descripción mecánica, respuesta de esfuerzos, calidad de materiales, geometría, morfología y propiedades específicas de la estructura). El modelo debe de ser calibrado y validado mediante una validación empírica- experimental de la información de la respuesta del edificio. La formulación numérica dependerá de la formulación de: sus componentes, requerimientos y decisiones, análisis de estructuras monumentales, vista de sus aproximaciones en el análisis. Idealmente, la formulación debe proporcionar una descripción objetiva de geometría, materiales (a corto plazo, a largo plazo, cíclico), morfología, conexiones y las acciones (estática, dinámica, cíclica). La simulación de los efectos a vincular con la construcción como son los procesos y las alteraciones posteriores (el análisis secuencial) son

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

también deseables. Sin embargo las formulaciones muy complicadas (involucrar los aspectos anteriores) pueden ser apenas usada debido a: la capacidad de computadoras; los datos que se podrían requerir (por ejemplo; las propiedades materiales) y son muy difíciles de determinar dentro de la práctica profesional, el grado de la validación debido a la falta de resultados experimentales utilizables de referencia y por último, las formulaciones o hipótesis serán elegidas como un compromiso entre el realismo y el costo del análisis (SA2 Lectures at SAHC (UPC), 2012).

El análisis de las construcciones históricas de mampostería es una tarea compleja. Hay una limitada cantidad de recursos destinada al estudio del comportamiento mecánico de la mampostería, que incluye ensayos no destructivos in situ, las pruebas experimentales de laboratorio adecuado y el desarrollo de herramientas numéricas fiables. Sin embargo, las contribuciones significativas se han producido recientemente. Por lo general, los aspectos más destacados son (Lourenco, 2001): i) no se cuentan con los datos de la geometría; ii) falta información sobre el núcleo interno de los elementos estructurales; iii) la caracterización de las propiedades mecánicas de los materiales utilizados es costosa; iv) existe una amplia variabilidad de las propiedades mecánicas, debido a la mano de obra y el uso de materiales naturales; v) cambios significativos en el núcleo de la constitución y de los elementos estructurales, es asociada a largos períodos de construcción; vi) es desconocida la secuencia de la construcción; vii) se desconoce el daño en la estructura existente; viii) los reglamentos y códigos son para no aplicables.

Es preferible usar modelos especializados, las metas específicas de nuestro análisis ser evidentemente mediante modelos seleccionados con cautela. Los siguientes aspectos deben ser considerados cuidadosamente en el modelo a seleccionar (SA2 Lectures at SAHC (UPC), 2012):

- La escala del estudio (local, mediano grande);

- TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS
- El detalle;
 - El alcance del modelo (miembro individual, macro elemento, global);
 - Tipo de campo de descripción del elemento;
 - La habilidad de describir las gradientes de tensiones altas;
 - La inclusión de los efectos geométricos no lineales;
 - Fenómenos de resistencia mecánicos específicos a ser simulados;
 - El riesgo verdadero de proveer los datos requeridos en la práctica;
 - Posibilidad verdadera de validar el modelo.

La formulación elegida deberá de ser la más simple y la de menor costo, pero capaz de realizar todas las simulaciones que se requieran dentro del análisis del comportamiento (SA2 Lectures at SAHC (UPC), 2012).

Para elaborar el modelo de una estructura, ésta se divide en elementos. El comportamiento de cada elemento se representa en forma separada y, posteriormente, se ensambla el modelo de la estructura a partir de ellos. Hay también una gran variedad de tipos de elementos estructurales, desde los muy complejos hasta los muy simples. Los primeros permiten modelar prácticamente cualquier estructura; como ejemplo se tienen los elementos finitos continuos. En otros casos, el ingeniero suele tomar ventaja de características particulares de los elementos estructurales para introducir simplificaciones en el modelo, un ejemplo extensamente usado en estructuras modernas es el elemento viga. Una estrategia de modelado, que ha demostrado ser útil en estructuras de mampostería, es la combinación de elementos bloque,

rígidos o deformables, con elementos interfaz (Orduña, 2007).

Debido a que los edificios históricos son de grandes dimensiones, la atención en la modelización se centrará en la macro modelización de mampostería. En dicha forma de discretización estructural, la intención es no entrar en el comportamiento de interacción entre la piedra y el mortero (Schueremans, 2001). En el macro modelado, se considera que la estructura de mampostería es un continuo con propiedades homogéneas, a ser discretizado con una malla de elementos finitos que no considera su estructura interna. El modelo constitutivo del material equivalente debe entonces poder reproducir el comportamiento global de la estructura (Guzman, 2002). El modelado de macro elementos para construcciones de mampostería, se basa en el ensamblaje de muros de cortante conectados unos con otros y con los respectivos diafragmas de piso. La experiencia muestra que los daños por cortante y vuelco, están localizados generalmente en ciertas zonas de los muros, mientras que otras regiones permanecen casi sin sufrir daños (Bonett, 2007).

Los análisis lineales de la F.E.M. como una primera aproximación enfocados en obtener un progreso hacia la evaluación del riesgo, que no contenga los problemas de convergencia relacionados con los análisis no lineales, se debe de basar en principios lineales que permitan determinar la presencia y la magnitud de los esfuerzos de cortante y de compresión en la estructura de mampostería generada por la carga vertical, así como las propiedades dinámicas tales como las frecuencias naturales y modos de vibración en el análisis moda (Quiroz, 2010). A principios de los 60's, cuando los métodos de elemento finito comenzaban a ser ampliamente utilizados, resultaron en primera instancia ser tan caros que sólo las organizaciones más experimentados eran capaces de utilizarlo eficazmente. Este alto costo se debía principalmente al hecho de que un equipo muy potente se requiere con el fin de manejar los modelos. Análisis modal experimental sufrido mucho el mismo problema ya que no se contaba Fast Fourier Transform moderna (F.F.T.) que podemos resolver fácilmente hoy en día (Ramsey, 1983). Problema que ya no se presenta en la actualidad.

La cuestión principal en el establecimiento del modelo un numérico es el lidiar con la definición de las condiciones de frontera y establecer un modelo representativo del comportamiento real de la mampostería simple, al igual que tomar en cuenta sus condiciones de funcionamiento, entre otros factores a poner atención específica para un modelado cuidadoso del sistema, en términos de la geometría y, por lo tanto, de la masa y la rigidez (Conte, 2011). Un modelo numérico básico generalmente se define bajo los supuestos de conductas de los materiales como lineales y homogéneos. Se recomienda que las propiedades de los materiales sean obtenidas mediante un número mínimo de pruebas de laboratorio de muestras extraídas (en caso que se a posible).

La mampostería es un material complejo de modelar debido a la anisotropía inherente y la variabilidad de las propiedades. Sólo unos pocos autores implementaron modelos no lineales constitutivos que son capaces de considerar diferentes resistencia y capacidad de deformación a lo largo de los ejes de material (Araujo, 2011). La baja ductilidad de los materiales de mampostería, por lo general puede conducir a un comportamiento global bastante frágil, por lo que estas estructuras son particularmente vulnerables a acciones dinámicas (Foti, 2012). La naturaleza inherente de las estructuras de mampostería con su alta capacidad de compresión y casi nula resistencia a la tensión, pone los sistemas de mampostería en una categoría diferente a los materiales de construcción contemporáneos (concreto armado o acero). La capacidad de carga de una estructura de mampostería no reforzada, tal como un monumento histórico, es dependiente de la estabilidad de la geometría en lugar de la fuerza de las unidades de mampostería (Atamturktur, 2008b).

Otro aspecto importante a tomar en cuenta en el modelado numérico mediante el M.E.F., es la dependencia de la solución tanto de la topología de la malla como del tamaño de los elementos de la misma. Respecto al primer punto, una topología deficiente puede impedir capturar los mecanismos de localización. En lo que respecta al tamaño de los elementos de la malla, la solución puede ser altamente dependiente del mismo (Guzman, 2002).

El modelado de una estructura antigua para evaluar su situación actual y prevenir su comportamiento es, La observación directa de la estructura, realizada habitualmente por un equipo cualificado, constituye una fase esencial del estudio; su finalidad reside en proporcionar una comprensión inicial de la estructura que, a su vez, permita enfocar apropiadamente las investigaciones posteriores. Sus objetivos principales son los siguientes (ICOMOS, 2004):

- Identificar el deterioro y los daños;
- Determinar si los fenómenos están o no estabilizados;
- Decidir si hay riesgos inmediatos y por tanto se deben adoptar medidas urgentes;
- Identificar efectos del entorno sobre el edificio.

El análisis lineal-elástico es práctico en tiempo de modelado, sin embargo, tal análisis no da una idea del comportamiento estructural más allá del comienzo de la formación de grietas. El análisis al límite combina, por otro lado, suficiente información sobre los mecanismos de colapso, distribuciones de tensiones finales (al menos en las secciones críticas) y capacidades de carga, otra característica atractiva de análisis límite es el reducido número de parámetros necesarios materiales (en este caso, sólo se necesita el coeficiente de fricción), dadas las dificultades para la obtención de parámetros de los materiales de mampostería (Orduña, 2001). El diseño y la evaluación de los métodos basados en el análisis no lineal puede ser utilizado para la evaluación de estructuras de mampostería (Lourenco, 2011b). Con el fin de evaluar la vulnerabilidad de los edificios, un análisis sofisticado debe llevarse a cabo para capturar su comportamiento no lineal, dichos análisis deben de basarse en gran medida, en la simulación analítica de la construcción real (Chrysostomou, 2013). El método de los elementos finitos es uno de los procedimientos de análisis que se emplea en muchos centros de investigación donde se estudian las estructuras históricas de mampostería. Este método permite emplear relaciones constitutivas no lineales complejas que simulan la respuesta de las estructuras en

ese intervalo (Orduña, 2004b). La no linealidad en el comportamiento del material puede tener su origen en fenómenos de comportamiento plástico, visco elástico, visco plástico o por el desarrollo de agrietamiento, entre otros. La no linealidad geométrica abarca diversos problemas físicos, tales como el desarrollo de desplazamientos y deformaciones finitas o de desplazamientos finitos combinados con deformaciones pequeñas. En la no linealidad de las condiciones naturales y esenciales de frontera, las cargas aplicadas a la estructura y sus condiciones de apoyo, respectivamente, se modifican como resultado de las deformaciones en la misma. En el análisis de problemas lineales, el MEF actualmente domina el escenario, seguido del método de elementos frontera como segunda opción en áreas de aplicación específicas. En problemas no lineales, el dominio del M.E.F. es abrumador (Guzman, 2002).

Un punto importante del modelado de edificios antiguos de mampostería con elementos finitos es la aproximación en los modelos numéricos que se debe emplear para representar la mecánica no-lineal del material, que depende del nivel de detalle que se requiere en el análisis. Un tipo de modelado de estructuras con M.E.F. es el micro-modelado, en donde se discrimina el comportamiento de las unidades sólidas, el mortero de liga y la interfaz entre estos materiales. Este tipo de modelado, al igual que simplificaciones de éste, sólo permite caracterizar el comportamiento de estructuras de mampostería de pequeña magnitud. Otra opción para el análisis, la cual es muy atractiva desde el punto de vista de los ingenieros de la práctica, es la macro-modelado, en la cual se permite una representación simplificada del comportamiento no-lineal de este material, lo que conduce a que los modelos estructurales sean más manejables desde el punto de vista de cómputo y de procesamiento e interpretación de resultados. Esta última opción de modelado presenta un futuro promisorio, proporcionando tecnología asequible a los diseñadores actuales. Se debe resaltar también que este último tipo de modelado es de amplia aplicación en estudios de estructuras complejas las cuales no han seguido regulaciones de diseño, como por ejemplo las estructuras históricas, y que al ser aplicada con conocimiento constituye una herramienta poderosa de análisis para ser utilizada en la verificación de la estabilidad o en el diseño de reforzamiento de estas edificaciones (Orduña, 2004a).

El comportamiento dinámico de estructuras antiguas de mampostería se caracteriza por la presencia y desarrollo de grietas desde niveles bajos de esfuerzo. Este comportamiento no lineal no puede ser estudiado mediante análisis modales y sus mecanismos de disipación de energía son difíciles de evaluar. Sin embargo, para fines de evaluación estructural de estos edificios, a menudo es suficiente conocer las capacidades de carga y mecanismos de falla para direcciones preestablecidas del movimiento sísmico. Un modelo de material rígido-perfectamente plástico, dentro del marco del análisis límite, es capaz de proporcionar estos resultados. El atractivo de este modelo de material es que requiere solamente de parámetros de resistencia, no es necesario evaluar ni rigidez ni parámetros de ablandamiento. En contrapartida, es imposible conocer las deformaciones de la estructura. Los resultados se reducen a la carga última, mecanismo de colapso y esfuerzos en los puntos críticos. Esta información es suficiente para la evaluación estructural de edificios pequeños a medianos, característicos de los centros históricos. La combinación de este modelo de material simplificado con el modelo estructural de bloques rígidos y juntas parece ser adecuado para la evaluación estructural de edificios con estas características (Orduña, 2004a). Es obvio que cuando se plantean bien los modelos analíticos, las características dinámicas suelen ser muy cercanos a los de la construcción real. Esto es una razón de confianza por la exactitud de los modelos de análisis en el rango elástico que por lo tanto pueden ser utilizados como la base para el desarrollo de modelos no lineales (Chrysostomou, 2013).

Las construcciones patrimoniales generalmente son de grandes dimensiones, lo que hace difícil evaluar el estado global de la estructura si los daños están distribuidos indistintamente por todo el edificio. Es por esto que una de las opciones viables sería analizarla por partes. El análisis en partes más pequeñas permite entender más claramente su comportamiento dinámico no-lineal. Además, dividir una construcción reduciría el tamaño de los modelos, el tiempo de solución y simplificaría la interpretación de los resultados. Incluso, se podrían establecer similitudes de comportamiento de partes estructurales del mismo tipo; los cuales tiene la misma conformación, función y/o posición en la iglesia. De esta manera es más fácil relacionar

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

las características individuales de cada parte estructural con el daño observado después de un sismo y se podrían realizar diagnósticos con relativa rapidez, para identificar daños y/o la posibilidad de colapso parcial o total (Meza, 2013).

En la actualidad se cuenta con conocimientos y técnicas avanzadas de análisis que permiten modelar numéricamente, y con gran precisión, el comportamiento de estructuras complejas. Sin embargo, el análisis estructural de edificios históricos de mampostería continúa siendo un desafío debido a una serie de factores. Uno de ellos es la gran heterogeneidad generalmente presente en estas construcciones que dificulta asignar propiedades mecánicas globales al modelo del material. La mampostería es un material compuesto y esto también representa un reto; las características de este tipo de construcciones ha llevado a establecer dos niveles de análisis del comportamiento mecánico de las estructuras: el nivel microscópico y el nivel macroscópico. En el primero se discrimina el comportamiento mecánico de las piezas, de las juntas de mortero y de las interfaces entre ellas. En el segundo nivel de análisis, el estudio se enfoca en el comportamiento de elementos estructurales como muros, arcos y bóvedas, entre otros (Orduña, 2004).

El proceso de intervención de cualquier tipo de estructura debe incluir: la identificación del tipo de falla (levantamiento de daños); el diagnóstico de la seguridad estructural (si el daño es leve, moderado, severo), la propuesta de una o varias técnicas de intervención, y finalmente, se debe realizar una evaluación de la eficiencia del procedimiento de intervención, es decir, si es económica, técnicamente viable, funcional, etc. Así mismo, el proceso de intervención debe garantizar que se obtenga una seguridad adecuada (Peña, 2010).

3.2. S.H.M. mediante el uso de vibraciones

Las metodologías para la realización de pruebas de vibración ambiental se encuentran en desarrollo desde hace muchos años y ha sido aplicadas con éxito en particular en proyectos

de puentes. Se ha demostrado que los resultados de dichas técnicas de supervisión pueden ayudar al ingeniero estructural en el proceso de evaluación, al igual que proporcionar una cuantificación de ciertas propiedades estructurales (Wenzel, 2004).

3.2.1. Sistemas de monitoreo estructural

Un sistema de monitoreo de la salud estructural en tiempo real utilizado en puentes requiere algunos componentes que pueden ser agrupados en tres categorías: a) los instrumentos para medir las vibraciones, b) la adquisición de datos automatizado, y c) la transmisión de datos para su procesamiento y análisis (Kasal, 2010). Los sensores que registran datos sobre las condiciones ambientales y los sensores que registran datos sobre los movimientos estructurales, constituyen la base del monitoreo de la salud estructural. Un sistema de supervisión completa requiere el conocimiento, tanto de la entrada del medio ambiente y la respuesta estructural. El análisis de datos es uno de los pasos más importantes en el monitoreo estructural. Gran parte de los datos recibidos pueden ser difíciles de interpretar para su uso en los cálculos de ingeniería. Afortunadamente, hay muchos métodos disponibles para reducir el ruido de una señal y facilitar la interpretación.

Tradicionalmente, los instrumentos usados son acelerómetros que miden aceleraciones en la estructura, cuyos datos son transmitidos a una ubicación lejana vía Internet o por telemetría para su procesamiento y análisis para conocer el comportamiento del puente. Además los mismos datos pueden ser usados para determinar las características dinámicas del suelo en las inmediaciones del puente. Uno de los beneficios de usar mediciones de vibración de la estructura, es que la información para determinar el comportamiento global del puente puede ser obtenida con rapidez mediante la colocación de pocos sensores. Sin embargo, las mediciones de vibración brindan desafíos en cuanto al procesamiento de datos, particularmente para la detección del daño atribuible a las vibraciones de ruido ambiental, así como a las condiciones climático-ambientales las cuales producen cambios pequeños en la respuesta de la estructura (Kasal, 2010).

3.2.2. Respuesta ante la vibración ambiental

Una excitación ambiental es definida como la excitación experimentada por una estructura bajo sus condiciones operativas normales. Todas las estructuras son sujetas a una excitación ambiental de orígenes tales como el tráfico, el viento, la sismicidad, entre otros. La medición de la vibración (ambiental) que produce la excitación ambiental provee los medios de valorar la respuesta de la estructura ante esta excitación externa (Farrar, et al., 1999). El uso de la vibración ambiental provee unos medios de valorar la respuesta de la estructura para el ambiente de vibración verdadero del interés a menudo. Una desventaja de usar excitación ambiental es que el tipo de entrada es a menudo no estacionario. También, porque el input no es medido no es conocido si esta fuente de excitación provee la entrada en las frecuencias del interés o qué uniforme la entrada es sobre una extensión de frecuencia especial. Incluso cuando las excitaciones medidas son usadas las fuentes de vibración ambientales están a menudo todavía presentes produciendo las contribuciones superfluas no deseadas y a menudo inevitables a la estructura (Farrar, 2006).

Respecto a las pruebas en edificios se pueden definir tres tipos de pruebas en función de la excitación empleada (De la Colina, 2008):

1) Pruebas de vibración libre.

2) Pruebas de vibración ambiental.

3) Pruebas de vibración forzada. En este último caso la excitación se puede inducir de manera artificial como pudiera ser mediante excitadores mecánicos o algún otro dispositivo o de manera natural ante la ocurrencia de un sismo.

En una situación ideal, los cambios experimentalmente observados en la respuesta de vi-

bración son relacionados con las características de daño deseadas directamente, que incluyen la existencia, gravedad, tipo y ubicación del daño. Sin embargo, los intentos de relacionar las mediciones de vibración de dominio de tiempo sin procesar con las características son dificultados por dos factores:

1) La dificultad in monitorear las modas en los datos de medición extra grandes, y;

2) La sensibilidad alta de las mediciones de dominio de tiempo a los factores superfluos causada por las diferencias naturales en las condiciones operacionales y ambientales.

Como consecuencia de estos dos apuros, el procesamiento de datos de las mediciones de respuesta de vibración de dominio de tiempo sin procesar deja necesariamente por extraer las características de respuesta de vibración dimensionales bajas. Idealmente, estos espectros de respuesta de vibración son conscientes del daño, pero insensible a los factores superfluos.

3.2.3. Marco teórico (S.H.M.)

El monitoreo de salud estructural es una tecnología 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, desde 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, dislocaciones 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. Intermedia este contraste, el análisis que debe hacerse a la estructura a partir de la información captada por los sensores.

El proceso de S.H.M. se basa en la observación de un sistema en el tiempo utilizando periódicamente muestras de las mediciones de la respuesta dinámica de un conjunto de sensores, la extracción de las frecuencias características medidas y su análisis estadístico determinará el estado actual del sistema.

La vigilancia de la salud estructural de las estructuras de ingeniería civil puede ser periódica o continua (Dong, 2010):

Seguimiento periódico: El monitoreo periódico se realiza para investigar la respuesta estructural o cualquier cambio perjudicial que pudiera ocurrir en una estructura en el tiempo especificado o intervalos de tiempo (por ejemplo, semanas, meses o años de diferencia). El análisis de los datos de monitoreo puede indicar daño o deterioro. Por ejemplo, el seguimiento a través de las pruebas de campo estático o el movimiento del tráfico, la vigilancia del crecimiento de grietas, el seguimiento antes y después de una reparación, todo se puede hacer de forma periódica. En el seguimiento periódico, sensores pueden ser instalados de forma permanente en la estructura o instalados temporalmente en el momento de la prueba.

Supervisión continua: La monitorización continua, como su nombre indica, se refiere a la vigilancia de una estructura durante un período prolongado de tiempo (semanas, meses o años) sin interrupción. Este tipo de monitoreo sólo recientemente se ha utilizado en aplicaciones de campo a gran escala, debido en parte a los altos costos y la complejidad de dichos sistemas. En el monitoreo continuo, los datos adquiridos en la estructura se recogen una o almacenan en el sitio para su transferencia, análisis e interpretación en un momento posterior, o se comunican de forma continua a un fuera de las instalaciones (ubicación remota). En el más sofisticado de este tipo de aplicaciones de S.H.M., los datos de campo se transmiten de forma remota a la oficina del ingeniero para el monitoreo en tiempo real y la interpretación. Habitualmente, la monitorización continua sólo se aplica a aquellas estructuras que son extremadamente importantes o si existe una duda sobre su integridad estructural. Este último podría ser el caso si la estructura es probable que esté expuesto a eventos extremos, tales

como terremotos y huracanes severos, o si su diseño incluye un innovador concepto que no tiene un historial de rendimiento para demostrar su seguridad a largo plazo.

Vigilancia de la salud estructural es un proceso destinado a proporcionar información precisa y en tiempo en relación con la condición estructural y el rendimiento de manera proactiva. Se compone de (Gajanan, 2011): i) vigilancia permanente continua; ii) vigilancia periódica; y iii) registro periódico continuo de los parámetros representativos, ya sea a corto o largo plazo.

El S.H.M. puede ser considerado como una técnica de vigilancia global de un sistema físico enfocada a la observación, seguimiento y diagnóstico de daño en un sistema estructural (con el objetivo de prever que la integridad y estabilidad de la estructura no llegue a una etapa crítica). Aunque el S.H.M. ha demostrado ser un método prometedor para monitorear sistemas de ingeniería civil modernos de concreto reforzado o acero, la aplicación de esta nueva tecnología para otros sistemas estructurales, como en estructuras de mampostería no reforzada, todavía es una tarea considerada sin resolver (Ventura, et al., 2011).

La premisa de que el daño en un sistema estructural modifica las propiedades dinámicas del mismo (tales como: la masa, la rigidez y el amortiguamiento interno), y dichas propiedades afecten directamente los modos de vibrar del sistema, hace posible plantear teóricamente una relación indirecta entre el daño estructural y los cambios que experimentalmente pueden ser observados en la respuesta de vibración, la metodología del S.H.M. aspira a la detección del inicio del daño, así como la determinación de las características del daño.

En general, los principales objetivos de los métodos de identificación de los daños, son identificar los daños estructurales en una etapa temprana, para proporcionar una estimación de la gravedad de los daños y de predecir vida útil restante de la estructura sin causar daños a la integridad estructural. Estos objetivos condujeron al sistema de clasificación de cuatro niveles presentada por Rytter en 1993:

Nivel 1: Determinación de la presencia de daño.

Nivel 2: Determinación de la ubicación geométrica de los daños.

Nivel 3: El cuantificar de la severidad de los daños.

Nivel 4: Predicción de la vida útil restante de la estructura.

Ancona, en 2010 clasifica el daño por la severidad y la extensión:

Severidad del daño:

a) Daño ligero.- Se consideran grietas que reducen en 10decir, las grietas poseen 0.03 m de profundidad.

b) Daño severo.- Se consideran grietas que reducen en 50decir, las grietas poseen 0.15 m de profundidad.

Extensión del daño:

a) Extensión ligera.- Una sola grieta presente en determinada región.

b) Extensión severa.- Seis grietas presentes en determinada región separadas a 0.25 m entre sí.

En términos matemáticos para dar significado al concepto de daño es necesario recurrir a la comparación entre dos diferentes estados del sistema, uno de ellos (el inicial) será en el que se asume la estructura sin daño (Atienza, 2004).

El E.E.R.I. (Earthquake Engineering Research Institute, con sus siglas en inglés), establece cinco niveles de daño. Esta clasificación se basa en el nivel de daños, el tiempo necesario para la reparación, y el riesgo para los habitantes del edificio:

1) No hay daños.

2) Daños menores: Daños menores en los elementos no estructurales. La estructura será utilizable en menos de una semana.

3) Daños moderados: Daños considerables en los elementos no estructurales. La estructura no podrá utilizarse hasta por un período de tres meses. El riesgo de pérdida de vidas humanas es mínimo.

4) Daño severo: Daño estructural grave. La estructura puede no ser utilizable para un largo periodo de tiempo. A medida que la opción final, la estructura puede ser demolido. El riesgo de la pérdida de vidas humanas es alta.

5) Colapso total o daños muy graves: Daños en la estructura es irreparable. El riesgo de pérdida de vidas humanas es muy alta.

Las clasificaciones antes mencionadas son sólo algunas de las muchas clasificaciones existentes, que varían de acuerdo con el nivel de complejidad y el método utilizado. Este estudio sólo intentos de mostrar la importancia de la evaluación de una estructura después de un evento extremo tiene producido, en particular en el caso de un sismo (Garcés, 2008).

Un sistema de S.H.M. utiliza las técnicas o pruebas no destructivas para proporcionar información continua (o bajo demanda) sobre el estado de una estructura, de modo que una evaluación de la integridad estructural se puede hacer en cualquier momento, y las medidas

correctivas se pueden tomar cuando sean necesarias. La información proveniente de sensores se incorpora en el análisis estructural y modelos matemáticos para evaluar el estado de la estructura y para predecir su vida útil. Así, el concepto subyacente se basa en la detección y caracterización del daño y evalúa las condiciones operacionales de la estructura (Achenbach, 2008).

El objetivo de S.H.M. es el monitorear el comportamiento in situ de una estructura precisa y eficientemente, para evaluar su rendimiento bajo diversas cargas de servicio, para detectar daños o deterioro, y para determinar la salud o el estado de la estructura. El sistema S.H.M. debería ser capaz de proporcionar, a petición, la información fiable relativa a la seguridad y la integridad de la estructura. La información puede ser incorporada en el mantenimiento de estructuras para la mejora de sus directrices de mantenimiento (Gajanan, 2011).

Para poder detectar daño en estructuras, adicional a las inspecciones visuales, es necesario realizar pruebas y clasificarlas en: Destructivas y No Destructivas. Las primeras son donde la estructura es destruida (parcialmente) o dañada; las segundas se basan en el uso de equipamientos que mantendrán intacta a la estructura, como son: ultrasonido, rayos-x, campos electromagnéticos, etc. El estudio experimental de una estructura proporciona una visión del comportamiento real del sistema. En particular, el estudio de su respuesta dinámica, explotando fenómenos de vibración, tiene como objetivo determinar las propiedades dinámicas estrechamente conectadas con las características geométricas y mecánicas del sistema. Por lo tanto, algunos conceptos de dinámica estructural se resumirán brevemente. Se supone que el lector ha tenido cierta exposición a la materia (Pau, 2005).

Los métodos no destructivos se clasifican en métodos locales y globales:

a) Los métodos locales inspeccionan la estructura en un área relativamente pequeña mediante el uso de ondas de ultrasonido, radiografías, campos electromagnéticos, etc. Estos métodos son muy sensibles y capaces de detectar daños aunque no es posible utilizarlos en

lugares de difícil acceso (Molina, 2012).

b) Los métodos globales utilizan el hecho de que el daño en un punto específico provoca una reducción de la rigidez en ese lugar lo que tiene una influencia en el comportamiento global de toda la estructura en términos de tiempo y espacio. Por ejemplo, la reducción de la rigidez provoca una disminución de las frecuencias propias. Estos métodos, basados en las vibraciones de baja frecuencia, vigilan todo el sistema observando cambios en las frecuencias de resonancia, el aumento de la amortiguamiento o cambios en los modos de vibración por mencionar algunos parámetros dinámicos. Estos cambios se usan como las características extraídas de la información en bruto y permiten distinguir entre los estados sin daños y dañados de la estructura (Molina, 2012). Los métodos de Ensayos No Destructivos se basan en la aplicación de fenómenos físicos tales como ondas electromagnéticas, acústicas, elásticas, emisión de partículas subatómicas, capilaridad, absorción y cualquier prueba que no implique un daño considerable al cuerpo examinado (Filoni, 2012).

Los métodos locales necesitan un conocimiento a priori de la localización del daño, además que la sección estructural que se va a revisar sea accesible para el operador encargado de la revisión visual (Avendaño, 2009). Para realizar un estudio de detección de daños, se propone realizar previamente un modelo matemático que represente el comportamiento dinámico de la misma, además de una fase experimental en la que se obtenga la respuesta dinámica real de la estructura.

El monitoreo de la salud estructural se define como un proceso cuyo objetivo es recabar información acerca de la condición y comportamiento de una estructura a través del tiempo. Este proceso consiste en la continua recopilación de los parámetros más representativos que indican el comportamiento de una estructura.

Debido a que el monitoreo de la salud estructural depende de las características de vibración globales de la estructura, la ubicación de las mediciones no necesita coincidir con la

ubicación de las zonas o elementos dañados. El daño estructural causa una reducción local de la rigidez en las inmediaciones del daño, lo cual a su vez causa una reducción a la rigidez global de la estructura. Para una detección eficiente del daño, los cambios en las propiedades globales deben ser suficientemente altos para que puedan ser evidenciados por los cambios en la forma de vibrar de la estructura ante los niveles de ruido ambiental que generalmente son muy bajos (Prabhu, 2011).

Generalmente un sistema típico de monitoreo de salud estructural, mejor conocido como Structural Health Monitoring (S.H.M.) incluye tres componentes principales: un sistema de sensores, un sistema informático (incluyendo adquisición de datos y almacenaje) y un sistema de evaluación de salud estructural (algoritmos de diagnóstico) (Sotelo y Acevedo, 2009).

De forma general, se puede decir que el SHM puede ser aplicado a los siguientes casos (Brownjohn, 2011a):

- 1) Modificaciones de una estructura ya existente.
- 2) Monitoreo del estado de una estructura afectada por cargas externas.
- 3) Monitoreo del estado de una estructura en procesos de demolición.
- 4) Valoración estructural de sistemas sujetos durante largo tiempo a movimientos o a degradación de materiales.
- 5) Mejoramiento del diseño estructural basado en adquisición de datos.
- 6) Valoración de fenómenos de fatiga en materiales.
- 7) Desarrollo de nuevos sistemas de construcción.

8) Valoración de la integridad estructural después de fuertes incidencias dinámicas, tales como terremotos.

9) Desarrollo de esquemas de diseño basado en desempeño estructural.

En efecto, el S.H.M. según Balageas en 2006:

a) Permite una utilización óptima de la estructura, con un mínimo tiempo de inactividad, y el evitar fallos catastróficos.

b) Da al constructor una mejora en sus productos.

c) Cambiar la organización del trabajo de los servicios de mantenimiento: i) por el objetivo de reemplazar los programas y la inspección de mantenimientos periódicos por el mantenimiento basada en el rendimiento (a largo plazo) o por lo menos (a corto plazo) mediante la reducción de la actual mano de obra de mantenimiento, en particular, evitando partes desmontaje donde no hay vicio oculto, ii) minimizar drásticamente la participación humana, y por lo tanto reduce el trabajo, el tiempo de actividad y los errores humanos, y mejorar así la seguridad y fiabilidad de la estructura.

Después de eventos extremos (como los terremotos o explosiones) y campañas de mantenimiento, es posible usar el S.H.M. para la detección de los cambios dinámicos de las estructuras, siendo permisible contar en tiempo real, con información fiable sobre los cambios ocurridos que puedan afectar la integridad de la estructura (Molina, 2012).

En términos generales, un sistema de monitoreo de salud estructural consta de tres partes:

1) Instrumentación y sensorización: La instrumentación de edificaciones es un tema que

tiene una gran cantidad de aplicaciones dentro de los que se encuentran la comprensión de las teorías de la dinámica de estructuras, la evaluación de los diseños sísmicos de una estructura, la valoración de edificaciones después de la ocurrencia de sismos, la comprensión del comportamiento de estructuras sometidas a cargas dinámicas constantes como el viento o la acción de maquinaria, entre otros (Henao, 2013). Para instalar los acelerómetros se deben utilizar áreas lo más retiradas posible de equipos mecánicos o de personas ya que cualquier movimiento de los sensores con respecto al edificio altera tanto el contenido energético como el espectro de frecuencias de la señal y, por lo tanto puede también distorsionar los resultados (Instrumentación, 2002).

2) Obtención y almacenamiento de datos: Un tipo de aparatos utilizados en la instrumentación de edificaciones son los acelerómetros, que como su nombre lo indica registran valores de aceleración de la estructura instrumentada. Además es posible utilizar varios tipos diferentes de sensores, como medidores de desplazamiento, de temperatura, entre otros.

3) Análisis e interpretación de datos: Para el análisis de los datos se debe calcular el espectro de respuesta de la velocidad de desplazamiento en las componentes longitudinales y transversales. El cálculo del espectro de amplitud para cada componente permite determinar el período natural del movimiento para cada dirección y el coeficiente de amortiguamiento.

Un sistema de monitoreo de la salud estructural en tiempo real para un puente requiere algunos componentes que pueden ser agrupados en tres categorías: a) los instrumentos para medir las vibraciones, b) la adquisición de datos automatizado, y c) la transmisión de datos para su procesamiento y análisis (Kasal, 2010).

Las actividades fundamentales del monitoreo estructural (figura 15), según (Branko, et al., 2007), son:

Según Ancona en 2010, el monitoreo de vibraciones presenta ventajas importantes sobre

Estrategia de monitoreo	Instalación del sistema de monitoreo	Mantenimiento del sistema de monitoreo	Manejo de los datos	Cierre de actividades
Objetivo del monitoreo	Instalación de los sensores	Proporcionar el suministro eléctrico	Ejecución de las mediciones	Interrupción del monitoreo
Selección de los parámetros a monitorear	Instalación de accesorios	Proporcionar líneas de comunicación	Almacenamiento de los datos	Retiro del sistema de monitoreo
Selección del equipo	Instalación de las unidades de lectura	Ejecución de planes de mantenimiento para diferentes dispositivos	Proporcionar acceso a los datos	Almacenamiento del equipo de monitoreo
Establecer los puntos de medición	Instalación del software	Reparación y reemplazo de elementos descompuestos	Visualización	
Determinar el calendario de monitoreo	Interacción con los usuarios		Salida de datos	
Aprovechamiento de los datos			Interpretación de los datos	
Costos			Análisis de datos	
			Uso de los datos	

Figura 3.3: Actividades fundamentales del monitoreo estructural.

los otros métodos de detección de daño no destructivos:

- a) Se puede obtener un estado global de la estructura aun en condiciones de difícil acceso o instrumentación.
- b) No se interrumpe el servicio cotidiano.
- c) No es necesario conocer a priori la localización del daño.
- d) No es necesario que los sensores de medición se localicen en la vecindad del daño.
- e) Un número reducido de sensores puede detectar, localizar y cuantificar el daño adecuadamente.

La función de la instrumentación y sensorización es obtener mediciones acerca del comportamiento dinámico de la estructura empleando varios tipos de sensores y sistemas de adquisición de datos. En este punto, se deben tener en cuenta los siguientes aspectos:

- TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS
- a) Tipos de sensores a emplear.
 - b) Cantidad y localización de sensores.
 - c) Frecuencia de muestreo.
 - d) Conocimiento preliminar de las técnicas de procesamiento de datos a emplear.
 - e) Tipo de medición.
 - f) Conocimiento del tipo de excitación.

Las consideraciones típicas la obtención y almacenamiento de datos son:

- a) Tipo de red de sensores.
- b) Dispositivos en las redes de sensores.
- c) Dispositivos para comunicación remota.
- d) Método de almacenamiento de datos.
- e) Frecuencia del almacenamiento de datos.

En el análisis e interpretación de datos deben realizarse tres tareas:

- a) Identificación del sistema: puede llevarse a cabo a través de numerosas aproximaciones: identificación paramétrica/no paramétrica, lineal/no lineal, discreta/continua, determi-

nista/estocástica, entre otras.

b) Detección de cambios en el sistema monitoreado.

c) Interpretación del daño y formulación de las estrategias de corrección y prevención.

La observación y recopilación de parámetros puede realizarse tanto de forma local como de forma global. Se refiere un monitoreo en forma local, a la observación del comportamiento de un material en específico, y un monitoreo en forma global a la observación de la estructura en conjunto. El uso del monitoreo en forma local o global dependerá del tipo de estructura. Normalmente estructuras innovadoras que implementen nuevos materiales de construcción requerirán un monitoreo local, mientras que estructuras convencionales así como construcciones antiguas, requieran un monitoreo global.

a) Los métodos locales permiten conocer las propiedades mecánicas o físicas del material constitutivo de la estructura, de manera puntual, estos métodos requieren de accesibilidad a la zona que se desea inspeccionar y evidentemente, la cobertura es limitada (Arceo, 2013).

b) El hecho de que estos métodos tengan un carácter global, implica que la instrumentación que utilizan para la evaluación estructural, sea distribuida por toda la estructura y que la información que se obtiene de ésta, únicamente tenga sentido si se analiza en su conjunto (Arceo, 2013). Los métodos globales, son técnicas que proporcionan información sobre la condición general de una estructura, sin que necesariamente determinen o localicen el daño, pero son capaces de proporcionar una calificación global de la integridad estructural.

La mayoría de los métodos globales evalúa la integridad estructural a través de mediciones dinámicas. Estos métodos se fundamentan en la interpretación de las variaciones en los parámetros modales como son las frecuencias, las formas modales y los factores de amortiguamiento que, a su vez, son manifestación de algún cambio en una variable física de la

estructura, como puede ser la masa, la rigidez o el amortiguamiento. En un principio, la evolución de daño a través de este tipo de análisis se realiza en forma cuantitativa buscando establecer correlaciones entre los valores medidos y los niveles de daño conocidos (Arceo, 2013).

Los S.H.M. incluyen técnicas locales y globales, para este último proceso de detección del daño se requiere:

a) Excitar la estructura: bien sea de manera artificial (mediante impacto) o de manera natural (ruido, viento, terremoto).

b) Procesar las señales adquiridas: introduciendo variables características que sean sensibles a los mecanismos de daños esperados.

c) Introducir y aplicar algoritmos para la identificación del daño a partir de las variables características.

Un aspecto clave de cualquier algoritmo es la evaluación de su validez. La robustez de un algoritmo está destinado a describir la capacidad del algoritmo para identificar daños en una variedad de situaciones, que puede incluir (Ventura, 2010):

a) Una variedad de tipos de daño y niveles.

b) Una variedad de contaminación de los datos.

c) Una variedad de modos de instrumentación.

d) La variación de los niveles de excitación de la estructura.

e) La variación de las condiciones ambientales.

f) Una variedad de tipos de carga, es decir, viento, sísmicas, colisión, etc.

Además de los trabajos sobre la evaluación de los algoritmos, ha demostrado que la combinación de varios algoritmos juntos mejora la robustez del proceso global, por lo tanto, mejorar la eficacia del sistema S.H.M.

Según Zuluanga en 2012, son tres los pilares básicos sobre los que se debe asentar una técnica de S.H.M. eficiente, teniendo la cuenta que el fallo de uno inducida el fallo total de la técnica estos son:

- 1) Medidas precisas de los datos.
- 2) Manejar un modelo físico-matemático de referencia que se obtiene adaptando el modelo numérico inicial del problema a los datos disponibles en una base de estructuras no dañadas.
- 3) Usar algoritmos eficientes para extraer parámetros de daño usando tanto los datos medidos como los del modelo numérico.

Dependiendo de los datos obtenidos, pueden estar asociados a cambios diversos como: degradación de los materiales, deterioro, corrosión, fatiga, reacciones químicas, humedad, cambios en las variables del ambiente, así como a las propiedades físicas relativas a las condiciones de carga, esfuerzos, desplazamientos, deformaciones, aceleraciones, agrietamiento, vibraciones y factores que sean necesarios para la evaluación operacional de la estructura (Achenbach, 2008). De acuerdo con las técnicas habituales de monitorización estructural, una pequeña cantidad de daños se debe esperar entre dos sensores. Por lo tanto, en el problema de detección, las cantidades desconocidas son generalmente muy limitados en número, como son la ubicación y rigidez reducciones de secciones dañadas (Pau, 2005).

Una prueba dinámica es un método de prueba ampliamente aceptado para caracterizar una estructura y sus componentes sometidos a cargas variables en el tiempo. La estructura es excitada a frecuencias variadas para determinar la carga de prueba, características de amortiguamiento, módulo dinámico, forma de modo, etc. La interpretación apropiada de la observación de la prueba, el efecto de acoplamiento entre el movimiento de apoyo y la estructura debe ser cuidadosamente analizada (Kumar, 2008).

Las pruebas dinámicas experimentales consisten en realizar mediciones del comportamiento de las estructuras (en cuanto a parámetros de desplazamiento, velocidad y aceleración) sometidas a diferentes tipos de excitaciones con el fin de determinar directa o indirectamente los parámetros dinámicos de las mismas, como lo son entre otros: frecuencias dominantes, modos de vibración y amortiguamiento. Este tipo de pruebas consiste en medir las vibraciones de las estructuras producidas por excitaciones de carácter ambiental, como lo son las producidas por el tránsito de los vehículos y el viento (Henaó, 2013). Los datos vibracionales en tienen un gran rango de uso práctico ya que la caracterización e interpretación de la señal de vibración es suficiente para observar el comportamiento de una elemento estructural.

La determinación de los parámetros experimentales de una estructura se basa en la utilización de la información obtenida por los sensores que miden las aceleraciones, velocidades y desplazamientos como respuesta estructural ante la vibración ambiental (desde aquellas que son imperceptibles al ser humano, pasando por vibraciones debido al uso u operación, hasta terremotos de gran magnitud). Definir los "parámetros dinámicos" corresponde a la primera etapa del monitoreo. Sin embargo, estudiar su variación resulta igualmente importante al momento de determinar si la estructura ha sufrido modificaciones o daño (Boroscheck, 2010). Para la realización de este tipo de pruebas se requiere contar con instrumentos que posean la adecuada resolución debido a lo bajo de las amplitudes registradas y su mayor dificultad radica en la determinación de la fuente (y por consiguiente la señal) de excitación del sistema. Su gran ventaja consiste en que es un tipo de pruebas que se puede realizar en cualquier

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

momento y a estructuras reales sin requerir instrumentación permanente. Su limitante es que sólo se obtienen datos representativos de la respuesta ante sollicitaciones de muy baja intensidad (Henaó, 2013).

El comportamiento dinámico de un edificio, depende de las características estructurales y de las características del movimiento del suelo en donde yace la estructura, teniendo cada edificio un período natural de vibración que depende de las características de las estructuras. Cada emplazamiento, donde algunos edificios han sido construidos, tiene un período predominante que depende de las condiciones más superficiales, como la rigidez y la profundidad de la capa superior del suelo (Cuadra, 2007).

Desde el punto de vista del cálculo numérico, obtener la respuesta dinámica de una estructura, es el resultado de "filtrar" la señal de excitación a través de la misma estructura y obtener las variaciones de las magnitudes de análisis (desplazamientos, velocidades, aceleraciones, momentos, tensiones, etc.) respecto del tiempo (Casano, 2009).

Actualmente existen tres tipos de pruebas experimentales para determinar las características dinámicas de las estructuras en escala real. Una de ellas basada en vibraciones del tránsito de vehículos, del empuje del viento y del uso de la estructura, denominada prueba de vibración ambiental (P.V.A.). Otra metodología son las pruebas de vibración forzada (P.V.F.), en la cual la estructura es excitada por una vibración constante con uno o más motores de vibración que tienen un control de velocidad preciso. Otro método, denominado prueba con registros sísmicos (P.R.S.), consiste en registrar por medio de acelerógrafos los movimientos provocados por los sismos (Wilmer, 2009).

Para determinar el comportamiento dinámico de los edificios se utiliza el ruido ambiental como fuente de excitación (movimiento del terreno, viento, actividad en el edificio, etc.) En la azotea del edificio, el movimiento de translación, separado en sus componentes longitudinal y transversal es, por lo general, predominante en el movimiento del edificio debido a la

excitación ambiental (Cuadra, 2007).

El objetivo de la extracción de características estructurales obtenidas experimentalmente es condensar los datos recogidos por el proceso de medición en una forma adecuada para su posterior análisis y procesamiento, pero con una pérdida mínima en la información de interés debido a la gran cantidad de datos que se manejan. Típicamente, esto equivale a una reducción de la dimensionalidad o el número de grados de libertad en los datos a través de una representación parametrizada de una u otra forma. La descomposición de las señales medidas es una combinación lineal de funciones a base elecciones de las señales de interés que representan todos los parámetros (Chakraborty, 2008).

Una excitación ambiental es definida como la excitación experimentada por una estructura bajo sus condiciones operativas normales. Todas las estructuras son sujetas a una excitación ambiental de orígenes tales como el tráfico, el viento, la sismicidad, entre otros. La medición de la vibración (vibración ambiental) que produce la excitación ambiental provee los medios de valorar la respuesta de la estructura ante esta excitación externa (Farrar, 2006).

Para estimar los periodos de vibración de estructuras es posible utilizar dos técnicas de identificación (Wilmer, 2009):

a) Técnicas no paramétricas que consisten en determinar las características del sistema estructural con base en análisis espectrales convencionales de pruebas de vibración ambiental.

b) Técnicas paramétricas donde se establece un modelo numérico simplificado y se estiman los valores de los parámetros estructurales necesarios para producir una buena correlación entre la respuesta medida y la calculada.

Extracción de propiedades dinámicas utilizando mediciones de vibraciones ambientales requiere técnicas especiales de procesamiento de datos, para hacer frente a amplitudes rela-

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

tivamente pequeñas de las vibraciones ambientales contaminadas con ruidos sin el conocimiento de las fuerzas de entrada. En este estudio, la cosecha pico, el decremento al azar, y los métodos de descomposición de dominio de frecuencia se han utilizado para el procesamiento de datos de vibración ambiental (Kie, 2001).

Una desventaja de usar vibración ambiental es que el tipo de entrada es a menudo no estacionario (las características del mismo varían con el tiempo), y que se desconoce la contribución de cada causante particular de la excitación ambiental, además de que las fuentes de vibración ambiental producen contribuciones adicionales que son superfluas (que no son necesarias o están de más) las cuales son una fuente inevitable de contribución de ruido ambiental adicional a los datos que se miden en la estructura (Farrar, 2006).

La fuerza de entrada desconocida se modela con una serie de términos sinusoidales más una constante. Las amplitudes y frecuencias de cada término se toman como parámetros de fuerza desconocida que se identificaran en el problema inverso. Una ventaja de este método es que tan pocas como una medición de la respuesta dinámica de la estructura se necesita en el análisis inverso. Sin embargo, se emplea un proceso relativamente complicado .^{en} dos etapas.^{en} el que los parámetros físicos y de excitación de entrada son por separadamente identificados en etapas hasta que los dos de ellos satisfagan sus criterios de convergencia. Por otra parte, el modelo de fuerzas con términos sinusoidales no es apropiado en el modelado de la forma general de la excitación, como excitaciones ambientales aleatorias.

Para la obtención de las propiedades modales del modelo matemático existen una gran variedad de algoritmos y técnicas de extracción de dichos parámetros, aplicables a modelos de Elementos Finitos. Al utilizar estas propiedades dinámicas obtenidas analíticamente (predicción) y compararlas con las mediciones experimentales de la estructura (realidad), se llama "Sintonización de Modelos"(Güemes, 2003).

Los parámetros modales más comunes son:

a) Período de vibrar: Corresponde al tiempo en que la estructura demora en oscilar de un lado a otro, para una cierta forma de vibrar. En general las estructuras poseen más de una forma de vibrar, por lo que se mide para cada una de ellas un período asociado. Al valor inverso del período se le denomina frecuencia.

b) Amortiguamiento: Las estructuras están sujetas a recibir sollicitaciones de todo tipo. Estas sollicitaciones pueden traducirse en que la estructura está constantemente recibiendo energía. El amortiguamiento corresponde a la capacidad de la estructura para disipar esta energía. Se mide como porcentaje respecto de un parámetro denominado amortiguamiento crítico.

c) Formas modales: Son las formas en que se mueve una estructura cuando es sometida a vibraciones en uno de sus períodos naturales de vibrar.

Los cambios que sufren los parámetros modales pueden diferir para cada modo, debido a que estos cambios dependen de la naturaleza, localización y a la severidad del daño (Anaya y Barajas, 2011).

La de frecuencia de la entrada predefinida es otro parámetro que debe ser cuidadosamente elegido en función de los tamaños de defectos. Cuando los tamaños de defectos son más grandes en comparación con la dimensión de la estructura, a continuación, incluso la carga estática es suficiente, obviamente. Sin embargo, tales defectos serán visibles a simple vista y, como tales técnicas S.H.M. no se necesitaría. Sin embargo, si los tamaños de defectos son razonablemente pequeño comparados a la dimensión de la estructura, a continuación, uno requiere que el predefinida carga de entrada sea de naturaleza dinámica y el contenido de frecuencia puede ser de la orden de unos cientos de Hertz (Gopalakrishnan, 2010).

Para poder comparar los resultados del modelo de elementos finitos con los del ensayo

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

es necesario manejar modelos de tamaño reducido, muy inferiores a los modelos de desarrollo. Para esta tarea se utilizan las técnicas de reducción de modelos de elementos finitos (Molina, 2012). Tarea en el proceso de análisis que con palabras más sencillas podremos entender como "Simplificación del modelo". Debido a la importancia y complejidad estructural es conveniente realizar modelos discretizados de la forma más fácil de analizar, como recomiendan varios autores: "Keep it simple"(Roca, et al., 2010).

Mientras que la técnica usual de diseño dinámico involucra el método de los elementos finitos para el análisis de vibraciones, para obtenerse las características dinámicas principales, asociadas a su rigidez y distribución de masas. Deben compararse varias propuestas del modelo estructural discretizado hasta encontrar el más adecuado que describa la construcción (Gonzales, 2009).

El objeto principal de un análisis modal experimental es obtener los parámetros modales que caracterizan al sistema dinámico, estos parámetros, se pueden tomar a través de una serie de medidas, almacenadas de forma discreta, en los diferentes dominios (tiempo y/o frecuencia). Estas medidas se pueden procesar una a una, o bien, en grupos parciales o completos de manera simultánea. En cuanto a la forma de obtener la respuesta dinámica existen varias formas de excitación del sistema, típicamente se utilizan fuerzas excitadoras en diferentes puntos del sistema y se miden las señales de estas fuerzas, así como las respuestas vibratorias del sistema producidas en otros puntos (Molina, 2012).

El análisis modal experimental es el proceso para obtener los parámetros modales por medio de un método experimental (Avitabile, 2000; Schwarz, 1999). Estos parámetros modales pueden ser determinados por métodos analíticos como Análisis de Elemento Finito (Molina, 2012).

El problema de identificación consiste en encontrar las propiedades dinámicas de un sistema, conociendo las señales de entrada y las señales de salida en diferentes puntos de éste.

De las diferentes metodologías existentes para identificación de sistemas, se seleccionó la metodología modal en el dominio de la frecuencia, que se basa en el ajuste de la función de respuesta modal de la estructura en el dominio de la frecuencia. Esta metodología permite concentrarse en zonas o ventanas del espectro en las cuales se espera una mayor participación de la respuesta de la estructura y por lo tanto se puede realizar una identificación de parámetros más clara alejada del ruido inherente, en las muy bajas o muy altas frecuencias, de las señales registradas (Leidin, 2008).

En ingeniería, el proceso de identificación de sistema se puede describir como la identificación de las propiedades de los modelos matemáticos que aspiran a representar el comportamiento dinámico de los sistemas que utilizan los datos experimentales. El propósito y las herramientas de identificación del sistema dependen en gran medida de las aplicaciones para las que se solicita el modelo. En ingeniería civil, el objetivo de la identificación del sistema es obtener modelos estructurales de edificios y puentes que se pueden utilizar para una predicción precisa de la respuesta estructural a las excitaciones futuras o con fines de detección de daños. En aplicaciones mecánicas y aeroespaciales, de identificación del sistema proporciona a los ingenieros de control con una herramienta de valor incalculable para el diseño de sistemas de control adecuados. Debido a una amplia gama de aplicaciones, es razonable esperar que haya modelos que serán los más adecuados para ciertas aplicaciones que para otras. Como un ejemplo, una estructura puede modelarse como un modelo de espacio de estado de primer orden, con el fin de predecir su respuesta a excitaciones futuros o de diseño de un sistema de control de vibración, o como un significado físico de segundo orden como: la masa, el amortiguamiento y la rigidez del modelo para la evaluación de daños.

Procedimiento del análisis modal experimental según (Molina, 2012), para maximizar la detección de daño:

- 1) Agrupar señales, asignar ventanas y filtrar las señales.

2) Calcular las funciones de transferencia F.F.T.

3) Calcular las funciones ordinarias de coherencia.

4) Calcular la curva n funciones de transferencia para expresar y extraer: Residuos, Frecuencias Naturales, Factor de Amortiguamiento y Matriz Modal.

5) Calcular: Matriz de Masa, Rigideces y Amortiguamiento.

6) Calcular el sistema modal.

Se requieren modelos matemáticos adecuados para un determinar la ubicación del daño y su magnitud. Los modelos de uso más común son realizados por medio del método de diferencias finitas (F.D.M.), del método de elementos finitos (F.E.M.), métodos espectrales de elementos finitos (S.F.E.M.) y del método de los elementos de contorno (B.E.M.). Entre ellos, F.E.M. es el método más versátil y potente debido a su capacidad para modelar geometrías complejas (Gopalakrishnan, 2010). La creación de un modelo numérico implica necesariamente el desratizar de las leyes físicas continuas, que se manifiestan en el elemento. El posible error de desratizar que podría surgir de este proceso limita la capacidad del modelo para reflejar con exactitud la física del verdadero sistema. A medida que se busca realizar un modelo con el mayor acercamiento a la realidad, el orden del modelo aumentará, y la convergencia de su solución será más complicada (James, 2011).

El Método de los Elementos Finitos (F.E.M., con sus siglas en inglés), ha demostrado ser una excelente herramienta en la obtención de soluciones aproximadas para problemas en los que su resolución por métodos tradicionales resulta muy complicada y costosa.

F.E.M. es una técnica numérica potente por su manera de resolver los problemas, que se rigen ecuaciones diferenciales parciales sobre dominios complejos. Normalmente se adoptó pa-

ra resolver problemas hacia adelante en las estructuras, es decir, para una determinada carga (de entrada), se puede fácilmente determinar las deformaciones (salida). El monitoreo de la salud estructural, sin embargo, requiere estimar el estado de la estructura en base de la medida de salida (deformación, velocidades, aceleraciones, tensiones, etc.) para una predefinida entrada (fuerza). Por lo tanto, S.H.M. cae bajo el ámbito de sistema problema de identificación. Este tipo de problemas también se llaman los problemas inversos (Gopalakrishnan, 2010).

Incertidumbres surgen con respecto al modelado de cualquier sistema, ya que algunos parámetros físicos que rigen la respuesta del modelo se limitan a los valores teóricos. Los valores óptimos para los modelos se deben determinar a fin de minimizar la diferencia entre la medición y estimación cantidades de respuesta (Pau, 2005).

La parte más importante en la aplicación de los métodos de detección de daño es la calibración dinámica del modelo de elemento finito. Si no hay una calibración adecuada del modelo de elemento finito, es imposible que cualquier método de detección de daño de resulte satisfactorio debido a que los resultados discrepan; como consecuencia, es la parte donde se requiere mayor precisión y por lo mismo, consume mucho tiempo para su finalización.

En resumen, se proponen los siguientes pasos para la calibración dinámica de una estructura son:

- a) Análisis de convergencia del modelo de elemento finito.
- b) Selección de los elementos para el modelo físico.
- c) Análisis de los parámetros estructurales.
- d) Caracterización de parámetros estructurales.

e) Validación del modelo de elemento finito.

Para elaborarse correctamente un estudio se debe de tomar en cuenta los siguientes puntos, según diversos autores:

Formulación del problema y plan de estudio: Hay que definir de manera correcta los objetivos, detalles específicos que se quieren cubrir y los criterios de evaluación.

Recolección de datos y definición del modelo: La Información y los datos deben de ser guardados a la medida de lo posible para ser usados en la determinación de aspectos operativos y de las distribuciones de las variables aleatorias usadas en el modelo.

Las propiedades estructurales locales se deben de comprobar por si existe un daño local o si un miembro estructural se expone a condiciones especiales o adversas. En el ámbito de la supervisión, si los valores de referencia definidos se sobrepasan, se necesitan más pruebas detalladas. Ejemplos de monitorización de parámetros estructurales locales son (Wenzel y Pichler, 2005), entre otros:

- 1) El progreso de la longitud y la anchura de las grietas individuales conocidas.
- 2) La observación de áreas de estructura susceptibles a las grietas.
- 3) La observación de los puntos débiles conocidos.
- 4) La medición de la extensión en puntos con una alta concentración de la tensión.
- 5) La medición de las flexiones y amplitudes de vibración de los elementos estructurales.

A medida que el cambio estructural de los miembros individuales a menudo sólo tiene

representación local, el éxito de la vigilancia de la salud depende de la correcta disposición de los puntos de medición.

Diseño de experimentos: Hay que decidir que diseños del sistema se simularan y en cada caso hay que decidir sobre el tiempo de corrida de la simulación, las condiciones iniciales, la longitud del estado transitorio, y el número de replicas.

Documentación, presentación e implementación de los resultados: Es importante documentar los supuestos realizados así como el programa mismo.

Para la calibración sistemática de un modelo F.E.M. se propone una serie de pasos, para disminuir el tiempo y optimizar el proceso. En este caso la primera fase consiste en seleccionar el número de elementos y el tipo de elementos de acuerdo con el tipo de estructura que se va a representar; En esta etapa no es necesario conocer con exactitud los parámetros estructurales del modelo físico. Los estudios para seleccionar el tipo de elementos y el número de elementos pueden ser realizados generando valores en un programa de E.F. previamente validado. La segunda etapa radica en obtener los valores por pruebas experimentales de los parámetros estructurales directos y posteriormente obtener por una combinación de pruebas experimentales y métodos inversos los parámetros restantes. La última fase consiste en la validación del modelo de elemento finito por medio de la comparación de las respuestas dinámicas experimentales y las generadas por el modelo y por la reconstrucción del impacto de excitación en función del tiempo. En general, este es un proceso iterativo mediante el cual se ajustan gradualmente los parámetros hasta lograr la precisión deseada.

En resumen, se proponen los siguientes pasos para la calibración dinámica de una estructura:

- Análisis de convergencia del modelo de elemento finito.

- Selección de los elementos para el modelo físico.
- Análisis de los parámetros estructurales.
- Caracterización de parámetros estructurales.
- Validación del modelo de elemento finito.

El estudio de convergencia se requiere para determinar el número mínimo de elementos que se deben usar en un modelo para representar el comportamiento real de la estructura. El estudio es de gran importancia ya que de este depende el ahorro en tiempo computacional que se puede lograr en cualquier tipo de análisis.

Al igual que en la mayoría de los problemas inversos, un mal planteamiento hace que la búsqueda de una solución una tarea difícil, ya que depende en gran medida de la cantidad y calidad de los datos experimentales. Hay que centrarse en los aspectos básicos del problema, se considera el caso de daño concentrado, y el comportamiento lineal se asume antes y después de los daños (Pau, 2005).

Metodología de aplicación para el monitoreo de la integridad estructural (Ancona, 2010):

1) Inspección visual de la estructura: Si el daño no es detectado visualmente entonces es posible empezar un proceso de detección de daño basados en vibraciones.

2) Investigación de la respuesta dinámica de la estructura previa al daño: Si no es posible obtenerla, en todo caso, es conveniente además realizar un modelo de elementos finitos de la estructura no detallado que simule las condiciones dinámicas previas al daño.

3) Análisis Modal Experimental: i) Elección de un mecanismo de excitación; ii). Defi-

nición de los parámetros dinámicos, el tipo y número de sensores y la localización de los mismos, y iii) Determinación de parámetros de adquisición de datos.

4) Detección y localización preliminar del daño: i). Actualización del modelo de elementos finitos, y ii) Selección de los parámetros de detección de daño adecuados.

5) Puesta en práctica de los métodos de detección de daño basados en vibraciones.

6) Iteraciones necesarias: Si la detección y localización del daño se ha comprobado por más de un método de detección, se considera que el daño fue caracterizado exitosamente. En cambio, si los métodos arrojan localizaciones posible del daño, se deben repetir las pruebas de vibración en la estructura con los sensores de medición en posiciones más cercanas a la posible localización del daño, de manera que iteraciones sucesivas del paso 2 detectaran exitosamente la localización del daño.

3.2.4. Monitoreo de la salud global

Idealmente, la observación de salud de la infraestructura civil consiste en determinar la ubicación y la gravedad del daño. Sin embargo, los métodos no dan la información suficientemente exacta para determinar la extensión del daño. Actualmente, estos métodos pueden determinar que tanto daño está presente o no en la estructura. Tales métodos son conocidos como "monitoreo de la salud global".

La observación de salud global ha sido una herramienta de uso recurrente para determinar la seguridad de edificios y puentes, cuyas evaluaciones son complementadas por el uso de análisis de elemento finitos. Un problema que se ha tenido con este método analítico es que el modelo estructural no es conocido para la mayoría de estructuras estudiadas (los modelos están generalmente basados en las mejores conjeturas en su discretización), otro problema es que la condición de miembros estructurales envejecidos no es conocida.

La tecnología de monitoreo de salud estructural global se compone de dos aspectos (Kie, 2001):

1) Instrumentación de puentes con sensores como acelerómetros y medidores de tensión y lo más importante.

2) Las metodologías para la obtención de información significativa respecto a las condiciones estructurales, en su caso, a partir de los datos medidos.

Los métodos de observación globales basados en las características dinámicas funcionan suficientemente cuando el daño para la estructura es cuantioso como la pérdida de un elemento principal de la estructura, casi todos métodos pueden detectar el daño. En la vida real los factores ambientales como el cambio en la temperatura, la humedad, y el viento podrían resultar en señales más grandes que éstos causados por el daño. En esta situación los métodos de observación globales sobre la base de las características dinámicas no son suficientemente sensibles para detectar el daño en la estructura.

Durante el monitoreo de la salud de las propiedades estructurales globales, el estado estructural actual se puede evaluar mediante la aplicación de los siguientes métodos (Wenzel y Pichler, 2005):

- 1) Monitoreo de la tensión.
- 2) Monitoreo de los desplazamientos.
- 3) Curvatura y el seguimiento de inclinación.
- 4) Observación de las frecuencias seleccionadas de resonancia.

5) Monitoreo selectivo de formas de vibración decisivos.

La implementación de un sistema de monitoreo de salud estructural basado en mediciones de vibración de las construcciones se basa en dos grandes desafíos:

a) El primero se refiere al diseño adecuado y motivado del sistema de diagnóstico. La integración de las tecnologías experimentales, analíticas y de información es requerida junto con peritajes específicos de diferentes disciplinas. Varios aspectos relacionados con la construcción y el entorno circundante se deben tener en cuenta con el fin de adaptar el sistema de supervisión para los fines de la investigación.

b) Además, el diseño de un sistema de vigilancia fiable no puede prescindir de una caracterización adecuada de la construcción junto con la identificación de sus vulnerabilidades. Estructuras antiguas muestran varias peculiaridades que influyen drásticamente cuestiones importantes de seguimiento, como el despliegue de la red de sensores, la calibración del sistema de adquisición y la evaluación de los datos adquiridos.

3.2.5. Factores que alteran el monitoreo

Es conocido que los factores ambientales como los cambios en la temperatura y la humedad pueden añadir el ruido sólido para dañar señales. Los métodos basados en la comparación de señales de una estructura dañada a señales de punto de partida de la estructura intacta padecen de este problema. En estructuras cerca de la costa los cambios ambientales podrían incluir el crecimiento de vegetación marina sobre la estructura que cambia la masa de la estructura, y así cambiando las características dinámicas de la estructura.

Los métodos de observación globales basados en las características dinámicas funcionan suficientemente cuando el daño para la estructura es cuantioso como la pérdida de un ele-

mentó principal de la estructura, casi todos métodos pueden detectar el daño. En la vida real los factores ambientales como el cambio en la temperatura, la humedad, y el viento podrían resultar en señales más grandes que éstos causados por el daño. En esta situación los métodos de observación globales sobre la base de las características dinámicas no son suficientemente sensibles para detectar el daño en la estructura.

Alguno clases de pruebas (por ejemplo: el análisis de modal) requieren que muchos ciclos de la prueba desarrollen las perspicacia estadísticamente suficientes en el comportamiento estructural a menudo. La calidad de prueba es definida a través de dos parámetros, obteniendo la información suficiente para describir la reacción estructural, y verificando que la información obtenida sea legítima. Una prueba estructural bien ejecutada provee pruebas objetivas del comportamiento estructural (Kumar, 2008).

En una situación ideal, los cambios experimentalmente observados en la respuesta de vibración son relacionados con las características de daño deseadas directamente, que incluyen la existencia, gravedad, tipo y ubicación del daño. Sin embargo, los intentos de relacionar las mediciones de vibración de dominio de tiempo sin procesar dañan las características y son dificultados por dos factores: 1) la dificultad en monitorear las modas en los datos de medición extra grandes y, 2) la sensibilidad alta de las mediciones de dominio de tiempo a los factores superfluos causada por las diferencias naturales en las condiciones operacionales y ambientales. Como consecuencia de estos dos apuros, el procesamiento de datos de las mediciones de respuesta de vibración de dominio de tiempo sin procesar deja necesariamente por extraer las características de respuesta de vibración dimensionales bajas. Idealmente, estos especiales de respuesta de vibración son conscientes del daño, pero insensible a los factores superfluos. El cambio medurado en las características de vibración seleccionadas como consecuencia del daño es un indicador de daño. Mientras los indicadores de daño más comunes incluyen los cambios en las frecuencias naturales, las formas de modo, y las propiedades básicas de la respuesta de historia de tiempo, como la aceleración máxima, muchas otras formas de las características de vibración globales pueden ser extraídas de las mediciones de vibración de

dominio de tiempo sin procesar (Prabhu, 2011).

Siempre hay errores en los datos medidos y el modelo numérico que afecta a todos los algoritmos. Los algoritmos de identificación de daños se deben probar siempre en ejemplos experimentales realistas, ya que muchos métodos que funcionan bien en los datos simulados a menudo fallan debido a los problemas señalados en este apartado. Como primer paso, los métodos pueden ser probados con datos simulados, pero aun así los errores sistemáticos realistas deberían incorporarse:

a) Errores de modelado: Uno de los principales problemas de ubicación del daño es la confianza en el modelo de elementos finitos. Este modelo es también un punto importante porque aparte de los datos medidos, requiere información adicional a partir del modelo de ser capaz de identificar la ubicación de los daños. Sin duda, habrá errores incluso en el modelo de la estructura en buen estado. Si los parámetros adecuados no se incluyen para permitir que los errores de modelo no dañado, a continuación, el resultado será un error sistemático entre el modelo y los datos. Los esquemas de identificación generalmente tienen considerable tendencia a tener errores sistemáticos. Es muy probable que los errores originales en el modelo producirán cambios de frecuencia que son mucho mayores que los producidas por el daño.

b) Efectos no estacionarios ambientales: Un aspecto muy difícil de solucionar en la evaluación de daños es el cambio en los datos de medición debido a los efectos ambientales. Este es uno de los efectos no estacionarios indeseables y hace que la ubicación de los daños sea muy difícil. Por supuesto, el daño progresivo es también un fenómeno no estacionario, y el daño puede ser difícil de identificar si otros efectos no estacionarios también están presentes. Efectos ambientales típicos se demuestran por medio de puentes de carretera, especialmente los construidos con hormigón, que han sido objeto de numerosos estudios en lugar de daño.

c) El efecto de la gama de frecuencias: La gama de frecuencias empleadas en la ubicación del daño tiene una gran influencia en los resultados. La gran ventaja en el uso de mediciones

de vibraciones de baja frecuencia es que los modos de baja frecuencia suelen ser globales y por lo que los sensores de vibración se pueden montar de forma remota desde el sitio dañados. Igualmente menos sensores pueden ser utilizados. El problema con los modos de baja frecuencia es que las longitudes de onda de los modos espaciales son grandes, y típicamente son mucho más grande que la magnitud de los daños.

d) Magnitud de daño: Un problema frecuente que surge en la detección de daños basado en vibraciones basado en el modelo, paramétrico o no paramétrico, es la necesidad de un modelo matemático preciso, para que capture correctamente el comportamiento dinámico estructural real en un rango de frecuencia predeterminado. A menudo, en la vigilancia de la salud estructural de los cambios en las cantidades medidas causados por daño estructural son más pequeños que los que se observan entre el (es decir, sin daños) estructura sana y el modelo matemático.

e) No linealidad: Muchas formas de daño causan un cambio en la rigidez de la no linealidad que cualitativa y cuantitativamente afecta a la respuesta dinámica de una estructura.

f) Fuerza contra rigidez: La filosofía de la detección de daños utilizando datos de vibración medida se basa en la premisa de que el daño va a cambiar la rigidez de la estructura. En algunos casos hay una diferencia significativa entre la fuerza y la rigidez. De hecho, la estimación de la vida útil restante de un componente basado en las conclusiones de un análisis dinámico es muy difícil.

Es importante para mostrar que la identificación daño no sea un problema indeterminado, evita la adición de condiciones matemáticas, no relacionadas físicamente al problema, o el uso de técnicas de regularización que no se filtren adecuadamente (Pau, 2005).

3.3. Detección de daño basado en vibraciones

El proveer una fuente de datos de una investigación estructural para la detección del daño ha aparecido dentro del V.B.M. el término de: "detección del daño basado en vibraciones"(vibration-based damage detection, V.B.D.D.), cuyos métodos no se limitan a la observación de la frecuencia natural como parámetro (desarrollado en la década de los 70's y cuya aplicación original fue para investigar un específico tipo de componente aeroespacial, teniendo éxito en la detección de daño), ya que hay distintos factores del comportamiento dinámico y propiedades modales que pueden ser utilizados (Brownjohn, 2011b).

Una de las formas tempranas de detección de daño basado en vibraciones fue desarrollada en la década de 1970 en el contexto de pruebas no destructivas, analizando cambios de frecuencia naturales (Brownjohn, et al., 2011). Ésta investigación fue dirigida a analizar un tipo específico de componente estructural aeroespacial. El método fue adaptado y usado con éxito en el análisis de un edificio en condiciones controladas, sin embargo su aplicación se ha intentado (con éxito muy limitado) con otro tipo de estructuras civiles, con varias diferencias sobre la técnica original propuesta (Brownjohn, et al., 2011). La detección de daño basado en vibraciones ha tenido más éxito en la ingeniería aeroespacial donde la detección de daño ha dejado mucha una tecnología viable. La metodología identificó el daño que había eludido a los métodos de prueba no destructivos tradicionales, debido a la inaccesibilidad para la verificación visual de los componentes dañados, y ha sido adoptada como una herramienta de inspección estándar para las estructuras del orbitador espacial Shuttle. La misma técnica ha sido empleada también en la industria para la evaluación de elementos de maquinaria, principalmente en la industria aérea en donde se usa para la detección de daños incipientes en aviones y helicópteros (Begg, et al., 1994; Cuc, 2002; Pfeiffer y Wevers, 2007; y Kumar, et al., 2009). La detección de daño basado en vibraciones ha tenido más éxito en la ingeniería aeroespacial donde la detección de daño ha probado ser una herramienta viable, aplicándose en un sistema de inspección modal de un transbordador espacial (Hunt, et al., 1992).

El principio en que se basan los algoritmos para la detección de daños es que cual-

quier cambio en el modelo espacial (defectos), produce cambios observables en la respuesta dinámica del sistema (figura 16). No es difícil observar que la filosofía que está detrás de los procedimientos de detección de daños nos indican por intuición de que la aparición de un daño o de un defecto en una estructura, produce un cambio en su funcionamiento o respuesta (Atienza, 2004; Grafe, 1998). El principio que subyace detrás de estos métodos es que la vibración es un indicador sensible de la integridad física de cualquier estructura. O, más específicamente, si cualquiera de la masa, la rigidez, propiedades de amortiguamiento de la estructura, cambia debido a un fallo estructural, entonces su respuesta vibratoria va a cambiar, y este cambio se puede medir con precisión utilizando métodos de prueba estándar modal. Las fallas estructurales, tendrán un efecto sobre la masa, amortiguamiento, y las propiedades de rigidez de una estructura. Todos ellos deben causar una disminución en la rigidez de la estructura, por lo tanto, las fallas estructurales deben siempre, a un nivel suficiente de gravedad, provocar un cambio en el comportamiento vibracional de una estructura (Mannan, 1990).

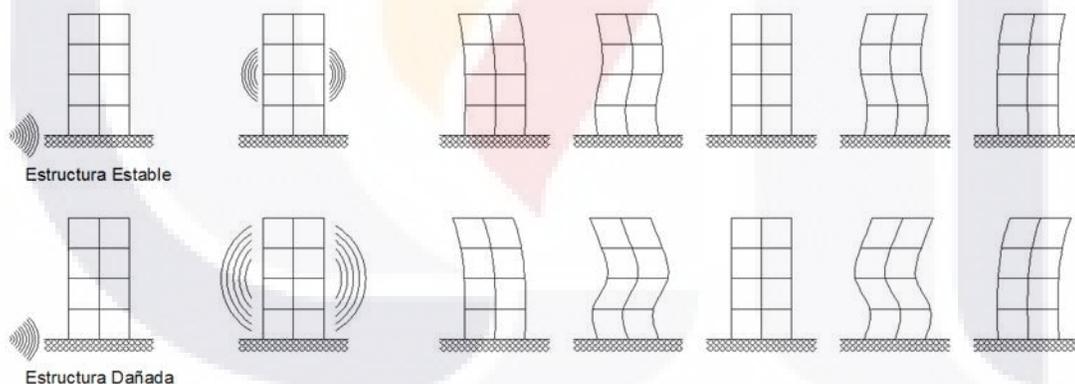


Figura 3.4: Respuesta estructural.

Para darle significado al concepto de daño, en términos matemáticos, es necesario recurrir a la comparación entre dos diferentes estados del sistema (como mínimo), siendo el inicial aquel en el que se idealiza una estructura sin daños y el segundo en el cual existe afectación. En términos generales, el daño puede ser definido como los cambios introducidos en un sistema que afecta negativamente a su rendimiento actual o futuro (Grafe, 1998; Sohn, 2003). Los

daños en una estructura pueden deberse a cargas accidentales que excedieron aquellas para las cuales las estructuras fueron diseñadas o simplemente porque estas últimas han superado su vida útil y sus propiedades físicas y mecánicas han cambiado o deteriorado debido al paso del tiempo y por el ataque del medio ambiente. Como consecuencia de estos factores existe el riesgo de que ocurran fallas o colapso que podrían significar la pérdida de vidas humanas o en el mejor de los casos, daños directos a la propiedad (Vazquez, 2005). Las grietas, son los principales daños ubicados en las estructuras, las cuales tienen menor importancia en gravedad para el caso de cargas pequeñas o de excitación estática, pero por otro lado, y tienen efectos de mayor importancia en la salud de la estructura en el caso de gran cargas y la excitación dinámica. A partir de lo anterior, es importante para la detección del daño en la etapas de afectación temprana (Moatasem, 2011). El daño tiene varias definiciones en la literatura de ingeniería. La degradación visible de elementos estructurales; las reducciones en la rigidez estructural incremental, la propiedad de disipación de energía; o cambios en las propiedades del estado estructural en comparación de un estado de punto de partida; y como un aumento medible en la flexibilidad local incremental de una región crítica (Aktan, 2001).

En todos los métodos de detección de daño (aún en el caso de inspección visual) es necesario conocer un estado previo de las estructuras. Éste estado previo, también conocido como estado sin daño, de referencia o base, se puede reconstruir a partir de los parámetros modales base de la estructura. Si la estructura se instrumentara antes de dañarse se podría reconstruir este estado. El problema principal es que este estado de referencia normalmente se desconoce y, por ende, sólo se puede contar con información de la estructura ya dañada. Por esta razón, es de suma importancia desarrollar métodos que permitan detectar la degradación de rigidez en edificios, de los cuales se desconocen sus parámetros modales base, utilizando únicamente información de la estructura actual. Aunado al problema anterior, la detección de daño en las estructuras también depende de las técnicas de procesamiento de señales, de la información modal limitada y del ruido en los registros de su respuesta dinámica. Por tal motivo, es necesario estudiar sus efectos (Rodríguez, 2007).

La prueba modal se ha hecho muy popular para detectar defectos en estructuras mecánicas debido a lo siguiente (Wolff, 1989):

- La falla del material estructural (por ejemplo: con agrietamiento).
- La presencia de discontinuidad en conexiones.
- Por la presencia de vacíos y rajaduras no visibles.
- El ensamblaje impropio de partes durante la fabricación.

La técnica de Detección de Daños (figura 17) nace como consecuencia directa de la unión de las técnicas de Sintonización de Modelos con las Técnicas Experimentales, siendo conjuntamente capaces de aumentar la capacidad de las predicciones analíticas realizadas mediante cálculos por Elementos Finitos (Atienza, 2004).

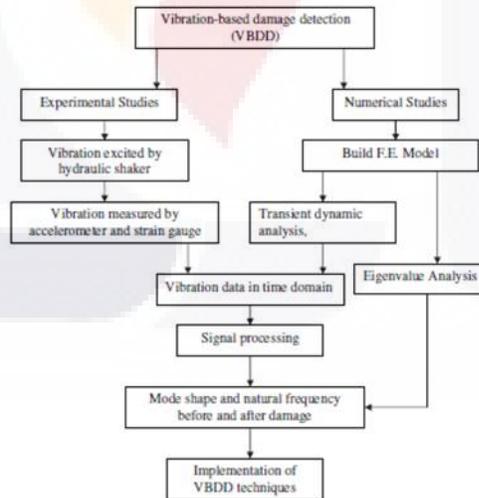


Figura 3.5: Diagrama general de la V.B.D.D. (Zhou, 2006).

Atienza en 2004 propone que para llevar a cabo un estudio de detección de daños en una estructura, se debe realizar previamente un modelo que represente el comportamiento

dinámico de la misma (modelo matemático), además de una fase experimental en la que se obtiene la respuesta dinámica de la estructura (figura 18):



Figura 3.6: Propuesta de procedimiento de detección de daño (Atienza, 2004).

3.3.1. Niveles de daño

Las técnicas de detección de daño basado en vibraciones pueden ser categorizadas en cuatro niveles (figura 19), según su alcance (Rytter, 1993):

Nivel I Identificación de la presencia del daño.

Nivel II Identificación de la presencia y ubicación del daño.

Nivel III Identificación de la presencia, ubicación y magnitud del daño.

Nivel IV Predicción de la vida útil de la estructura.

El nivel 1 da una señal cualitativa de que el daño podría estar presente en la estructura; el nivel 2 da la información sobre la localización probable del daño; el nivel 3 da un cálculo aproximado de la extensión del daño; y el nivel 4 brinda la información sobre la inocuidad de la estructura, calculando la vida operativa residual (L. F. Ramos, 2006).



Figura 3.7: Niveles en el proceso de identificación de daño en estructuras.

Recientemente, (Worden, 2004) propuso una clasificación con un nivel intermedio basado en los preceptos del S.H.M. basado en la fuente de daño, los niveles son los siguientes:

- Detección ("Nivel 1"): El método da una señal cualitativa de que el daño podría estar presente en la estructura;
- Localización ("Nivel 2"): El método da la información sobre la localización probable del daño;
- Clasificación ("Nuevo nivel 3"): El método da la información sobre el tipo del daño;
- Evaluación ("Nuevo nivel 4, clásico nivel 3"): El método da un cálculo aproximado de la extensión del daño;
- Predicción ("Nuevo nivel 5, clásico nivel 4"): El método brinda la información sobre la operabilidad de la estructura, calculando la vida residual.

El campo de la monitorización de estructuras centra su atención en los niveles 1, 2 y 3 ya que frecuentemente están relacionados directamente con las pruebas dinámicas de estructuras y afectan al modelado de esta. El nivel 4 está generalmente emplazado en el campo de la mecánica de la fractura, análisis de la resistencia a fatiga o evaluación del diseño estructural

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

y, como tal, no está incluido en la literatura sobre análisis modal o vibración de la estructura. Al estudio y aplicaciones de los niveles de monitorización 1, 2 y 3 se le conoce como S.H.M. (Structural Health Monitoring). El problema directo, que por lo general cae en la categoría de nivel 1 de identificación de daños, consiste en calcular los cambios de frecuencia de un tipo conocido de daños. Típicamente, el daño se modela matemáticamente, para a continuación, las frecuencias medidas son comparadas con las frecuencias predichas para determinar el daño. El problema inverso, que es típicamente Nivel 2 Nivel 3 o identificación daños, consiste en calcular los parámetros de daño, por ejemplo, longitud, magnitud y su ubicación, a partir de los desplazamientos de frecuencia (Doebling, 1996).

Los niveles de detección de daño del 1 al 3, son parte vital de la evaluación del estado de las estructuras de puentes y ha sido estudiados por varios investigadores, unos documentos mencionan los sistemas S.H.M. que han caído en la evaluación del estado estructural (Nivel 4) basado en la interfaz con el apoyo de Nivel 1 al Nivel 3. por lo tanto, estas todo dar lugar a una necesidad urgente de crear métodos de detección de daños globales y un sistema de evaluación de la condición técnica para un sistema práctico y eficaz S.H.M. (Wang, 2009).

Hasta la fecha los métodos de identificación de daño basados en vibraciones que no utiliza algún modelo estructural llegan al nivel 1 y en ocasiones al nivel 2. Cuando son complementados con un modelo estructural, se alcanza el nivel 3. Para lograr el nivel 4 los métodos deben ser complementados con los campos de la mecánica de fractura, el análisis de fatiga-vida, o la valoración de diseño estructural en general (Doebling, et al., 1998). La mayoría de las aplicaciones reportadas en la literatura se quedan en los niveles más bajos de la clasificación anterior, por lo que el desarrollo de una metodología para lograr el nivel 4 sigue siendo una de las líneas de investigación más atractivas por las implicaciones que tiene en la conservación de edificios patrimoniales.

3.3.2. Métodos locales y globales

Básicamente en los métodos de detección de daño se pueden agrupar en métodos locales y globales. Los métodos locales inspeccionan la estructura en un área relativamente pequeña mediante el uso de ondas de ultrasonido, radiografías, campos electromagnéticos, etc. Estos métodos son muy sensibles y capaces de detectar daños aunque no es posible utilizarlos en lugares de difícil acceso (Molina, 2012). Las estrategias tradicionales de detección de daños consisten en la inspección visual y las evaluaciones no destructivas locales (tales como el uso de los rayos X, técnicas actuales de ultrasonido, entre otros) (Wang, 2009). Los métodos locales permiten conocer las propiedades mecánicas o físicas del material constitutivo de la estructura, de manera puntual, estos métodos requieren de accesibilidad a la zona que se desea inspeccionar y evidentemente, la cobertura es limitada (Arceo, 2013).

Los métodos globales, son técnicas que proporcionan información sobre la condición general de una estructura, sin que necesariamente determinen o localicen el daño, pero son capaces de proporcionar una calificación global de la integridad estructural. El hecho de que estos métodos tengan un carácter global, implica que la instrumentación que utilizan para la evaluación estructural, sea distribuida por toda la estructura y que la información que se obtiene de ésta, únicamente tenga sentido si se analiza en su conjunto. La mayoría de los métodos globales evalúa la integridad estructural a través de mediciones dinámicas. Estos métodos se fundamentan en la interpretación de las variaciones en los parámetros modales como son las frecuencias, las formas modales y los factores de amortiguamiento que, a su vez, son manifestación de algún cambio en una variable física de la estructura, como puede ser la masa, la rigidez o el amortiguamiento. En un principio, la evolución de daño a través de este tipo de análisis se realiza en forma cuantitativa buscando establecer correlaciones entre los valores medidos y los niveles de daño conocidos. Como resultado, se obtienen factores de correlación con diferentes grados de sensibilidad dependiendo de la magnitud, localización de daño y la técnica de detección de daño empleada (Arceo, 2013).

Los métodos de detección de daños basados en vibraciones también pueden clasificarse

en métodos lineales y no lineales (Doebbling, 1998):

- Los métodos lineales suponen que la estructura sigue siendo lineal después de que ocurra la falla. Normalmente esta condición se considera razonable a pesar de que la estructura exhibe un comportamiento no lineal después de sufrir daño. Este es el caso de una grieta abierta y los cambios causados en las condiciones de frontera (Salgado, 2008).

- Los métodos de detección de daños no lineal se deben utilizar en el caso de grietas que abren y cierran, como su nombre lo indican estas grietas se abren y cierran durante el funcionamiento normal del puente lo cual provoca que deba considerarse una rigidez adicional cuando la grieta cierra (Salgado, 2008).

La prueba de modal es el componente experimental principal de la identificación estructural. Numerosos problemas tienen que ser resueltos para realizar pruebas modales fiables, dichas pruebas se pueden clasificar en (Aktan, 2001): a) el diseño de prueba, establecer las restricciones de prueba, la excitación, la cuadrícula y los preparativos de sitio; b) la configuración y los instrumentos; c) la depuración de prueba preliminar; d) la prueba respecto a la garantía de la calidad de progreso de los resultados (retroalimentación); e) las consideraciones post- prueba.

Los métodos globales utilizan el hecho de que el daño en un punto específico provoca una reducción de la rigidez en ese lugar lo que tiene una influencia en el comportamiento global de toda la estructura en términos de tiempo y espacio. Por ejemplo, la reducción de la rigidez provoca una disminución de las frecuencias propias. Estos métodos, basados en las vibraciones de baja frecuencia, vigilan todo el sistema observando cambios en las frecuencias de resonancia, el aumento de la amortiguamiento o cambios en los modos de vibración por mencionar algunos parámetros dinámicos. Estos cambios se usan como las características extraídas de la información en bruto y permiten distinguir entre los estados sin daños y dañados de la estructura (Molina, 2012). Dichas técnica de detección de daños nace como

consecuencia directa de la unión de las técnicas de "sintonización de modelos con los estudios experimentales" (figura 20), siendo en conjunto capaces de aumentar la potencia de las predicciones analíticas realizadas mediante cálculos por elementos finitos para la caracterización dinámica de los sistemas (Atienza, 2004). En general, los métodos globales de detección de daños asumen que los parámetros modales estructurales, están en función de los parámetros físicos, tales como la masa, la rigidez y las matrices de amortiguamiento, lo que significa que los cambios en dichos parámetros (Wang, 2009).

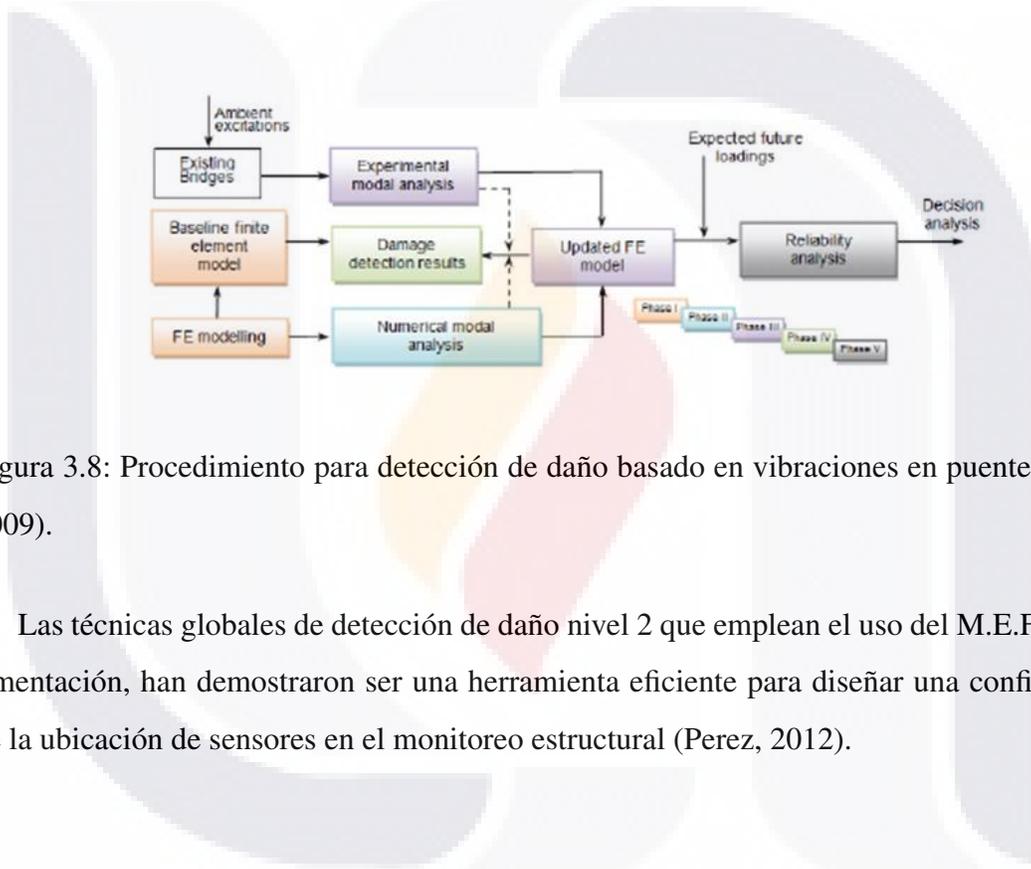


Figura 3.8: Procedimiento para detección de daño basado en vibraciones en puentes (Wang, 2009).

Las técnicas globales de detección de daño nivel 2 que emplean el uso del M.E.F. y experimentación, han demostrado ser una herramienta eficiente para diseñar una configuración de la ubicación de sensores en el monitoreo estructural (Perez, 2012).

3.3.3. Objetivo de los métodos de detección de daño

En todo momento, los edificios y puentes se están deteriorando, y se pierden así su utilidad y beneficio para el ser humano, por lo cual es importante preguntar: ¿existe alguna forma de conocer estos daños para prevenirlos, corregirlos y conocer el tiempo de vida útil que posee cada estructura? Para responder esto, se ha desarrollado un área de investigación conocida como monitorización de Salud Estructural (Structural Health Monitoring o S.H.M.), que busca evaluar en línea las condiciones dinámicas de las estructuras para determinar, localizar

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

y cuantificar daños en la misma (detección de daño), además de predecir la vida útil de la estructura (Quintero, 2010).

La detección del daño constituye el objetivo primario en un problema más general que significa lograr su identificación. Un análisis posterior y niveles superiores de esa identificación incluyen: severidad y clasificación del daño, localización del daño, y finalmente, predicción de vida remanente en servicio de la estructura y su posible interrupción (Maurizi, 2003).

Algunos de los objetivos de la detección de daño son (Molina, 2012):

- Salvaguardar la integridad de los puentes;
- Garantizar que el mantenimiento de la red de puentes se lleve de manera optima;
- Jerarquizar las necesidades de los proyectos de re habilitación y de la ejecución de las obras;
- Realizar la optimización de los presupuestos anuales;
- Optimizar los criterios de evaluación para los proyectos de reparación de los puentes sean lo mas prospero posible.

La idea básica de estos métodos es evaluar los posibles cambios en los parámetros dinámicos (respuestas dinámica, frecuencia, modos de vibrar, amortiguamiento modal) y relacionarlos con cambios en los parámetros estructurales representados en las matrices de masa, rigidez y amortiguamiento, que son definidos a través de un modelo matemático que se usa para representar el sistema real (Arceo, 2013). Una variedad de métodos de estimación de daño utilizan las propiedades de las matrices $[M]$, $[C]$ y $[K]$ para definir actualizar las respuestas estructurales a partir de los datos medidos (Mannan, 1990).

3.4. Métodos de detección de daño basado en vibraciones

La inspección para detección de daño se ha trabajado desde finales del siglo XIX, cuando los trabajadores de las vías escuchaban las emisiones acústicas de la misma a fin de detectar fallas o grietas. Estas técnicas de reconocimiento visual o auditivo, son las alternativas más utilizadas cuando se carece de la tecnología para realizar un estudio más adecuado (Quintero, 2010). El desarrollo y aplicación de estas técnicas basadas en las características dinámicas de las estructuras tuvieron auge en la década de los 70's en la industria petrolífera. Se emplearon en plataformas offshore ya que la inspección visual de estas estructuras es difícil al encontrarse la mayor parte de la misma bajo el agua. Dentro de las técnicas que abarca el S.H.M. (Structural Health Monitoring), el empleo de la técnica de detección de daños a partir del cambio en los parámetros modales comienza a abarcar un mayor campo de aplicación a partir de la década de los 80's con su empleo en la inspección de estructuras de ingeniería civil. Finalmente a partir de 1982, estas técnicas de inspección no destructiva, basadas en los cambios de las propiedades dinámicas de las estructuras, comienzan a aplicarse al campo aeroespacial y aeronáutico (Moran, 2011).

En base a la elección de las medidas de detectar el daño a un nivel global, es posible distinguir (Zonta, 2000):

- Las técnicas basadas en la identificación de los cambios de la respuesta, expresado en los parámetros modales clásicos (la frecuencia, la forma modal) en general, mirando la configuración de un conocido modelo, el daño es revelado por una diferencia en el comportamiento de dos estructuras, que a base de la respuesta pudo no ser declarado intacto o deteriorado solamente.

- Las técnicas que se basan en la identificación de las anomalías, generalmente demues-

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

tran una incursión a la no linealidad en la reacción estructural. En este caso, la presencia de una anomalía es la que demuestra el daño. Es digno de notar que este enfoque es mucho menos frecuente en las propuestas para la detección de daño en forma global.

Según Molina en 2012, es posible aplicar varios métodos de detección de daño basado en vibraciones, donde a partir de la obtención de la respuesta dinámica de un sistema estructural, es viable determinar un procedimiento racional para evaluar el comportamiento de una edificación, para lo cual es necesario calibrar un ensayo modal experimental con un modelo numérico, de preferencia ambos ante escenarios analíticos diferentes.

Existen distintos métodos prometedores dentro del campo del monitoreo del comportamiento estructural. Dichos métodos son (Ancona, 2010):

a) Métodos basados en parámetros modales básicos (correlación de formas modales):

a.1) Criterio de Correlación Modal (M.A.C. - Modal Assurance Criterion).

a.2) Criterio Coordinado de Correlación Modal (Co.M.A.C. - Coordinate Modal Assurance Criterion).

b) Métodos basados en cambios en parámetros estructurales derivados (curvaturas de formas modales, energías de deformación, rigideces y flexibilidades medidas dinámicamente):

b.1) Método del cambio de la matriz de flexibilidad, medida dinámicamente (F.M. – Flexibility Method).

b.2) Método del cambio de la matriz de Rigidez, medida dinámicamente (S.M. – Stiffness Method).

b.3) Comparación de curvaturas de las formas modales mediante Enfoque Mixto (M.A. – Mixed Approach).

b.4) Índice de Daño (D.I. - Damage Index).

c) Métodos basados en la Transformada de la Ondaleta (Wavelet):

c.1) Método basado en la Transformada Continua Wavelet (C.W.T. - Continuous Wavelet Transform).

c.2) Método del Análisis Discreto de Wavelets (D.W.A. - Discrete Wavelet Analysis).

c.3) Método basado en Paquetes de Wavelets (W.P.S. - Wavelet Packet Signature).

c.4) Método combinado C.W.T.-D.I.

Arceo en 2013 realizó otra clasificación de los métodos globales:

- Métodos globales de detección de daño nivel 1: Criterio de aseguramiento modal (M.A.C.), Factor de escala modal (M.S.F).

- Métodos globales de detección de daño nivel 2: Criterio de aseguramiento modal coordinado (Co.M.A.C.), Factor coordinado de escala modal (Co.M.S.F.), Cambio en la forma de los modos dinámicos.

- Métodos globales de detección de daño nivel 3: Método de Búsqueda Global (M.B.G.).

Los métodos más utilizados en la ingeniería civil para la detección de daños basado son:

- Detección de daño basado en el cambio de curvatura.

- Detección de daño basado en el cambio de frecuencia.

- Detección de daño basado en el cambio de rigidez.

- Detección de daño basado en cambio de flexibilidad.

- Criterios de confiabilidad modal (M.A.C., modal assurance criterion, en inglés).

La idea esencial de estas técnicas (figura 21) se basa en que los parámetros modales (en particular frecuencias, vector modal y amortiguamiento modal) dependen de las propiedades físicas de la estructura (masa, amortiguamiento y rigidez). Por consiguiente, los cambios que se producen en las propiedades físicas de la estructura acarrearán cambios en sus propiedades modales (Moran, 2011). La idea común en todos los métodos, consiste en identificar el daño sin afectar la integridad de las estructuras comparando información de un estado dañado con uno de referencia. Esto es, el daño se determina relacionando el cambio de las características dinámicas con el de las propiedades de la estructura que las definen.

La mayoría de los métodos de detección de daño utilizan las propiedades dinámicas de las estructuras, como formas modales y frecuencias, en donde un cambio en dichas propiedades podría representar la presencia de daño en alguno de los elementos que componen a la estructura. Gracias a los avances en la instrumentación de edificios, en la actualidad resulta relativamente sencillo obtener de una manera adecuada las propiedades dinámicas de estos. Incluso, se puede tener un seguimiento del comportamiento de las estructuras y analizar la evolución de las propiedades dinámicas en distintos tiempos y después de distintos eventos o fenómenos físicos como los sismos (Guerrero, 2007).

Es posible llevar el procedimiento de localización de daño de acuerdo con la siguiente

Approaches	Limitations	Virtues
Frequencies Response Function	<ul style="list-style-type: none"> • Insensitive unless severe damage happened or accurate measurement applied. • the inverse method is still only being investigated theoretically 	<ul style="list-style-type: none"> • The forward methods are mature
Mode Shapes	<ul style="list-style-type: none"> • Only sensitive in the case that the measurement point is close to node points for a particular mode 	<ul style="list-style-type: none"> • The combination of MAC and COMAC work sensitively in damage detection
Curvature/Strain Modes	<ul style="list-style-type: none"> • New sensor technology must be applied to register the strain field over the whole structure due to the strain is a local entity 	<ul style="list-style-type: none"> • Feasible for damage localisation • Higher derivatives of mode shapes are more sensitive to damage
Modal Strain Energy	<ul style="list-style-type: none"> • Cannot detect damage in a structure when the damage is located in an element not sensitive to modal parameter changes 	<ul style="list-style-type: none"> • Feasible by localising damaged elements within the truss structure • More precise than the flexibility method
Dynamic Flexibility	<ul style="list-style-type: none"> • Require a sufficient number of well distributed sensors • If damages are too small, it could be masked by numerical errors 	<ul style="list-style-type: none"> • Only first few modes are needed • Better to detect damage severity
Artificial Neural Network (ANN)	<ul style="list-style-type: none"> • Large training sample is needed for accurate detection 	<ul style="list-style-type: none"> • Do not need knowing the physical relationships between the structural properties and damage occurrence
EMD & Hilbert spectrum	<ul style="list-style-type: none"> • Limited physical meanings • Fast computation algorithms are needed 	<ul style="list-style-type: none"> • Can be applied to nonlinear and non-stationary time series

Figura 3.9: Principales métodos de detección de daño (Wang, 2009).

secuencia lógica (Zonta, 2000):

- 1.- Identificación de medidas dinámicas que expresan el daño en un nivel global (por ejemplo: el cambio en los parámetros de frecuencia);
- 2.- Modelar el daño a un nivel local y definir sus indicadores locales (por ejemplo: los cambios locales en la rigidez la discontinuidad estructural los cambios locales en la viscosidad);
- 3.- La elección de una relación que conecta las medidas de parámetros globales a parámetros de daño local;
- 4.- Calcular los parámetros de daño locales para su solución mediante el problema inver-

so.

Este procedimiento lógico está siempre implícito en los métodos propuestos en la literatura. Mientras no es necesario examinar la localización exhaustiva que las técnicas proponen en el detalle.

La calidad de cada tipo de análisis depende en gran medida del conocimiento de la ingeniería y la capacidad de interpretar los resultados obtenidos. Esto es particularmente cierto si claras discrepancias entre los resultados de las pruebas y análisis son evidentes, el objetivo principal es adaptar el modelo analítico. A esto se le llama problema inverso, donde se buscan los parámetros de diseño físico que producen una propiedad dinámica dada, puede ser manejado por las disciplinas conocidas como "Detección de Daños", "Vigilancia de la Salud." "Actualización de modelo"(Grafe, 1998).

3.4.1. Actualización modal

La actualización de modelos se refiere a la metodología que determina el modelo estructural más plausible para un sistema instrumentado estructural con su respuesta a la excitación externa (Ching, 2006; Schwarz, 2007). El comportamiento físico de las estructuras es simulado generalmente mediante un modelo de elementos finitos, la precisión de cada modelo numérico dependerá de que los supuestos del modelo (propiedades) sean correctos. Sin embargo, una comparación entre los resultados numéricos y los datos de prueba de la estructura real (adquisición de datos experimentales) es necesario para verificar un modelo de elementos finitos. Si la desviación entre la prueba y el análisis excede los umbrales requeridos, el modelo numérico tiene que ser ajustado (actualización modal) para dar una mejor representación del comportamiento físico para los cálculos posteriores (Govers, 2011).

Uno de los aspectos clave de un método de identificación de daño modelado es la parametrización de los daños del mismo. Basado desde enfoques inversos debe de plantear un modelo

de los daños, el éxito de la estimación de daño depende de la calidad del modelo utilizado. El tipo de modelo utilizado dependerá del tipo de estructura y su mecanismo de daño. El modelo de daño puede ser simple o complejo. Por ejemplo, una grieta puede ser modelada como una reducción en la rigidez en un elemento finito grande o sub-estructura, o, alternativamente, utilizando un modelo muy detallado de la mecánica de la fractura. Si tal modelo detallado se justifica, a menudo dependerá de la calidad de los datos medidos. Utilizando un modelo modal, que consiste en las frecuencias naturales más bajas y formas modales asociadas, significará que sólo un modelo burdo de los daños puede ser identificado.

Los procedimientos de actualización modal tienen que ver con la reconstrucción de un modelo dinámico (modelo de elementos finitos de una estructura), que predice la respuesta medida de la estructura. En el modelo de actualización que tenemos un sistema, y ha sido modelado, pero si las predicciones no están de acuerdo o corresponden con el experimento, en efecto lo que queremos hacer es cambiar el modelo un poco, por lo que hay que actualizar el comportamiento del sistema. La actualización es, pues, un problema de identificación; tenemos un modelo que predice los resultados, en algún sentido, a los valores experimentales; sólo tenemos que ajustarlos (Ahmanian, 1997).

Cuando se modela una estructura, existen errores, los cuales pueden ser corregidos mediante el conocimiento de que tipo de parámetros modificar para igualar su comportamiento numérico a los datos experimentales (Atalla, 1996):

- Errores en la estructura de modelo: Estos errores se producen cuando el modelo no representa el comportamiento físico del prototipo. Ejemplos de este tipo de error son los supuestos sobre la linealidad del sistema y las condiciones de contorno.
- Errores de orden: El número eficiente de G.D.L. se debe utilizar, tal que corresponda a las condiciones de contorno y frontera que la estructura tiene.

- Errores de los parámetros de modelo: Estos errores se producen cuando el modelo es bueno, pero los valores numéricos de los parámetros físicos son incorrectos. Este es el tipo de error de los principales y más fáciles de corregir en las técnicas de actualización de modelo.

En todos los métodos de detección de daño, una parte fundamental es la calibración del modelo matemático que represente las características dinámicas y estáticas de la estructura en estudio. Una inadecuada representación de los fenómenos físicos conllevaría al fracaso de cualquiera de los métodos empleados (Arceo, 2013). La relación entre los parámetros físicos del elemento estructural y las características dinámicas de estos elementos dan la capacidad de detectar el daño usando el cambio en las características dinámicas debido al cambio en los parámetros físicos del elemento estructural (Moatasem, 2011). Los principios de las técnicas de actualización de modelo generalmente se basan en "métodos iterativos" (Blakely, 2000; Grafe, 1998).

En los modelos de actualización el modelo analítico existente (elementos finitos) que representa la estructura en estudio, es calibrado a partir de datos experimentales (modificando las propiedades mecánicas del mismo), de tal manera que se ajuste el modelo hasta obtener el mismo comportamiento dinámico (numérico y experimental) (figura 22). Aunque una considerable cantidad de investigación hasta antes de la década de los noventa se dedicó al área de la actualización de modelos, se concluyó que dicho problema seguía siendo en gran parte sin resolver, se identificaron potenciales dificultades que los métodos de actualización deben abordar, las principales dificultades se debe al ruido en los datos experimentales. El modelo de análisis debe representar la estructura bajo estudio lo suficientemente detallado de tal manera que otro refinamiento (actualización de modelo) no cambie significativamente su comportamiento dinámico predicho en la gama de frecuencias de interés, pero no debe ser demasiado detallado como para que el número de elementos a ser actualizados se vuelva excesivo (Wilhelmina, 1992).

Esta técnica tiene como objetivo efectuar correcciones paramétricas en los modelos de

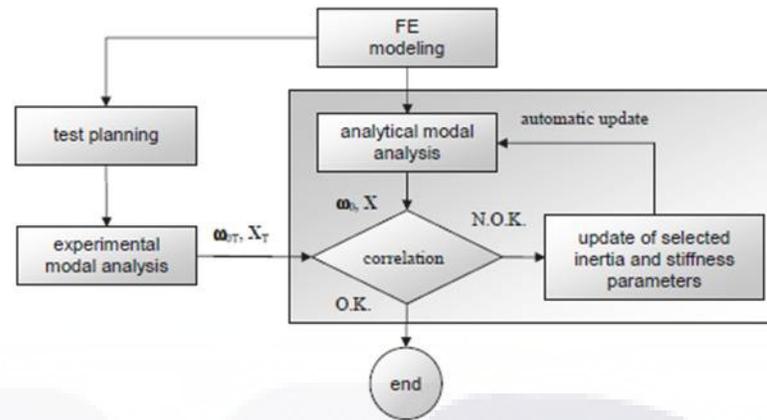


Figura 3.10: Validación de la actualización de modelos (Wilhelmina, 1992).

elementos finitos con el fin de que los resultados numéricos se asemejen a los resultados reales de la estructura. Este proceso se lleva a cabo efectuando modificaciones en el modelo analítico de diseño para adecuar su comportamiento frente a solicitaciones diferentes y obtener una respuesta que represente más fielmente la respuesta real de la estructura. Además, esta actualización del modelo numérico también permite la re evaluación de los coeficientes de seguridad considerados en la fase de diseño.

Este método presenta dificultades en el proceso de actualización asociadas tanto a inexactitudes en el modelo como a errores en los datos experimentales. Aunque los datos experimentales posean errores que provocaran una baja correlación entre estos datos y las predicciones, la teoría de ajuste de modelos supone que los principales causantes del desacuerdo teórico-experimental son los errores en el modelo.

El proceso de actualización consta de las siguientes etapas:

a) Modelado de la estructura: Se han de definir algunos parámetros como la densidad del mallado, la densidad del material, los espesores, las secciones transversales y el módulo de elasticidad. En esta definición se puede cometer errores de precisión.

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

b) Cálculo de sus características dinámicas: A partir de los parámetros definidos se calculan las frecuencias y modos de vibración numéricos.

c) Correlación del modelo numérico y experimental: Se realiza la correlación entre las frecuencias y los modos de vibración obtenidos numérica y experimentalmente. El estudio de la correlación proporcionara una primera indicación sobre la validez del modelo de elementos finitos. El objetivo que se persigue es obtener en la correlación unas frecuencias naturales con el mínimo error (para esto se utiliza el ϵ , antes definido).

d) Ajuste mediante iterativo: Los valores de los parámetros serán iterados de forma que el error en las frecuencias y modos relacionados disminuya.

e) Estudio de los valores finales: A partir del modelo actualizado, mediante cambios en sus características dinámicas, se pueden detectar daños. En este proyecto la disminución del el módulo de elasticidad se tomara como un indicador de la severidad del daño.

Para resumir, mediante el método "modal updating" se ajustan los valores de los parámetros de la estructura, de forma que el modelo numérico se ajuste a la estructura real. En el proceso de iteración los coeficientes de correlación se minimizan hasta que la iteración converge. Para obtener un modelo actualizado, el modelo debe haber convergido totalmente con respecto a las frecuencias obtenidas experimentalmente (Atalla, 1996; Blakely, 2000).

A diferencia de los métodos directos, que se centran en las matrices globales del sistema, procedimientos de actualización modelos, se formulan de acuerdo con la estructura discretizado mediante un modelo FE. Dichos modelos son un conjunto de elementos definidos por sus parámetros de diseño, como son sus propiedades geométricas y de los materiales (Grafe, 1998).

Se ha observado que la etapa de actualización es la más crítica, y en este caso, se ha uti-

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

lizado un método de localización de errores basado en el análisis de sensibilidad, precedido de un amplio conocimiento de las características del objeto de estudio, para poder llevarla a cabo con cierta fiabilidad (Hernandez, 2010).

3.4.2. Sintonización de modelos

En primer lugar para la "sintonización de modelos", el modelo de la estructura se discretiza mediante un modelo de elemento finito que describa sus características físicas. Entonces, del modelo se podrán extraer los parámetros dinámicos (los parámetros modales necesarios pueden ser calculados a partir del modelo analítico) (Mottershead, 1993). La detección experimental será seguida después de este paso para actualizar el modelo numérico mediante la comparación de las propiedades modales extraídas con los resultados experimentales (Wang, 2009). Con el uso de los conceptos de identificación del sistema, las propiedades modales ya medidas, pueden usarse para configurar o modificar el modelo estructural analítico, para con la mayor precisión posible poder diagnosticar daños. Hay dos categorías de identificación del sistema estructural, la primera trata de establecer un modelo de análisis, denominada sistema de identificación directa; la otra es para modificar el modelo analítico existente o el llamada sistema de identificación indirecta (Nakte, 1988).

El procedimiento general asumido para conseguir esto, es (Brown, 2012):

1.- Defina los modos naturales fundamentales de la vibración, mediante el uso de métodos de análisis modal en funcionamiento.

2.- Medir la reacción de la estructura ante la vibración durante los eventos en la campaña de estudio.

3.- Identificar las frecuencias de péndulo invertido (1 G.D.L.).

4.- Desarrollar un modelo de elemento finito (F.E.) que incluya los efectos de los defectos existentes.

5.- Medir el desplazamiento global durante la prueba, para los propósitos de validación de medición.

6.- Actualizar y validar el modelo de F.E. para ajustarse a la respuesta de modal medida.

7.- Usar el modelo de F.E. validado para tasar la respuesta dinámica.

8.- Evaluar la respuesta de vibración medida en relación con las normativas internacionales relevantes.

9.- Luego de la terminación de la medición y la proceso de valoración, desarrolle un estrategia para proponer restauración y rehabilitación de los elementos que tengan los niveles excesivos percibidos de la vibración.

El objetivo de la identificación de parámetros es desarrollar o mejorar la representación matemática de un sistema físico usando datos experimentales, es decir adquirir la capacidad de reproducir correctamente su comportamiento bajo la acción de diversas condiciones de excitación. Se trata de establecer un puente entre el dominio de la realidad y el del modelo que pretende representarla, contribuyendo a entender mejor la primera y perfeccionar el segundo. Necesariamente todas las técnicas de identificación se apoyan en información obtenida a través de mediciones sobre sistemas reales, y desde una visión muy global estas técnicas pueden ser clasificadas como (Giro, 2012):

- Identificación general o de caja negra, donde el objetivo es establecer las relaciones entrada-salida del sistema, sin hacer interpretaciones físicas sobre la composición del modelo matemático capaz de cumplir esta función.

- Identificación estructural o de caja blanca, donde el correcto establecimiento de la relación entrada-salida esta supeditada a la identificación previa de los parámetros intrínsecos del sistema, todos ellos con claro sentido físico, como son los que representan su inercia, elasticidad y propiedades disipadoras.

El análisis modal experimental, mediante el cual se obtienen las propiedades dinámicas de un sistema real, resulta muy útil para la detección y localización de daños. Esta tarea se consigue a través del estudio de la variación de cualquiera de sus parámetros modales, ya que un daño siempre lleva asociada una variación en su comportamiento dinámico global (Rojas, 2006). Para poder conocer los cambios en las características dinámicas de los edificios, es necesario recurrir a la instrumentación sísmica para obtener datos experimentales. Esta implica determinar la cantidad y ubicación adecuada de los dispositivos necesarios para conocer la respuesta de las estructuras (Escobar, 2007). La información derivada de los registros sísmicos obtenidos de edificios instrumentados es necesaria en el proceso de calibración de los modelos analíticos que se elaboran con las consideraciones de análisis. Así, es de gran utilidad para determinar con mayor aproximación la respuesta representativa de las estructuras y reproducir sus respuestas experimentales (Gallote, 2008). La instrumentación sísmica de edificios tiene como objetivo contribuir a la comprensión de su respuesta dinámica ante sismos de gran intensidad, además de un mejor entendimiento de su potencial del daño.

Los cálculos aproximadamente razonables de las propiedades modales pueden ser obtenidos de un análisis de la reacción de vibración ambiental dinámica. Esta excitación, que es de naturaleza aleatoria, es atribuible a las fuentes humanas y artificiales, como el tráfico, el viento y micro terremotos. Aunque la contribución es desconocida, que impide el medir el F.R.F. correcto (Pau, 2014).

Los métodos globales presentan ventajas importantes sobre los otros métodos de detección de daño no destructivos (Ancona, 2010):

- Se puede obtener un estado global de la estructura aun en condiciones de difícil acceso o instrumentación;

- No se interrumpe el servicio cotidiano;

- No es necesario conocer a priori la localización del daño;

- No es necesario que los sensores de medición se localicen en la vecindad del daño;

- Un número reducido de sensores puede detectar, localizar y cuantificar el daño adecuadamente.

Doebeling en 1996 propuso los siguientes consejos para realizar estudios de esta índole:

- a) Desarrollar modelos analíticos previo al monitoreo.

- b) Usar métodos no lineales de análisis.

- c) Identificar el efecto de los factores ambientales.

- d) Trabajar con estructuras reales.

Si las diferencias entre la respuesta medida y la calculada se deben a deterioro o daño de la estructura, el procedimiento de ajuste del modelo teórico con el real se complica notablemente. En este caso se tendrá que resolver el problema de localización y estimación de daño. Con este objetivo han sido desarrollados diferentes métodos como (Escobar, 2007):

- Métodos basados en los cambios de las formas modales (por Alampalli en 1995);

- TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS
- Métodos de reconocimiento de patrones (por Kim y Stubbs en 1993);
 - Métodos basados en la matriz de flexibilidades (por Peterson en 1995);
 - Métodos de sensibilidad (por Stubbs y Osegueda en 1987; y Escobar en 1998);

- Métodos basados en la diferencia entre las matrices de rigideces y flexibilidades (por Lin en 1990);

- Métodos de fuerzas residuales (por Ricles y Kosmatka en 1992);
- Redes neuronales artificiales (por Ferregut en 1995).

Algunos de los métodos de detección de daño mencionados calculan los cambios en los parámetros modales (frecuencias de vibración, formas modales y coeficientes de amortiguamiento) de las estructuras. Al comparar los parámetros correspondientes al estado no dañado (parámetros modales base) con los obtenidos de una condición de daño estructural se detecta el daño. Otros métodos utilizan estos parámetros modales para ajustar matrices de rigidez y medir los cambios en estas para identificar los elementos estructurales dañados. Cualquiera que sea el caso, es importante tener en cuenta que todos estos estudios tienen un grado de incertidumbre debido a la naturaleza de las señales utilizadas para estimar estos parámetros modales (Rodríguez, 2007).

Todos estos métodos poseen ventajas y desventajas para localizar y estimar daño estructural. La idea común en todos ellos consiste en identificarlo sin afectar la integridad de las estructuras comparando información de un estado dañado con uno de referencia. Esto es, el daño se determina relacionando el cambio de las características dinámicas con el de las propiedades de la estructura que las definen, particularmente con su rigidez. Así, a cada estado

de daño le corresponderá una matriz de rigideces diferente. Entonces, un estado de daño, y su evolución, puede detectarse a partir de las diferencias observadas entre estas matrices. Al conocer la matriz de rigideces de la estructura no dañada (estructura de referencia) y su matriz de rigideces determinada a partir de sus características dinámicas medidas después de ocurrir un sismo, es posible localizar el daño que éste le causó (Escobar, 2007).

3.4.3. Búsqueda global

El método de búsqueda global se enfoca al problema de localización de daño mediante la identificación de cambios en los parámetros estructurales a partir de la propagación de ondas de alta frecuencia en la estructura. La base de este método radica en tres módulos básicos, la primera la existencia de un modelo estructural de M.E.F. previamente calibrado que represente el comportamiento dinámico de la estructura en su condición de referencia o "sin daño"; la segunda, la parte experimental, cuyo objetivo es obtener la respuesta dinámica de la estructura ante una excitación de la misma en puntos específicos de interés, es decir, recolectar las ondas de propagación que pasan en un punto de la estructura; y la tercera, un algoritmo que almacena, compara, evalúa las respuestas dinámicas experimentales con las generadas por el modelo de elemento finito de la estructura (Quintana, 2009).

Una de las partes fundamentales para la aplicación del "método de búsqueda global" es el diseño de la prueba experimental. Las pruebas experimentales consisten en la medición de la respuesta de la estructura por efecto de una fuerza de excitación conocida en condiciones de prueba controladas. En el diseño de la prueba experimental se debe tomar en cuenta las características del sistema de adquisición de datos, el tipo de sensores, la frecuencia de excitación, la velocidad de muestreo y la distribución de los sensores en la estructura; todo ello para garantizar que la señal adquirida corresponda a las respuestas dinámicas de la estructura (Quintana, 2009).

3.4.4. Detección de daño (problema hacia adelante)

El Problema Hacia delante: Estos métodos caen usualmente en el Nivel 1 (determinación de la presencia de daño en la estructura) de la identificación de daños y consisten en calcular el cambio en las frecuencias modales a partir de un tipo de daño conocido. Comúnmente el daño se modela matemáticamente y posteriormente, para determinar el daño, las frecuencias medidas son comparadas con las frecuencias predichas (Gomez, 2012).

3.4.5. Detección de daño (problema hacia atras)

El Problema Inverso: Estos métodos se ubican por lo general en los Niveles 2 (determinación de la localización geométrica del daño) y 3 (cuantificación de la severidad del daño) de la identificación de daños, consisten en calcular los parámetros de daño como pudieran ser la longitud y/o localización de una grieta, a partir de cambios en las frecuencias (Gomez, 2012).

Estas técnicas experimentales se pueden referencia como el problema inverso a la determinación de las características dinámicos de un modelo matemático, esto es, a través de la respuesta de un sistema se trata de inferir las ecuaciones del mismo, y por tanto las características físicas que lo determinan dinámicamente. Estas propiedades que definen al sistema, son los llamados parámetros modales.

El análisis experimental es el problema inverso, esto es, a través de la respuesta de un sistema trata de inferir las ecuaciones del mismo, y por tanto las características físicas que lo determinan dinámicamente. Estas propiedades que definen al sistema, son los llamados parámetros modales (Atienza, 2004).

3.4.6. Detección de daño (teorema de Bayes)

Una aproximación en el patrón de reconocimiento usando el teorema de Bayes (que expresa la probabilidad condicional de un evento aleatorio A dado B en términos de la distribución de probabilidad condicional del evento B dado A y la distribución de probabilidad marginal de sólo A) determina el evento de daño más probable comparando las respectivas probabilidades de daño de los eventos de daño diferentes. Los datos estadísticos son obtenidos de las mediciones de vibración ambientales o forzadas ininterrumpidas o periódicas. La respectiva probabilidad de daño de un evento de daño es obtenida usando la diferencia entre las frecuencias medidas y formas de modo y éstos pronosticados por el modelo analítico. Tanto medición como los errores de modelado pueden ser considerados explícitamente. El objetivo del enfoque es determinar si los parámetros medidos vienen de una estructura sana o deteriorada.

Las coordenadas de los puntos de control se entregan en el mismo sistema de coordenadas de la estructura sana. Esto resulta en un modelo de redes donde se traslapan los diferentes resultados obtenidos para los puntos en los que se entregan los valores para el movimiento en cada forma individual. Estos valores son valores fijos y sólo se animan a través de las frecuencias (análogos a los de cálculo). Sólo los puntos individuales que están conectados de una manera lineal se mueven para hacer la comparación entre el cálculo y la medición posible (Wenzel and Pichler, 2005).

3.4.7. Detección de daño basado en el cambio de curvatura

Haciendo un análisis de las formas de los modos, surge una pregunta: ¿en que punto del elemento estructural será la localización con mayor sensibilidad a percibir los cambios de modo?, una forma de responder lo anterior es el considerar la pendiente del modo, que será la primera derivada de su función (Wolff, 1989).

La curvatura de la forma modal es un parámetro sensible a la pérdida de rigidez debido al

daño ya que la forma deformada del mismo elemento está en función del modo. La pérdida de un miembro, por ejemplo, puede causar un cambio repentino en la primera derivada de la forma modal (pendiente) y segunda derivada (curvatura o deformación) (Gandomi, 2008).

La existencia de una rajadura o daño en cualquier sección de una estructura reducen la rigidez en la ubicación del cuarteamiento. La reducción en EI resulta en un aumento en la magnitud de la curvatura ya que esta dada por la relación del momento y EI, donde M es el momento en la sección. Debido a que los cambios en la curvatura son locales, los cambios de curvatura pueden ser utilizados para detectar, ubicar y cuantificar el daño. La diferencia total en la curvatura a la que el modo da forma entre la estructura dañada e intacta es esperada indicar un máximo en la región deteriorada (Salawu, 2001).

Cuando solamente algunos miembros están deteriorados, un método mejorado de detectar la ubicación del daño es usar la curvatura. La curvatura de forma parece ser más consciente de la pérdida de la rigidez debido a que el miembro dañado cambia de forma. Por ejemplo, la pérdida de un miembro podría causar la primera (pendiente) de derivado de la forma y segundo derivado (curvatura o tensión) a un cambio repentino en el modo. La observación de estos derivados de modal, particularmente la tirantez porque puede ser medido fácilmente, puede ayudar ubicar el daño en la estructura. Sin embargo, si el daño es distribuido durante toda la estructura, la tensión no podría ser un buen indicador del daño si un dato inicial de medición de punto de partida de la estructura intacta no está disponible. Incluso sin el dato como punto de partida, es posible ubicar el daño observando las anomalías en el perfil de desviación o cambios en curvatura.

Este método puede ser útil para detectar la ubicación de daños en una estructura que se deforma principalmente en flexión (Dawari, 2012; Silva, 2009). Como la curvatura es inversamente proporcional a la rigidez flexión como se demuestra en la ecuación:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{M(x)}{EI}$$

Donde $M(x)$ es el momento de flexión en la ubicación x , E es el Módulo de Young de elasticidad e I es el momento de inercia de la sección transversal. Es evidente a partir de la ecuación, cualquier reducción en la rigidez a la flexión (EI) debido al daño dará lugar a un aumento de la curvatura, y que la diferencia entre las formas de pre y post de modo curvatura daño será más grande en el lugar de los daños (Hamze, 2012).

La primera parte de la ecuación anterior, representa la curvatura a una distancia x . Como los daños reducen la rigidez de flexión, la curvatura aumentará en la cercanía del daño, por lo que comparando las curvaturas pre y post daño podrán ubicarse dichos efectos. La derivada de las formas modales, tales como curvaturas de forma, es un parámetro sensible a pequeñas perturbaciones de los desplazamientos modales y , por lo tanto, puede ser utilizado también para detectar el daño (Dawari, 2012).

La curvatura de la forma modal puede obtenerse de las componentes de los desplazamientos medidos para la forma modal de interés, como:

$$\frac{(\Phi_i)^{k+1} - 2(\Phi_i)^k + (\Phi_i)^{k-1}}{h^2}$$

El método de la curvatura de la forma modal, es útil para determinar la ubicación del daño pero no puede proporcionar una estimación de su gravedad. Además, la utilidad del método está limitada a estructuras cuyo modelado puede simplificarse al grado de representarse como vigas (en el caso de puentes) o péndulos invertidos (en el caso de edificios) (Silva, 2009).

Es un método de detección de daño con un amplio campo de aplicación dentro de la ingeniería de diseño sísmico, su objetivo es la detección de anomalías en la estructura a nivel local para el mejoramiento de la propuesta de diseño estructural. La hipótesis en la que se basa es que la curvatura de cualquier elemento estructural cambia su forma dependiendo de la variación de las condiciones de carga que inciden en la estructura, ya sean locales o globales y, mediante el conocimiento del comportamiento no lineal del elemento a analizar, es posible

predecir ante que condiciones dicho elemento puede ser afectado.

El uso de la curvatura en la identificación de daños se basa en el supuesto de que los cambios en las curvaturas de las formas modales son muy localizados en la región de los daños, de esta manera la reducción del EI (modulo de elasticidad e inercia) producen un aumento de la curvatura en la sección. Dado que las variaciones de la curvatura son locales y dependen de la reducción del EI, se pueden utilizar para detectar, localizar y cuantificar los daños. Por lo tanto, se espera que la diferencia absoluta entre la curvatura de las formas modales de la estructura sin daño y la estructura dañada nos proporcionará la región dañada (Sotelo y Acevedo, 2009).

(Padley, 1991), mediante el ejemplo numérico de una viga, demostró que es posible la localización de daño mediante el reconocimiento de la curvatura que un elemento adquiere, esto lo realizó mediante el análisis de las etapas por las que pasa el elemento desde que está en reposo, pasa por una etapa de daño hasta llegar a la falla total o resistencia última.

De inicio el método requiere la disposición del modelo analítico que idealiza la estructura, el cual al ser sometido a una excitación externa, tendrá una respuesta dependiendo de la magnitud de la misma. La cual, bajo las mismas circunstancias de excitación externa, y en conjunto con la existencia de daño, la estructura tendrá como respuesta una amplificación de efectos (desplazamientos y esfuerzos) (figura 23).

Las curvaturas de forma modal reaccionan sensiblemente a los cambios estructurales. Por lo tanto son adecuadas para la localización de daños. Las curvaturas pueden calcularse directamente a partir de las formas de los modos identificados por aproximación diferencia central. Es aconsejable para suavizar los datos de medición ruidosos para determinar la curvatura por derivación analítica (Stewering, 2006).

La forma más cercana a realizar dicha aproximación será una expresión en función del

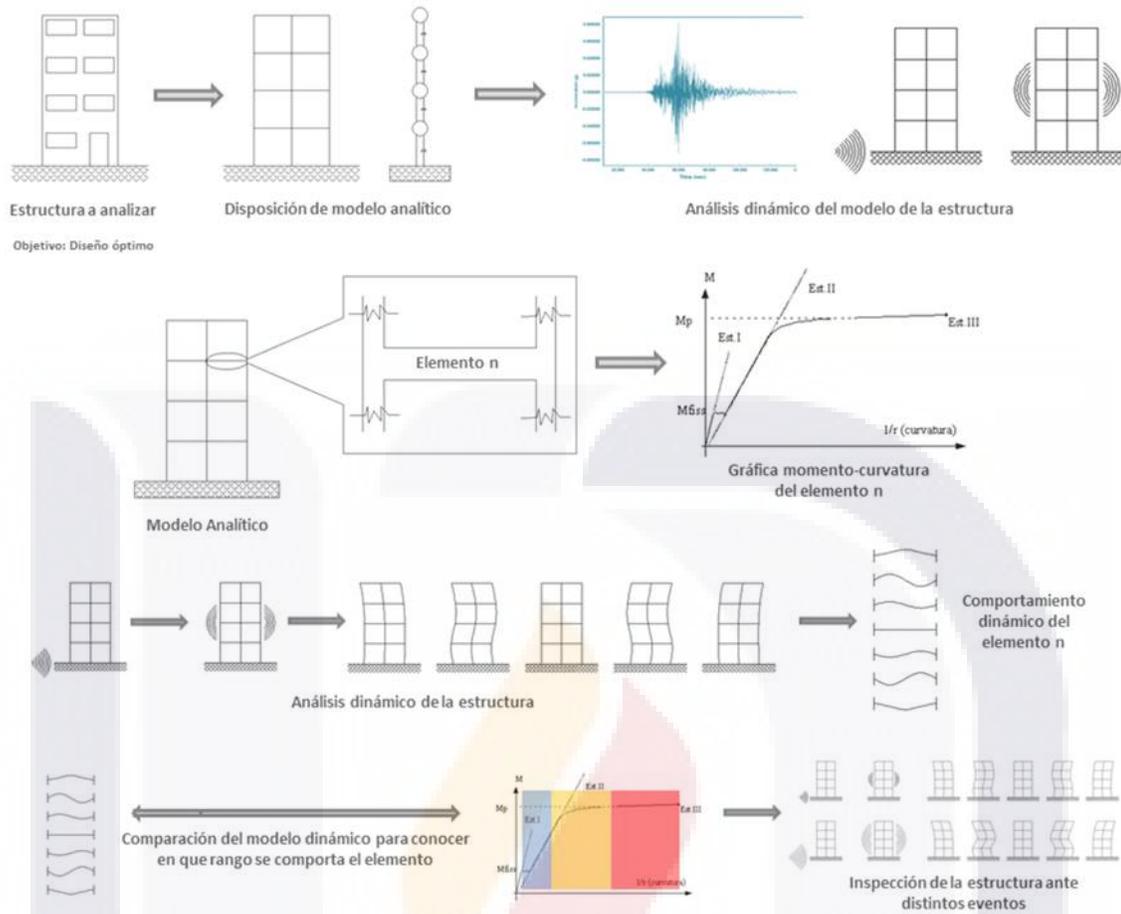


Figura 3.11: Detección de daño basado en el cambio de curvatura.

seno y coseno (Blevins, 1979). Por ejemplo la forma más cercana para una viga será:

$$FormaModal_i(x) = \sin\left(\frac{i\pi x}{L}\right)$$

Un punto de nodo de un modo es definido como un punto donde su forma de modo es cero. Un punto de nodo también puede ser definido en una dirección específica. Por ejemplo, todos puntos donde el forma de modo es cero en una dirección normal al plano de una superficie puede ser considerado como un punto de nodo. Una línea de nodo.

3.4.8. Detección de daño basado en el cambio de frecuencia

Este método en un inicio fue una aplicación en el sistema de inspección de modal de transbordador espacial de administración espacial norteamericana (Hunt, et al., 1990). Debido a las dificultades de acceso a la superficie exterior causada por el sistema protector térmico, un sistema de detección de daño vibración basado en fue desarrollado. Este sistema identificó daño que se habría eludido los métodos de prueba no destructivos tradicionales debido a la inaccesibilidad a los componentes dañados, y ha sido adoptado como una herramienta de inspección estándar para las estructuras de orbitador de Space Shuttle.

Es conocido que los parámetros modales de una estructura (la frecuencia y formas de modo) están en función de sus propiedades físicas (la masa, el amortiguamiento y la rigidez). Los parámetros modales son la solución de la ecuación diferencial del movimiento que están en función de la masa, amortiguamiento y la rigidez de la estructura. Por lo tanto, cualquier cambio en las propiedades físicas causará los cambios en las propiedades modales. Dado que las formas modales cambiarán cuando un cambio físico ocurra, un método para detectar el cambio es valorar el modo de vibración obtenida de las pruebas realizadas (Wolff, 1989).

La relación física entre rigidez, masa y frecuencias naturales junto con la facilidad de la medición de estas (solo un sensor se requiere en muchas aplicaciones) fue el impulso para la utilización de estos métodos. Donde, básicamente, a partir de variaciones de la frecuencia natural es posible identificar la presencia, estimar la localización y cuantificar el daño en una estructura. Esta técnica se clasifica dentro de los métodos que requieren datos experimentales y modelos analíticos (Sotelo y Acevedo, 2009). Entre todas las características de vibración estructurales la frecuencia natural es relativamente simple y exacta de medir, suministra la información de daño global de la estructura, puede exactamente ser medida por técnicas modernas con sensores y el uso del análisis de modal experimental. Lo más importante es que puede ser obtenida fácilmente incluso con un bajo nivel de excitación mediante vibración ambiental (Zhu, 2005).

El cambio de frecuencias naturales puede ser considerado como uno de los métodos de detección de daños más comunes en los procedimientos de evaluaciones estructurales. Cuando existe un daño en una estructura, la rigidez se reduce y, en consecuencia decreciente de las frecuencias naturales del sistema observado. Una de las mayores ventajas de esta técnica de detección es que las mediciones de frecuencia se pueden realizar rápida y fácilmente (con la ayuda del equipo correcto). Además, las técnicas experimentales utilizadas para la determinación de frecuencias de resonancia son técnicas clásicas de medición de vibración; permitiendo así que las mediciones de vibración para ser extensa con un gran número de puntos de medición y un procedimiento experimental muy barato. Otra ventaja es que las mediciones de frecuencia se pueden extraer con una precisión de confianza, y las incertidumbres en las frecuencias medidas se pueden estimar fácilmente si las mediciones experimentales se realizan con un control perfecto de las condiciones experimentales. Por otra parte, el conocimiento del comportamiento dinámico global de sistemas no dañadas es muy fácil de obtener mediante el uso de la evolución de análisis o modelos de elementos finitos; permitiendo de este modo los puntos de medición a ser adecuadamente elegidos para no sólo una detección rápida y eficiente de los cambios en las frecuencias sino también la identificación de la ubicación de la avería y la gravedad (Jaques, 2013).

Debido a que las frecuencias naturales pueden proveer la información global de las estructuras, pueden exactamente ser medidas por técnicas modernas con sensores y el uso del análisis de modal experimental, lo más importante es que pueden ser obtenidas fácilmente incluso con un bajo nivel de excitación como en la prueba ambiental (Zhu, et al., 2005). El cambio medido en las características de vibración como consecuencia de variación de las características de la estructura es un indicador de daño. El indicadores de daño más común es el cambio en la frecuencia natural, así como su cambio en las formas de modo de vibrar, muchas otras formas de las características de vibración globales pueden ser extraídas de las mediciones de vibración de dominio de tiempo sin procesar (Prabhu, e al. 2011).

Muchos investigadores han reconocido que las frecuencias, coeficientes y formas de mo-

do de una estructura no sirven como índices de detección de daño que sean seguros. Por ejemplo, el cambio en 20 de las frecuencias de un puente, después de que cedió el paso bajo un equivalente de carga progresivamente creciente, siendo dicho cambio de frecuencia menor al 5 por ciento. Ningún cambio apreciable fue percibido en los formas de modo. También ha sido observado que, debido a los cambios en las condiciones ambientales, los cambios en algunas frecuencias y modo dan forma a amplitudes exceder dentro del que 5 por ciento han sido medidos para tanto puentes de acero como de concreto en un sólo día (Aktan, 2001).

Los modos de vibración de una estructura pueden variar su amplitud o forma cuando se origina una grieta. De la misma forma, un daño puede provocar la aparición de nuevos modos. Ya que puede suprimir algunas restricciones en la estructura (uniones entre barras, arriostramientos, etc.) con lo se producirán movimientos que antes del daño estaban limitados (Moran, 2011).

Es un método sencillo y rápido de aplicar que consiste en calcular la diferencia entre la frecuencia natural del modelo analítico y el experimental, obteniendo un valor para cada uno de los N modos calculados. Es importante comparar la frecuencia para el mismo modo, entre modos relacionados entre sí:

$$Dif_{frecuencia}(\%)_i = \frac{\omega_{ai} - \omega_{ei}}{\omega_{ei}} 100$$

El comportamiento dinámico de las estructuras es definido por el espectro discreto de un infinito número de frecuencias naturales y sus correspondientes modos de vibración, los cuales son determinados en función de la geometría, distribución de masas, rigideces y condiciones de contorno. Entre esos parámetros, los cambios en la rigidez están directamente relacionados con cambios en las condiciones de seguridad de la estructura (Barrios, 2014).

En forma teórica el análisis modal tradicional plantea la ecuación del movimiento, se supone una forma de la respuesta y se impone que esta cumpla la ecuación que gobierna el movimiento del sistema, lo que supone resolver un problema de auto-valores y auto-vectores.

Este problema puede ser un proceso largo cuando se trabaja con sistemas de varios grados de libertad. Para obtenerla ecuación de movimiento se precisa calcular las matrices de masa y rigidez y los factores de amortiguamiento. En el análisis modal clásico los parámetros modales se obtienen de las F.R.F.'s, que relacionan la salida (respuesta) con la entrada (excitación). Para este tipo de análisis es necesario conocer la entrada y la salida del sistema (Moran, 2011). Para aplicar el presente método es posible apoyarse mediante el análisis modal experimental, el cual puede definirse como el proceso de caracterización de las propiedades dinámicas de un sistema estructural en términos de sus modos de vibración y frecuencias naturales medidas en un modelo de laboratorio o en la estructura real en el campo. El análisis modal experimental se puede efectuar de dos maneras: a) excitando la estructura con una carga armónica de frecuencia creciente (o decreciente) hasta encontrar los picos de las Funciones de Respuesta en Frecuencia (F.R.F.); b) aplicando una única excitación transitoria (impulsiva o aleatoria) y empleando la transformada de Fourier y el método de Respuesta en Frecuencia para hallar las F.R.F. La manera más simple de obtener las frecuencias naturales es graficando el módulo (o amplitud) o la parte imaginaria de una de las Funciones Respuesta en Frecuencia $H(\omega)$. Las frecuencias naturales son aquellas en donde el modulo o la parte imaginaria tienen un pico. De igual forma se podría graficar la parte real de la función $H(\omega)$, y en este caso las frecuencias naturales están en los puntos donde la curva intercepta el eje de frecuencias, o sea donde la parte real es cero (Vazquez, 2005). Las frecuencias modales se determinan observando los picos de la F.R.F. pero la identificación de los amortiguamientos modales no es tan sencilla y a menudo son parámetros medidos con un cierto grado de incertidumbre. Los modos se pueden obtener observando la parte imaginaria de los espectros de frecuencia de los nodos de la estructura cuyos picos, como ya se ha dicho, son las frecuencias naturales. Dichos picos contienen la información de la amplitud de cada uno de los modos de vibración. El modo de vibración se representa uniendo las amplitudes de los picos que aparecen en una determinada frecuencia (Galvin, 2008).

Con el objetivo de registrar las características más significativas de las estructuras, los instrumentos de medición deben ubicarse en aquellos puntos en los que se presente la mayor

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

variación de su respuesta. Además, es recomendable instalarlos en áreas retiradas de equipos mecánicos y de personas; ya que pueden distorsionar los resultados de la señal (Gallote, 2008). Existen distintos criterios para instrumentar un edificio, estos han sido desarrollados a través del tiempo, por la experiencia adquirida al realizar distintas pruebas y por el conocimiento de nuevos métodos de análisis de las características estructurales. La localización de instrumentos sísmicos está en función de las características propias de la estructura tales como su geometría y, además, del número de aparatos con que se cuente.

Los instrumentos sísmicos deben estar ubicados en aquellos puntos en los que se presente una mayor variación de la respuesta estructural, para captar las características más significativas. Es recomendable instalar los acelerómetros en áreas retiradas de equipos mecánicos o de personas; ya que pueden distorsionar los resultados de la señal. La localización de instrumentos sísmicos está en función de las características propias de la estructura como geometría y, además, del número de aparatos con que se cuente. Esto último, porque generalmente se tiene como limitante principal el aspecto económico que impide cubrir todos los puntos de interés. Por ello, es necesario considerar un mínimo de instrumentación (Galiote, 2006).

Las técnicas de medición de análisis modal operacional y experimental están sujetas a efectos de ruido que contaminan los datos experimentales. La configuración de sensores debe contar con la existencia de éstos. De esa manera, se puede determinar el número de sensores necesarios que deben ser empleados en las pruebas experimentales. Por lo tanto, un cierto nivel de certeza es necesaria para demostrar la calidad de la configuración de sensores. Los efectos de ruido son incorporados numéricamente al modelo de elementos finitos para simular las consecuencias. La relación señal/ruido, más conocido por su nombre en inglés signal-to-noise ratio (S.N.R.) es empleado para la medición del nivel de ruido. El S.N.R. es definido como el ratio potencial entre la señal (información significativa) y el ruido de fondo (información no deseada) (E. M. Ramos, 2012).

$$SNR = \frac{P_{signal}}{P_{noise}}$$

En este caso el ruido es añadido a la información significativa de los objetivos obtenidos en la O.S.P., añadido a las formas modales. Han sido considerados diferentes niveles de S.N.R., desde el caso de un ruido muy leve (S.N.R.=40 dB), un nivel medio (S.N.R.=30 dB) y en el caso de un nivel de ruido bastante alto (S.N.R.=10 dB). En el caso ideal de que no haya ruido, la evolución del error para diferentes configuraciones de sensores refleja cómo este valor mejora cuando se incrementa el número de sensores.

El éxito del monitoreo estructural depende en gran medida de la correcta interpretación de la información que se obtiene a través de los sensores. Es por ello que la selección del tipo de sensores, la ubicación de éstos, la configuración del sistema de adquisición de datos (frecuencia de monitoreo) y el post-procesamiento de datos, son fundamentales para obtener información suficiente, pero no excesiva, para poder identificar cambios que pudieran estar asociados con condiciones de daño o falla. Dada la gran cantidad de datos que se pueden obtener, es importante tener estrategias de análisis y reducción de datos para calcular indicadores de desempeño que sirvan, a largo plazo, para identificar variaciones críticas. Lo anterior no obsta la importancia de la información medida directamente, ya que es la que se emplea para calibrar modelos de simulación y en algunos algoritmos para identificación de daño. En todo caso, la configuración del sistema de sensores es fundamental y de éste depende la sensibilidad del sistema para identificar los potenciales problemas que pudieran llegar a presentarse en un determinado puente. La sensibilidad al cambio en la respuesta dinámica de la estructura está, en gran parte, influenciada por el arreglo de los sensores en la estructura (Perez, 2012).

Los métodos basados en cambios de las frecuencias modales tienen limitaciones prácticas importantes, ya que, al analizar estas como una propiedad global de la estructura, no es muy claro que cambios en este tipo de propiedades sean útiles para determinar la información espacial de la localización del daño en la estructura sobre la que se implementan (Gomez, 2012).

La detección de daño a partir de datos entre modos de vibrar corresponde al proceso de inversión que se basa en la relación entre los parámetros de los modos de vibrar y las propiedades estructurales. Si hay cambios en las propiedades de la estructura, los parámetros de los modos de vibrar cambiarán en consecuencia. Así la ubicación y niveles de gravedad del daño pueden ser determinados por el análisis de los cambios en los parámetros modales. Esta relación permite la aplicación rigurosa de algoritmos matemáticos para llevar a cabo el análisis inverso. La mayoría de los enfoques actuales de uso convencional de algoritmos matemáticos están basados en reglas, como la optimización y lógica difusa. Sin embargo, los convencionales basados en normas, son métodos que consumen mucho tiempo y pueden requerir algunas decisiones arbitrarias por parte del usuario (M. A. Perez, 2012).

Los métodos de identificación de daño mediante el uso de las formas modales ha demostrado que dicho enfoque es potencialmente útil para la evaluación de la integridad de las estructuras. Las formas de los modos obtenidos (experimentalmente) a partir de pruebas de vibración periódica pueden ser utilizados para evaluar la condición estructural (Gandomi, 2008). Numerosos estudios indican que el incremento del daño estructural se refleja en una reducción de las frecuencias naturales de la estructura (Barrios, 2014).

El comentario de que los cambios en las propiedades estructurales causan los cambios en las frecuencias de vibración era el incentivo para usar métodos de modal para la identificación de daño y la observación de salud. Las frecuencias modales son una propiedad global de la estructura, no está claro que los cambios en este parámetro pueden ser use identificar un nivel de daño. En otras palabras, las frecuencias no pueden proveer la información espacial sobre los cambios estructurales en general. Una excepción para esta limitación existe en las frecuencias modales más altas, donde los modos son relacionados con las reacciones locales. La frecuencia provee múltiples cambios que pueden proveer la información espacial sobre el daño estructural porque los cambios en la estructura en ubicaciones diferentes causarán combinaciones diferentes de los cambios en las frecuencias modales.

El análisis estructural es una técnica de extensamente aplicada para obtener las características dinámicas de una estructura y sus componentes sujetos a cargas dependientes del tiempo. Algunas clases de pruebas (por ejemplo: el análisis de modal), requieren que muchos ciclos pruebas analíticas se desarrollen para obtener datos estadísticamente suficientes para comprender el comportamiento estructural de un modelo. La calidad de prueba es definida a través de dos parámetros; la definición de un modelo físico que describa el sistema estructural, y la validación que demuestre que la información obtenida sea correcta. Una prueba estructural bien ejecutada provee pruebas objetivas del comportamiento estructural (Kumar, 2008). Las características de una estructura son influidas en por muchos parámetros como las propiedades de material, el sistema de construcción, las técnica de fabricación, los ambiente de carga y las condiciones de frontera. La influencia de estos parámetros no es lineal, haciendo el pronóstico de modelos adaptados difícil. Cuando es posible, las pruebas analíticas son recomendadas para el pronóstico exacto de las características del sistema.

Estudios sobre la frecuencia natural y el modo de vibrar muestran que las funciones de transmisibilidad entre acelerómetros eran particularmente sensibles a los cambios estructurales más diminutos, de las etapas más tempranas de la degradación. Esto es un método simple de ser aplicable y es utilizado para el análisis de puentes reales.

Debe ser notado que los cambios de frecuencia tienen limitaciones prácticas importantes para su aplicación; la sensibilidad del equipamiento para detectar cambios de frecuencia requiere de medidas muy precisas de adquisición de datos. Sin embargo, los estudios recientes han mostrado que las frecuencias resonantes tienen menor diferencia estadística de fuentes de error aleatorias que afecten los parámetros modales.

Hay que tomar en cuenta que: "la frecuencia no pueden proveer la información espacial sobre los cambios estructurales en general". Una excepción para esta limitación es que en una frecuencia modal más alta, donde los modos son relacionados con las reacciones locales. La frecuencia provee múltiples cambios que pueden dar la información espacial sobre el daño

estructural, porque los cambios en la estructura en ubicaciones diferentes causarán combinaciones diferentes de los cambios en la frecuencia modal. Entre todas las características de vibración estructurales la frecuencia natural es relativamente simple y exacta de medir, suministra la información de daño global de la estructura, puede exactamente ser medida por técnicas modernas con sensores y el uso del análisis de modal experimental. Lo más importante es que puede ser obtenida fácilmente incluso con un bajo nivel de excitación mediante vibración ambiental (Zhu, et al., 2005).

3.4.9. Detección de daño basado en el cambio de flexibilidad

Otra clase de métodos utilizados para la identificación de danos se basan en el uso de la matriz de flexibilidades medida dinámicamente para estimar cambios en el comportamiento estático de la estructura. Debido a que la matriz de flexibilidades está definida como la inversa de la matriz estática de rigideces, puede emplearse para relacionar las fuerzas estáticas aplicadas y el desplazamiento resultante en la estructura (Gomez, 2012).

La matriz de flexibilidad es el inverso de la matriz de rigidez. La matriz de flexibilidad puede ser obtenida con gran precisión solo con la matriz de masas normalizadas y las eigenfrecuencias, la matriz de flexibilidad es expresada de la siguiente forma:

$$K^{-1} = \hat{\Phi} \cdot \Omega^{-1} \cdot \hat{\Phi}^T$$

Para las condiciones:

$$\hat{\Phi} = [\hat{\phi}_1, \hat{\phi}_2, \dots, \hat{\phi}_n]$$

Que son las masas normalizadas para la forma modal i .

Y la matriz diagonal de frecuencias (para la forma modal i):

$$\Omega = \text{diag} [\omega_i^2]$$

Los métodos de detección de daño basados en el cambio de flexibilidad operan diferenciando las matrices para los sistemas dañado y no dañado. El cambio de flexibilidad es expresado en general como un valor absoluto o relativo. Tomando en consideración las entradas de la diagonal de la matriz de flexibilidad, (Yan, 2004) formuló un indicador relativo de daño:

$$\text{rel}\Delta K_{ii}^{-1} = \frac{K_0^{-1}{}_{ii} - K_d^{-1}{}_{ii}}{K_0^{-1}{}_{ii}} \cdot 100$$

Hay que tomar en cuenta el hecho de que elementos con mínima flexibilidad, como es el caso de aquellos cercanos a los apoyos son susceptibles a que los resultados lanzan errores numéricos, esto puede ser explicado con el ejemplo de la viga en cantiliver, analizando el elemento desde el extremo libre hasta el empotramiento la flexibilidad analítica, en etapas tempranas antes del daño va a ser igual a la flexibilidad sin daño teóricamente.

Diferentes métodos de localización de daño, como el basado en cambio de flexibilidad, operan utilizando la normalización de las masas, esto requiere la determinación de un factor escalar a:

$$\hat{\phi}_i = \alpha_i \cdot \phi_i$$

Si, la masa de la estructura y su distribución son datos conocidos, la matriz de masa puede ser estimada, la calidad de la normalización esencialmente depende la reductibilidad de las propiedades del sistema con un limitado número de puntos, para cada forma modal por este medio el factor escalar puede ser determinado como:

$$\alpha_i = \frac{1}{\sqrt{\phi_i^T \cdot M \cdot \phi_i}}$$

La base de la normalización con un definido cambio en la masa es la sensibilidad del cambio de la eigenfrecuencia respecto a los cambios locales de la masa. Para pequeños cambios en la masa, la relación entre el cambio de la masa y el cambio de la eigenfrecuencia es

lineal. A partir de lo anteriormente deducido, (Parloo, 2002) desarrolló un método basado en la sensibilidad de normalización, con el conocimiento de la perturbación que tiene la masa, el factor escalar para cada forma modal puede ser obtenido con los cambios de masa de los n-G.D.L. como:

$$\alpha_i = \sqrt{\frac{-2\Delta\omega_i}{\omega_i \sum_{k=1}^N \Delta m_k \phi_i^2 k}}$$

3.4.10. Detección de daño basado en el cambio de rigidez

Una variante en el uso de la matriz de flexibilidad medida dinámicamente es la utilización de la matriz de rigidez medida dinámicamente, ésta se daña como la pseudo-inversa de la matriz de flexibilidad medida dinámicamente (Gomez, 2012).

Al observar que los cambios en la rigidez de los elementos que componen una estructura influyen directamente sobre su rigidez lateral, se propone un método basado en la matriz de transformación geométrica para localizar y estimar daño en elementos estructurales de edificios. El daño está expresado como la pérdida de rigidez. Con este método es posible determinar dónde se ha dañado la estructura y estimar el porcentaje de degradación de su rigidez (Escobar, 2007).

$$\begin{pmatrix} (k_1 + k_2) & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & k_n \end{pmatrix}$$

A cada estado de daño le corresponderá una matriz de rigideces diferente. Entonces, un estado de daño, y su evolución, puede detectarse a partir de las diferencias observadas entre estas matrices. Al conocer la matriz de rigideces de la estructura no dañada (estructura de referencia) y su matriz de rigideces determinada a partir de sus características dinámicas medidas después de ocurrir un sismo, es posible localizar el daño que éste le causó (Escobar, 2007).

Tradicionalmente el cambio de curvatura de los elementos es uno de los factores que brinda más confiabilidad en la evaluación de la pérdida de rigidez, debido a que el miembro dañado cambia de forma. En conjunto con el análisis no lineal es la herramienta principal para desarrollar los métodos de diagnóstico de estructuras de concreto armado y acero debido a la simplicidad de su planteamiento basado en la ductilidad de los materiales. Podremos plantear que:

$$Dif_{rigidez} = \frac{k_i - k_f}{k_1} \cdot 100$$

Al observar que los cambios en la rigidez de los elementos que componen una estructura influyen directamente sobre su rigidez lateral, se propone un método basado en la matriz de transformación geométrica para localizar y estimar daño en elementos estructurales de edificios. El daño está expresado como la pérdida de rigidez. Con este método es posible determinar dónde se ha dañado la estructura y estimar el porcentaje de degradación de su rigidez. A cada estado de daño le corresponderá una matriz de rigideces diferente. Entonces, un estado de daño, y su evolución, puede detectarse a partir de las diferencias observadas entre estas matrices. Al conocer la matriz de rigideces de la estructura no dañada (estructura de referencia) y su matriz de rigideces determinada a partir de sus características dinámicas medidas después de ocurrir un sismo, es posible localizar el daño que éste le causó (Escobar, 2007).

3.4.11. Detección de daño basado en el cambio de formas modales

Cambios de formas modales: Son numerosos los investigadores que han utilizado este criterio para desarrollar métodos de identificación de fallas, buena parte de ellos usan el criterio de seguro modal (M.A.C., en sus siglas en ingles) para determinar el nivel de correlación entre los modos para determinar la presencia de daño (Gomez, 2012).

Método del Cambio de la forma modal: La medición de las formas modales de una estructura requiere ya sea un solo punto de excitación y muchos sensores o un excitador itinerante con uno o más sensores fijos. Muchos análisis modales disponen de técnicas para la extracción de la forma modal a partir de los datos medidos en el dominio del tiempo. Los métodos de detección se han desarrollado mediante la identificación directa de las formas modales o las curvaturas de las formas modales (Sotelo y Acevedo, 2009).

3.4.12. Criterios de confiabilidad modal

Una forma modal es una desviación de patrón asociado con una frecuencia natural particular. Se representa el desplazamiento relativo de todas las partes de una estructura para ese modo particular, y por lo tanto puede proporcionar la información espacial. Las formas del modo normalizado se caracteriza por el hecho de que todas las partes de la estructura están moviendo entre sí. De este modo, se pueden considerar como ondas estacionarias con líneas de nodos fijos. Si una estructura tiene daño localmente, de forma que los cambios de modo se producen en las proximidades de ese daño. Por lo tanto, una comparación entre dos conjuntos de datos de forma de modo (ya sea mediciones de forma de modo directo o sus derivados) se puede utilizar para identificar daños.

Un daño en la estructura produce variaciones en las formas modales de esta, en su forma y su amplitud; además, el daño puede provocar la generación de nuevas formas modales asociadas a la estructura. Por lo cual es posible detectar la presencia del fallo al notar dichos cambios. Dos métodos comúnmente utilizados para comparar dos conjuntos de formas modales son el Criterio de Confiabilidad Modal (M.A.C., con sus siglas en inglés) y el Criterio de Confiabilidad Modal Coordinado (Co.M.A.C., con sus siglas en inglés) (Dackermann, 2010). El primero se puede definir como una medida de la similitud de dos formas modales, donde el valor de M.A.C.=1 es una combinación perfecta y un valor de M.A.C.=0 significa que son completamente diferentes, con lo cual la tendencia al valor cero puede ser vista como la presencia de un daño. El segundo método Co.M.A.C. es una medida de la diferencia

entre dos conjuntos de formas modales que toman un valor entre 1 y 0, un bajo indicador de Co.M.A.C. predice la presencia de un daño (Anaya y Barajas, 2011).

El primer nivel de correlación que usualmente se lleva a cabo es una correlación entre vectores. El criterio más antiguo de este tipo es el M.A.C., (Modal Assurance Criteria) (Ewins, 1984); otro criterio es el I.M.A.C., (Inverse Modal Assurance Criteria) (Mitchell, 1998). Estos dos, son técnicas de correlación independientes de cualquier información de la masa de la estructura. Otro nivel de correlación entre vectores involucra una revisión de la ortogonalidad con la matriz de masas del sistema; esta revisión puede realizarse entre un grupo reducido o en el total de los grados de libertad del modelo y los vectores experimentales.

A menudo en el proceso de análisis y diseño de una estructura, los componentes son modificados para mejorar sus características dinámicas. Las mejoras para el diseño son valoradas por comparación de las frecuencias naturales y formas de modales de las dos estructuras (estructura de punto de partida y estructura nueva o actualizada). Es una teoría simple el comparar las características de frecuencia naturales, pero en general más conciso (para la detección de daño), el obtener una comparación cuantitativa de los formas de modo de vibrar. El criterio de confiabilidad modal (M.A.C.) es la técnica empleada para cuantificar las diferencias entre dos formas modales (o el valor de M.A.C. puede ser considerado como una medida de la similitud de dos modos).

$$MAC(\Phi_iA, \Phi_jB) = \frac{|\{\Phi_A\}_i^T * \{\Phi_B\}_j|^2}{\{\Phi_A\}_i^T * \{\Phi_A\}_j * \{\Phi_B\}_i^T * \{\Phi_B\}_j}$$

Ejemplo numérico, donde solo se relaciona el un cambio de la forma modal en una estructura simple (viga empotrada) (figura 24):

$$MAC(\Phi_1, \Phi_2) = \frac{|(0,7)(0,3) + (1,0)(0,5) + (0,7)(1,0)|^2}{|(0,7)(0,7) + (1,0)(1,0) + (0,7)(0,7)| * |(0,3)(0,3) + (0,5)(0,5) + (1,0)(1,0)|} = 0,749$$

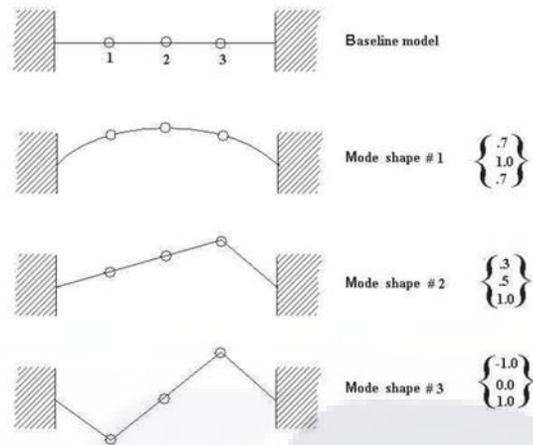


Figura 3.12: Tres primeros modos de vibrar de una viga empotrada.

$$MAC(\Phi_1, \Phi_3) = \frac{|(0,7)(-1,0) + (0,0)(1,0) + (0,7)(1,0)|^2}{|(0,7)(0,7) + (1,0)(1,0) + (0,7)(0,7)| * |(-1,0)(-1,0) + (0,0)(0,0) + (1,0)(1,0)|} = 0,0$$

Este método se apoya en el llamado "factor de escala modal"(M.S.F., por sus siglas en inglés) es otra forma de cuantificar el daño y representa la medida de la pendiente de la recta que mejor ajusta la relación entre los coeficientes de los vectores modales de la condición dañada contra la condición sin daño (Ewins, 1984). El intervalo de valores de este factor van de cero a infinito, que corresponde a ángulos que van de 0 a 90 grados. Un valor de 1.0, significa que hay una correlación total entre la condición con daño y la condición sin daño, por lo que no existe diferencia en los parámetros y, por lo tanto, no existe daño (Carrión, 2002). El método cuantifica en un punto determinado el grado de diferencia que hay en la medida de un parámetro modal con daño, respecto a la condición sin daño (Ewins, 1984). La expresión de este factor se calcula de la misma forma que el Factor de Escala Modal (M.S.F.), pero asociando las coordenadas del punto y analizando con la ubicación física del daño; por lo tanto; se tendrá un factor de escala modal para cada nodo (Carrión, 2002).

Cabe hacer mención que se deben considerar dos casos especiales: i) cuando los dos modos son idénticos y; ii) cuando ambos modos difieren por un mismo múltiplo escalar. Para el caso (i) se tiene: F1 y F2, lo que resulta en M.A.C.(1,2)=1; y para el caso ii) se tiene F1 = XF2, por lo que los dos modos están aún perfectamente relacionados.

Los valores calculados con el M.A.C. varían entre cero y uno. Valores pequeños indican baja correlación entre los vectores, mientras que valores grandes indican una correlación alta entre ellos. La aplicación del criterio M.A.C., al medir la correlación de un vector con respecto a otro, no se limita a formas modales, este procedimiento puede ser utilizado para comparar pares de fenómenos que poseen el mismo número de elementos que los describen. Si el coeficiente es algún valor menor a 1.0, entonces existe un cierto grado de inconsistencia, proporcional a este valor, entre los modos. Esto puede ser causado por modelo de elementos finitos inexacto o la presencia de ruido y no-linealidades en los datos medidos. Debe hacerse notar que, para lograr un razonable grado de exactitud en la comparación, es muy importante que los puntos de medición del análisis modal coincidan con los puntos de medición en el modelo de elementos finitos (Franco, 2012).

Es posible realizar el método incluyendo la ecuación el cambio de curvatura, comparando los datos obtenidos con su curvatura límite donde valores cercanos a la unidad nos indicaran una aproximación a la salud o lo que sea y los valores cercanos a cero daño.

Una de la principal desventaja en el uso de formas modales, el M.A.C. y otros criterios de garantía relacionados como indicadores de daño es la capacidad para estimar la forma modal detallada; se necesitan mediciones en una gran cantidad de puntos y la duración de las mediciones pueden aumentar considerablemente si el cambio de formas de los modos obtenidos a partir de ensayos sucesivos se utiliza como un indicador de daño (Jaques, 2013).

En general, es deducible que hay más susceptibilidad para detectar daño en aquellos modos donde el daño provoque que en ciertos puntos de la estructura se amplifique la respuesta estructural (Molina, 2012). Para los modos de orden más altos, ocurren dificultades para calcular las características de M.A.C. y Co.M.A.C. debido a los modos nuevos surgen (van apareciendo y desapareciendo cuando el daño se propaga) en resumen, cambia su comportamiento modal (Prabhu, 2011).

3.4.13. Criterios de confiabilidad de la flexibilidad modal

Este método (M.F.A.C., con sus siglas en inglés) es una medida de la correlación entre dos matrices. La derivación de la matriz de entrada de una relación lineal es determinada, que arroja valores entre cero y uno. Se tienen dos matrices, las cuales corresponden cualitativamente a la comparación de la matriz de flexibilidad analítica y la matriz de flexibilidad experimental:

$$MFAC(K_a^{-1}, K_e^{-1}) = \frac{\left[\sum_{i,j=1}^N (K_{a[i,j]}^{-1} \cdot K_{e[i,j]}^{-1}) \right]^2}{\sum_{i,j=1}^N (K_{a[i,j]}^{-1} \cdot K_{a[i,j]}^{-1}) \cdot \sum_{i,j=1}^N (K_{e[i,j]}^{-1} \cdot K_{e[i,j]}^{-1})}$$

3.4.14. Criterios de confiabilidad en coordenadas

De la misma manera en que se evalúa la correlación entre vectores, la correlación entre los grados de libertad también puede revisarse. Un criterio basado en el M.A.C. es el Co.M.A.C., "Coordinate Modal Assurance Criteria" (Lieven, 1988); el cual ayuda a identificar la contribución de cada grado de libertad e identifica áreas de la estructura que puedan tener discrepancias. Un criterio similar es el E.Co.M.A.C., "Enhanced Coordinate Modal Assurance Criteria" (Hunt, 1992); que es una extensión del Co.M.A.C. con algunas mejoras.

Una extensión del criterio de confiabilidad modal es el presente (Co.M.A.C., con sus siglas en inglés), intenta identificar que medida del G.D.L. contribuye negativamente a valores bajos de M.A.C. El Co.M.A.C. es calculado en modos pares, analítico contra experimental. El Co.M.A.C. difiere de la definición de M.A.C. en la forma en que da una medida puntual de la diferencia entre dos conjuntos de formas de los modos.

Este criterio proporciona una estimación de la correlación espacial de cada uno de los puntos donde se tiene la información para un par de modos dado (Lieven, 1988), esta expresa:

$$CoMAC = \frac{\left| \sum_{j=1}^m \left\{ \Phi_A \right\}_{i,j} \left\{ \Phi_B \right\}_{i,k} \right|^2}{\left[\sum_{j=1}^m \left\{ \Phi_A \right\}_{i,j}^2 \right] \left[\sum_{j=1}^m \left\{ \Phi_B \right\}_{i,k}^2 \right]}$$

En la ecuación anterior, la suma se realiza sobre los modos considerados i .

El criterio Co.M.A.C. mide el nivel de contribución de los grados de libertad de la estructura a la correlación del modo completo, de esta manera es posible identificar áreas de la misma que puedan presentar discrepancias o variaciones. Al igual que el M.A.C., los valores calculados con el Co.M.A.C. varían de cero a uno, y los valores pequeños indican poca correlación y viceversa.

3.4.15. Observaciones importantes de expertos en la materia

Hasta la fecha los métodos de identificación de daño basados en vibraciones que no utiliza algún modelo estructural llegan al nivel 1 y en ocasiones al nivel 2. Cuando son complementados con un modelo estructural, se alcanza el nivel 3. Para lograr el nivel 4 los métodos deben ser complementados con los campos de la mecánica de fractura, el análisis de fatiga-vida, o la valoración de diseño estructural en general (Doebbling, et al., 1998). La mayoría de las aplicaciones reportadas en la literatura (Doebbling, et al., 1998; Farrar, et al., 1999; Kie, et al., 2001; Carpinteri, et al., 2006; Chang, et al., 2003; Ventura, et al., 2010; Prabhu, et al., 2011; Brownjohn, et al., 2011) se quedan en los niveles más bajos de la clasificación anterior, por lo que el desarrollo de una metodología para lograr el nivel 4 sigue siendo una de las líneas de investigación más atractivas por las implicaciones que tiene en la conservación de edificios patrimoniales.

La mayoría los estudios llegaron a la conclusión de que la detección de daño era solamente posible bajo las condiciones controladas o donde el daño estructural fuera grave y ya se había generado. Es de notar que para la detección de daño basado en los cambios de parámetros modales hay que trabajar respecto a los procedimientos de señales que deben incluir métodos para compensar o filtrar efectos que no se desean dentro de la medición e incertidumbres de modelado. Los errores de medición y la variabilidad intrínseca son clave para la determinación de los parámetros modales. Tales problemas son las líneas más activas en investigaciones sobre el monitoreo basado en vibraciones (Brownjohn, et al., 2011).

Brownjohn en el 2011 recopila opiniones expresadas por eminentes (pero anónimos) académicos y consultores expertos en el monitoreo basado en vibraciones. Se transcriben aquí por resultar de interés para las perspectivas de futuras investigaciones:

“1. La metodología es difícil de implementar en la práctica de detección de daño cuando las características de vibración representan las propiedades globales de la estructura, y no son sensibles al daño local. Hasta ahora, los sistemas de monitoreo basado en vibraciones con los que hemos sido involucrados no han captado la falla en estructuras reales, posiblemente porque estas estructuras son muy importantes y han sido manejadas muy cuidadosamente durante su proceso de diseño, construcción y administración. 2. Hay demasiada información en los datos. Esto es principalmente debido a varias causas, por ejemplo; la falta de la excitación, la dirección de la excitación, brechas en el ancho de banda de excitación, las interacciones entre los sub-sistemas con holgura, interferencia electrónica, conexiones imperfectas, el poder imperfecto y muchas otras fuentes que lanzan los datos virtuales. El problema radica en cómo identificar y diferenciar la reacción estructural verdadera de la respuesta falsa. Este problema es desalentador. 3. La información crítica sobre la estructura puede perderse en los datos. Esto, en nuestra experiencia, es principalmente cuando la forma correcta de realizar las mediciones no es seguida. 4. He llegado a la conclusión de que el enfoque de monitoreo basado en vibraciones no suministra la solución suficiente para la mayoría de las aplicaciones de monitoreo de la salud estructural. 5. En mi opinión, aunque los cambios en las característi-

cas dinámicas se producen, por ejemplo el alargamiento de período, cambio en el modo de vibrar, amortiguamiento, etc. La dependencia sobre estos datos puede resultar en falsas alarmas, porque existe una gran variedad de factores que puede causar daño estructural ya sea de forma permanente o transitoriamente.”

Según Molina en 2012 es posible aplicar varios métodos de detección de daño basado en vibraciones, donde a partir de la obtención de la respuesta dinámica de un sistema estructural, es viable determinar un procedimiento racional para evaluar el comportamiento de una edificación, para lo cual es necesario calibrar un ensayo modal experimental con un modelo numérico, de preferencia ambos ante escenarios analíticos diferentes.

3.4.16. Observaciones para su uso en edificios históricos

Haciendo una reflexión respecto al implementar para aplicar teóricamente el método, tomando como dato conocido la respuesta estructural de edificios históricos ante vibración ambiental, aspirando a detectar daño, vemos que en el planteamiento inicial del procedimiento debemos disponer de un modelo analítico el cual contenga la descripción de todas las propiedades de la estructura, siendo estas, datos referentes a la rigidez, masa y amortiguamiento interno.

Para poder aplicar las técnicas, necesariamente se deben conocer dos estados de la estructura en análisis, un inicial considerando la estructura sin daño y otro posterior con daños estructurales. Al existir daño en la estructura, los sensores captan un cambio en la respuesta dinámica, la cual se puede asociar con la ubicación y magnitud del daño, dependiendo del algoritmo de análisis empelado (Perez, 2012).

Con el objetivo de mejorar la precisión en la magnitud de detección de daño se recomienda realizar estudios que incluyan las siguientes consideraciones (Galiote, 2006):

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

- Estudiar modelos estructurales en laboratorio con diferente nivel de daño controlado, con el propósito de calibrar la eficiencia del método propuesto.

- Ampliar la aplicación del método a modelos tridimensionales para tener en cuenta la respuesta torsional del edificio, que en muchos casos puede ser uno de los efectos de mayor importancia en su diseño.

- Considerar los efectos de interacción suelo-estructura, ya que estos ocasionan que el modelo se aproxime más a la realidad, y con ello, poder conocer cómo varían los niveles de daño.

- Realizar estudios enfocados a detectar la ubicación del daño dentro de un elemento estructural.

- Estudiar la relación entre estado físico y daño calculado.

- Determinar el nivel de daño de estructuras reales y comparar estos datos con los analíticos obtenidos con el método propuesto.

En la actualidad el número de edificios instrumentados, no sólo en la ciudad de México sino en otros estados de la República, es reducido. Por lo tanto, es recomendable calibrar modelos estudiados con datos reales de estructuras dañadas en donde sean vulnerables a las excitaciones sísmicas. Así, se podría aprovechar la información que se tiene de estos edificios para realizar modelos calibrados y aplicar el método que se presentó en este trabajo para estimar su nivel de daño (Galiote, 2006).

Con respecto a la observación de estructuras de mampostería históricas, es propuesto que que esta tarea puede ser dividida en cuatro fases (L. F. Ramos, 2007):

a) La primera fase es la recolección de datos de la estructura, incluyendo la informa-

ción histórica, la encuesta geométrica y topográfica, encuesta de daño, la caracterización de materiales mecánica de materiales con pruebas no destructivas (N.D.T.), una prueba modal dinámica global y un análisis de modelo numérico para la calibración estática y dinámica es requerido. Esto es el primer enfoque para el comportamiento estructural en la presunta condición sana al tiempo .el cero”;

b) En la segunda fase el plan de observación de salud se puede recurrir a un número limitado de sensores (por ejemplo un par de acelerómetros de referencia, los anchos de vía de tirantez en secciones críticas, la temperatura y los sensores de humedad, etcétera). Los datos deben ser almacenados periódicamente. Los efectos ambientales y cargando deben ser estudiados y la presencia del daño debe ser detectado por los parámetros modales globales o por algunos índices de detección de daño estadísticos complementarios.

c) En la tercera fase, el “Condición de salud” de una estructura es estudiado con más detalle. Los métodos de identificación de daño deben ser aplicados a la estructura después de filtrar los efectos ambientales. El objetivo de los métodos dinámicos es confirmar y ubicar el daño (posible) en una manera global;

d) En la última fase, un enfoque local con pruebas de N.D. visuales y complementarias debe ser llevado a cabo para tasar el daño a nivel local y clasificarlo.

3.4.17. Opiniones de expertos respecto al tema

Algunos puntos de vista de practicantes e investigadores aunque de forma anónima pero eminencias del tema respecto a la detección de daños encuestados por Brownjohn, Alessandro De Stefano, You-Lin Xu, Helmut Wenzel y A. Emin Aktan en 2010 dieron su opinión:

- V.B.M. es difícil de utilizar para detección del daño ya que las características vibratorias usualmente representan las propiedades globales que no son muy sensibles al daño

local. Lejos de lo anterior los sistemas analizados mediante el V.B.M. en estructuras reales sin fallas detectadas en los que me he visto envuelto, posiblemente ha sido debido a que son edificaciones importantes y que fueron manejadas muy cuidadosamente dentro de su diseño, construcción y mantenimiento.

- Existe mucha información y datos a administrar, excitación, la dirección de la excitación, interacción entre elementos, sub-sistemas, interferencia electrónica, uso de interfase, conexiones imperfectas, pobre carga de energía en el sistema de captura de datos y muchos mas que provocan errores en los datos virtuales. El problema se convierte en identificar y diferenciar la respuesta esporádica actual de la estructura. Este es un problema de enormes proporciones.

- La información crítica de la estructura puede ser perdida en la recopilación de datos, esto, en nuestra experiencia a veces no es tomado en cuenta. Cuando una aplicación es delimitada como un problema de identificación estructural, es posible administrar apropiadamente la adquisición de datos para realizar un procesamiento de señales avanzado para resolver lo que se necesite.

- Yo he concluido que la aproximación del V.D.M. no provee una adecuada solución a la detección del daño estructural para muchas aplicaciones del S.H.M.

- En mi opinión, los cambios en las características dinámicas de una edificación proveen indicadores de posible daño donde no existe seguridad estructural suficiente y reside en nosotros mismos crear un juicio respecto a los datos que tenemos. De igual forma algunos de los datos adquiridos pueden resultar en falsas alarmas ya que existen muchas situaciones que el daño estructural puede causar que sea permanente o transitorio el cambio de las características dinámicas.

Capítulo 4

Metodología propuesta para la identificación de daños

Desde el punto de vista ingenieril es un problema complejo el plantear: ¿cuál es la condición estructural de una edificación antigua?, ya que requiere la comprensión de distintos temas especializados. Para realizar una correcta determinación del estado de "salud estructural" de monumentos históricos, se debe de tomar en cuenta la caracterización de las propiedades mecánicas de todos sus elementos, lo que da por resultado una gran gama de resistencias en los elementos del inmueble. De lo anterior se observa la necesidad de implementar una metodología para la caracterización global de la estructura y se tomen en cuenta las variaciones, heterogeneidades y patologías para poder dar una evaluación certera de su estado de condición estructural.

Retomando la hipótesis, es posible explicarla de una forma sencilla, sin embargo el trasfondo teórico que se requiere para resolver el problema es complejo debido a que la abstracción matemática de dichas estructuras, es decir: ^{el} comportamiento estructural depende de un estudio multidisciplinar en el cual intervienen distintas ramas de la ingeniería".

Se requiere un enfoque multidisciplinario para el estudio de la particularidad de las estructuras patrimoniales, por lo que es necesario de una buena organización de estudios y

análisis en varios pasos: Encuesta de las condiciones, la identificación de las causas del daño y el deterioro, la elección de las medidas correctoras y de control de la eficiencia de las intervenciones. La comprensión del comportamiento estructural y las características del material es esencial.

El diagnóstico se basará en la información histórica y los enfoques cualitativos y cuantitativos: i) el enfoque cualitativo se basa en la observación directa de los daños estructurales y la degradación material, así como la investigación histórica y arqueológica, y ii) el enfoque cuantitativo exige material y pruebas estructurales, el seguimiento y el análisis estructural.

El enfoque multidisciplinario previamente mencionado deberá ser trabajado en función del estudio de las particularidades estructurales del edificio patrimonial en observación (ya que cada uno diferirá completamente de los demás). El investigar su historia, morfología y comportamiento estructural, será una tarea compleja, y requerirá de una organización de estudios y análisis en varios pasos:

a) Encuesta de las condiciones, la identificación de las causas del daño y el deterioro, la elección de las medidas correctoras y de control de la eficiencia de las intervenciones.

b) La comprensión del comportamiento estructural y las características del material es esencial para cualquier proyecto relacionado con el patrimonio arquitectónico.

c) El diagnóstico se basa en la información histórica y los enfoques cualitativos y cuantitativos.

d) El enfoque cualitativo se basa en la observación directa de los daños estructurales y la degradación material, así como la investigación histórica y arqueológica, mientras que el enfoque cuantitativo exige material y pruebas estructurales, el seguimiento y el análisis estructural.

El análisis de las condiciones pasadas permitía conocer la historia de la edificación a lo largo del tiempo, esto se refiere a identificar los valores intrínsecos del inmueble, así como a entender la condición actual del mismo. Las condiciones presentes permiten, precisamente, saber el grado de afectación del inmueble. Es aquí donde se planea la posible intervención a realizar. Por último, es necesario que se reconozca la importancia de tener un análisis o previsión de las condiciones futuras del inmueble.

En cuanto a la encuesta de las condiciones del edificio es sumamente importante realizar un censo de la condición de la construcción del edificio histórico, que incluya:

- Descripción del edificio.
- Tipo de construcción.
- Edad de la construcción.
- Tipo de cimientos.
- Estado de la Edificación.
- Ubicación, anchura y orientación de los defectos y/o grietas visibles.
- Localización de material suelto.
- Ubicación de las reparaciones anteriores.

Es recomendable la representación gráfica o referencia escrita de la información recopilada sobre planos, secciones y alzados de los edificios, con el objeto de poder relacionar

la localización de los daños con la ubicación de los diversos elementos estructurales y de la obra gruesa, incluyendo las tabiquerías. También es recomendable tomar nota de las modificaciones distributivas o volumétricas en forma de adiciones en altura o ampliaciones en planta realizadas a lo largo del tiempo, puesto que ello permite alcanzar una comprensión global y unitaria de la construcción, lo cual resulta de especial interés tratándose de edificios antiguos o históricos. Hay que tomar en cuenta el índole del daño estructural:

1.- Daño por compresión en muros: La localización de las fisuras o grietas coincide con las direcciones de las líneas isostáticas de compresión correspondientes a un elemento vertical de material elástico, homogéneo e isótropo recibiendo la carga vertical de su peso propio y de los forjados, supuesta esta última uniformemente repartida. Las roturas se forman preferentemente en las partes más cargadas coincidentes con la zona inferior del muro y, en su caso, en las zonas macizas de las agujas de carga entre aberturas. Su presencia indica la superación de la tensión admisible a compresión en la zona fracturada, con efectos que pueden ser muy diversos sobre el nivel de seguridad del edificio, en función de la capacidad de redistribución de tensiones en el ámbito del propio muro o del conjunto de su sistema.

2.- Daño por cargas puntuales: Las fisuras arrancan inclinadas de los laterales del elemento que genera dicha carga (habitualmente una viga o vigueta), o se marcan verticales debajo de dicho elemento. Como en el caso anterior, su gravedad dependerá de la posibilidad de redistribución de tensiones del elemento afectado, que si bien es amplio en los casos habituales, no sucede lo mismo en los pilares exentos, los cuales suelen requerir de intervenciones de refuerzo.

3.- Daño por insuficiencias de rigidez en elementos: La deformabilidad de algunos de los elementos que, teóricamente, tomando como referente el modelo elástico, se les supone una infinita rigidez, es la causa de la formación de esquemas singulares de fractura diferentes a los que les corresponderían si no se presentara dicha situación. A modo de ejemplo, en los gráficos pueden observarse los cuadros fisurativos inducidos, en un caso, por un dintel defor-

mable de madera, que permite la descompresión zonal del muro con la formación de fisuras marcando el arco de descarga y el efecto de la carga puntual de la vigueta; y en otro caso los señalados por la deformabilidad de los cimientos bajo las agujas de carga del muro de fachada, que genera en éste esquemas de fractura a cortante o a flexión según sea el tamaño de las aberturas y la ductilidad de los materiales del muro.

4.- Daño por diferencia de cargas entre elementos: Es frecuente la formación de una fractura vertical en la misma esquina formada por el muro que soporta la carga de los forjados y el muro transversal. La pérdida de continuidad del sistema murario conlleva una reducción de su monolitismo con efectos que se deberán evaluar especialmente en función de la incidencia de las acciones horizontales de viento y sismo probables.

5.- Daños por diferencia de rigidez en muros mixtos: En los muros con dos mamposterías o materiales co-planarios de diferente rigidez, uno de ellos; el de mayor rigidez formando pilastras aparentes y el otro conformando propiamente el muro, se observa a veces la aparición de grietas como consecuencia de los esfuerzos de corte generados en las zonas donde se produce el impedimento de deformación del material o fábrica de menor rigidez por el de mayor rigidez de las pilastras. Dichas roturas, que generalmente en muros gruesos no tienen una trascendencia importante sobre su equilibrio, son típicas de los muros que combinan la fábrica de ladrillo con el tapial, o la mampostería concertada con la no concertada.

6.- Daño por asentamientos diferenciales: Los movimientos del terreno constituyen una de las causas más frecuentes de fisuración y agrietamiento de los muros tradicionales. Dichos movimientos pueden ser originados por múltiples causas, algunas de ellas intrínsecas del propio terreno (humedad de suelos cohesivos, laderas inestables, etc.) y otras relacionadas con las características de los cimientos existentes en el propio edificio o con actuaciones en las edificaciones próximas. Generalmente (aunque no siempre), la manifestación de los daños es progresiva, de forma que es posible disponer de información sobre su evolución y la adopción de las medidas preventivas oportunas.

7.- Daño debido a sismos: La edificación de la arquitectura tradicional a base de muros de tierra, piedra o ladrillo (en especial los dos primeros) no ofrecen mucha resistencia a los movimientos sísmicos, debido a su escasa resistencia a las tensiones de tracción y de corte y su poca ductilidad para dar respuesta a las sollicitaciones multi-direccionales introducidas por dichos movimientos. El síntoma visual que de forma más reiterada identifica su afectación es la presencia de fisuras en cruz en los entrepaños situados entre aberturas, indicando la fractura por esfuerzo cortante de dichos tramos de muro a consecuencia de la sacudida en el doble sentido (derecha-izquierda, horizontal vertical), prácticamente simultánea, que caracteriza el movimiento sísmico. Otros efectos visibles, tales como las fisuras en secciones de cambio de inercia o a consecuencia de los sobre empujes generados por las sacudidas, son también frecuentes, así como la formación de daños no visibles en el interior de los muros (de-cohesiones y microfisuraciones) que reducen su capacidad portante. Evidentemente, la evaluación de la gravedad de la afectación requerirá del análisis particularizado de los daños en cada edificio.

8.- Daño debido a la falta de rigidez en zonas bajas: Un exceso de compresión en un muro grueso puede generar una fractura interna vertical que, siguiendo el recorrido de la isostática de compresión que pasa por el punto en que se ha sobrepasado la tensión de rotura del material, tiende a dividir progresivamente el muro en dos mitades, aumentando así su esbeltez y reduciendo su capacidad portante. Este tipo de rotura es la propia de muchos muros no homogéneos en su interior, con secciones internas débiles como consecuencia de la disposición de los mampuestos pétreos o de las piezas cerámicas guiada por las referencias fijas de los planos verticales de los paramentos. Esta forma de fractura es la que presenta mayor peligro de entre las variantes comentadas, puesto que, generalmente, no es visible su presencia y progresión en el interior de los muros antiguos, pudiéndose producir el colapso del elemento sin que necesariamente se presente una fase perceptible de deformación del elemento. Por supuesto, su presencia y descubrimiento, tanto en muros como en pilares exentos, aconseja la adopción de medidas de refuerzo a corto plazo de los elementos dañados.

9.- Desplomes y abombamientos en fachadas: Generalmente, se producen a consecuencia de largos procesos de deformación originados por los efectos prolongados de las solicitaciones verticales u horizontales sobre los materiales de los muros, unidos a los derivados de su propia reología, que provoca cambios a lo largo del tiempo en sus características mecánicas. En fases avanzadas de la deformación, suele ser precisa la adopción de apuntalamientos u otras medidas cautelares. Los desplomes debidos a los empujes de las cubiertas, los giros de la cimentación o los efectos de la humedad y la temperatura son las causas más habituales de los desplomes, mientras que los procesos reológicos de lenta deformación bajo las cargas centradas o descentradas transmitidas por la cubierta y los forjados lo son de los abombamientos.

10.- Daño debido al empuje de bóvedas: Los elementos abovedados generan empujes en sus encuentros con los muros perimetrales que deben ser compensados por el grosor y la masa de dichos muros, ayudados a veces por contrafuertes. La insuficiencia en la compensación de los empujes da pie a la formación de grietas y deformaciones, que pueden afectar no sólo a los muros sino también a la propia bóveda descomprimida por dichos efectos.

11.- Daño en bóvedas y cúpulas: El comportamiento mecánico-estructural de las bóvedas se reconoce habitualmente a partir de la superposición de la curva directriz del elemento con la línea de presiones correspondiente. En los lugares en que más se aleje esta línea de la posición de la directriz, mayor será el riesgo de fisuración o aplastamiento, al coincidir dichos lugares con las zonas sometidas a las máximas tensiones de tracción y compresión. Los esquemas de fractura de las bóvedas difieren sustancialmente de los de las cúpulas, al ser éstas verdaderas estructuras espaciales cuya interpretación requiere necesariamente de un planteamiento tridimensional complejo, el cual explica algunos de los modelos clásicos de rotura que suelen presentar. De todas formas, es común en ambos elementos que el origen de los daños derive de la descompresión generada por el movimiento de los muros, pilares o pilastras que reciben sus empujes, ya sea por el desplome lateral de los propios muros o por el descenso proveniente del asiento diferencial de sus cimientos, aunque, por supuesto,

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

cabe también la posibilidad que sea el exceso de sobrecarga o su propia debilidad la causa directa de las lesiones que presenten. En los gráficos, se muestran sus formas más habituales de fractura.

Si es posible, se deben tomar en cuenta algunos factores que desfavorezcan la vulnerabilidad del edificio:

- Para el suelo de cimentación: i) la presencia de arcilla y turba, ii) la presencia de un nivel freático superficial;

- Para las cimentaciones: i) la utilización de una tipología de cimentación discontinua, ii) poca profundidad en cimentación;

- Para los muros verticales: i) altura excesiva en el inmueble, ii) la esbeltez de los muros, iii) muros sin contrafuertes, iv) alto porcentaje de aberturas o nichos, v) alturas irregulares, vi) baja relación entre la superficie del muro y superficie total, vii) la falta de dentelleo en los muros, viii) distribución asimétrica e irregular en los muros de planta, ix) falta de aplanados;

- Para elementos horizontales: i) el uso de elementos flexibles, ii) falta de rigidez en elementos, iii) uso de bóvedas sin cadena;

- Para las cubiertas: i) falta de cadenas, ii) escaso mantenimiento de tejas y goteros;

- Para elementos tipológicos: i) irregularidad geométrica, presencia de cuarteamientos, iii) presencia de elementos que provoquen empuje en los muros;

- Para su uso: i) existencia de materiales que se pulvericen, ii) evidencias de recomposiciones posteriores, iii) presencia de inmuebles adyacentes recientes, iv) evidencia de un cambio de uso, v) presencia de maquinas que generen vibraciones.

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

Es recomendable describir dónde se ubica el edificio, en qué condiciones de servicio se encuentra, y qué características históricas y estéticas reúne. Estos aspectos no son, en absoluto, triviales o secundarios. Además de lo que, de manera más o menos objetiva, representan los valores históricos, urbanísticos en su caso, estético-arqueológicos del edificio y de su entorno, es opinión del equipo al que pertenece el autor que el técnico responsable del análisis estructural ha de tener muy presente estas facetas, tanto si el objetivo de su trabajo es conocer el nivel de seguridad de la estructura, sin más implicaciones, o si su concurso es necesario en tareas de adaptación funcional.

El material debe ser descrito a fondo apoyándose mediante su comparación con un número significativo de los resultados experimentales (con la descripción a fondo del material podrá ser desarrollado un modelo numérico fiable y preciso para entender el comportamiento general de la construcción).

Para fines de análisis estructural, es necesario que se desarrollen modelos del comportamiento mecánico de los materiales, así como modelos estructurales de las construcciones. Los modelos de comportamiento mecánico de los materiales pueden variar ampliamente, desde los muy complejos y detallados, hasta los muy simples y aproximados. Los modelos detallados permiten predecir aproximadamente el comportamiento de las estructuras, siempre y cuando los parámetros del modelo, las condiciones de frontera de la estructura y las cargas se conozcan con buena precisión. Estos modelos deberán representar todas las características esenciales del comportamiento estructural. Los modelos estructurales a tomar en cuenta para estudio del estado de una estructura histórica pueden ser:

a) Modelos materiales: Son modelos hechos a escala y contruidos con materiales disponibles para fines arquitectónicos. Su realidad física no está conectada a la de la verdadera estructura. En un principio, se pueden utilizar para evaluar el rendimiento estructural.

b) Modelos analógicos: Una equivalencia física (analogía) se utiliza para evaluar la estructura.

c) Modelos experimentales a escala: El modelo refleja la físicamente en la realidad de la verdadera estructura pero para la escala, el equilibrio de las estructuras esqueléticas de albañilería pueden ser representadas adecuadamente, mediante el uso de modelos no resistentes a la tensión, como es el caso del yeso o piedra.

d) La estructura misma: La verdadera estructura se puede utilizar como un modelo de sí mismo a través de la ingeniería (interpretación técnica) de su pasado rendimiento durante la ocurrencia de acciones históricas (terremotos y otros).

e) Modelos numéricos: La respuesta de la estructura se simula por medio de la formulación matemática implementada en un código de ordenador (F.E.M.).

La implementación de modelos numéricos es preferente debido a: i) razones económicas: el preparar y hacer pruebas analógico-experimentales es difícil y consume o requiere mucho tiempo de ejecución; ii) versatilidad; La computadora permite realizar mejoras y cambios en los modelos, de igual forma permite asumir varias hipótesis de carga diferente para ser analizadas sin realizar mucho esfuerzo; iii) capacidad: existen muchas alternativas numéricas para realizar formulaciones para el análisis de las estructuras complicadas. La investigación ininterrumpida provee modelos mejorados y aplicaciones (software).

El diagnostico involucrará la identificación de las causas de daño y decadencia y la caracterización de la condición de la estructura. La contribución del análisis estructural es esencial, en la combinación con investigación histórica, la inspección, la observación y el análisis estructural.

Los modelos detallados son adecuados en la evaluación de monumentos, por ejemplo,

en donde es posible realizar campañas extensivas de caracterización de los materiales. En el otro extremo, los modelos de material muy simplificados producen información limitada y aproximada acerca del comportamiento estructural. Sin embargo, esta información puede ser suficiente en cantidad y calidad para fines de ingeniería, cuando la información que se dispone acerca de las propiedades mecánicas del material, las condiciones de apoyo y las cargas es igualmente aproximada. Para elaborar el modelo de una estructura, ésta se divide en elementos. El comportamiento de cada elemento se representa en forma separada y, posteriormente, se ensambla el modelo de la estructura a partir de ellos. Hay también una gran variedad de tipos de elementos estructurales, desde los muy complejos hasta los muy simples.

El modelo estructural planteado deberá describir la complejidad de dichas estructuras, ya que son caracterizadas por: a) ser de materiales compuestos; b) tener poca resistencia a la tensión; c) ser de geometría muy compleja en dichas edificaciones, que abarca una gama diferente de elementos como son: robustos, esbeltos y curvos, entre otros; d) que su morfología y conexiones en general no son homogéneos y continuas; e) que su estructura interna que incluye: algunas capas, rellenos de material y refuerzo en las inserciones; f) las conexiones son regiones singulares en cuestión geométrica que siempre tendrán una morfología específica y diferente en cada conexión. La transferencia de esfuerzo podría activar fenómenos de resistencia específicos (el contacto, el rozamiento, la carga excéntrica, entre otros); g) que las estructuras históricas podrían haber experimentado acciones de naturaleza muy diferente (se acumulan los efectos importantes dentro de un largo plazo), algunas suelen desarrollarse gradualmente en los períodos de tiempo muy largos (por ejemplo, asentamientos diferenciales); h) el realismo y exactitud en el que la condición actual en el que la estructura se encuentra exige un modelo que haga incluir o simular el daño existente y las alteraciones actuales (las rajaduras principales y deformación deben ser incluidas en el modelo, el agrietamiento, por ejemplo, puede ser modelado desconectando algunos elementos o quitando fuerzas o propiedades de las regiones); e i) que los materiales históricos y las estructuras son normalmente muy heterogéneos y su adquisición de datos es limitada respecto para el monumento y la estructura original; j) que las estructuras son afectadas por muchas adiciones y alteraciones.

La historia es una característica sumamente importante del edificio y debe ser considerada e integrar en el modelo. Los efectos vinculados con historia podrían haber tenido una influencia sobre la reacción estructural y al daño existente como:

- El proceso de construcción.
- Las alteraciones arquitectónicas posteriores y adiciones.
- Destrucción por motivo de los conflictos (guerra).
- Las acciones naturales históricas (sismo, inundaciones, fuegos, entre otros).
- Fenómenos de daño a largo plazo.

Sin embargo, la historia constituye también un origen de conocimientos. El rendimiento histórico del edificio, si conocible, puede ser tramado empatado con las conclusiones sobre la respuesta estructural y lo sus debilidades. En cierto modo, la historia hace una insuficiencia de datos.

Idealmente, la formulación debe proporcionar una descripción objetiva de geometría, materiales (a corto plazo, a largo plazo, cíclico), morfología, conexiones y las acciones (estática, dinámica, cíclica). La simulación de los efectos a vincular con la construcción como son los procesos y las alteraciones posteriores (el análisis secuencial) son también deseables. Sin embargo las formulaciones muy complicadas (involucrar los aspectos anteriores) pueden ser apenas usada debido a: la capacidad de computadoras; los datos que se podrían requerir (por ejemplo; las propiedades materiales) y son muy difíciles de determinar dentro de la práctica profesional, el grado de la validación debido a la falta de resultados experimentales utilizables de referencia y por último, las formulaciones o hipótesis serán elegidas como un compromiso

entre el realismo y el costo del análisis.

La formulación elegida deberá de ser la mas simple y la de menor costo, pero capaz de realizar todas las simulaciones que se requieran dentro del análisis del comportamiento y con posibilidad verdadera de validar el modelo elegido. Hay que tomar en cuenta que el modelo usado en el análisis estructural es generalmente una ponderación entre el realismo y el costo. La necesidad de obtención de datos difíciles, pueden no siempre ser determinados por medio de un laboratorio razonablemente barato o con ensayos in-situ, por lo que debe también ser considerada la capacidad de la computadora y la potencia del programa de análisis.

Las iglesias generalmente son de grandes dimensiones, lo que hace difícil evaluar el estado global de la estructura si los daños están distribuidos indistintamente por todo el edificio. Es por esto que una de las opciones viables sería analizarla por partes. El análisis de las iglesias en partes más pequeñas permitiría entender más claramente su comportamiento dinámico. Además, dividir una iglesia reduciría el tamaño de los modelos, el tiempo de solución y simplificaría la interpretación de los resultados. Incluso, se podrían establecer similitudes de comportamiento de partes estructurales del mismo tipo; los cuales tiene la misma conformación, función y/o posición en la iglesia. De esta manera es más fácil relacionar las características individuales de cada parte estructural con el daño observado después de un sismo y se podrían realizar diagnósticos con relativa rapidez, para identificar daños y/o la posibilidad de colapso parcial o total.

Para ser aceptable un enfoque más simple, se deberán de cumplir algunos requisitos:

- Representar las características esenciales del mecanismo y la respuesta de resistencia de la mampostería (la fuerza de tensión nula, la compresión finita y la fuerza cortante).
- Reproducir los mecanismos de falla (simular articulaciones conectadas para localizar daño).

- Abarcar una parte significativa de la estructura.
- Que provea una descripción exacta de la geometría que se tiene en cuenta.

Trabajar un modelo estructural no esta fuera de las actividades científicas, sino es parte de esencial e inseparable, un modelo es un reconocimiento físico, matemático, o la representación lógica de un sistema, entidad, fenómeno o proceso. Una simulación es la puesta en práctica de un modelo dependiente del tiempo. Una simulación ya actuando nos muestra con detalle como el fenómeno actuará.

Una vez el modelo estructural sea confiable, se realizará una actualización del modelo numérico para la re evaluación de los coeficientes de seguridad considerados en la fase de modelado.

La metodología consiste en medir las vibraciones de las estructuras por efecto del ruido ambiental y determinar las características dinámicas de la estructura (frecuencia natural y modos de vibrar), ya que el cambio en las propiedades dinámicas será indicador de una reducción de la eficiencia estructural (asociada a la rigidez). Los parámetros utilizados para conocer las características dinámicas corresponderán: al período de vibrar, y las formas modales. La identificación de parámetros consistirá en utilizar técnicas analíticas con el fin de extraer información de cada propiedad de la estructura y utilizar las formas modales, y por medio de un análisis matemático (parámetros deseados por el usuario).

Este método se presentarán dificultades en el proceso asociadas tanto a inexactitudes en el modelo como a errores en los datos experimentales. Aunque los datos experimentales posean errores que provocaran una baja correlación entre estos daos y las predicciones, la teoría de ajuste de modelos supone que los principales causantes del desacuerdo teórico-experimental son los errores en el modelo.

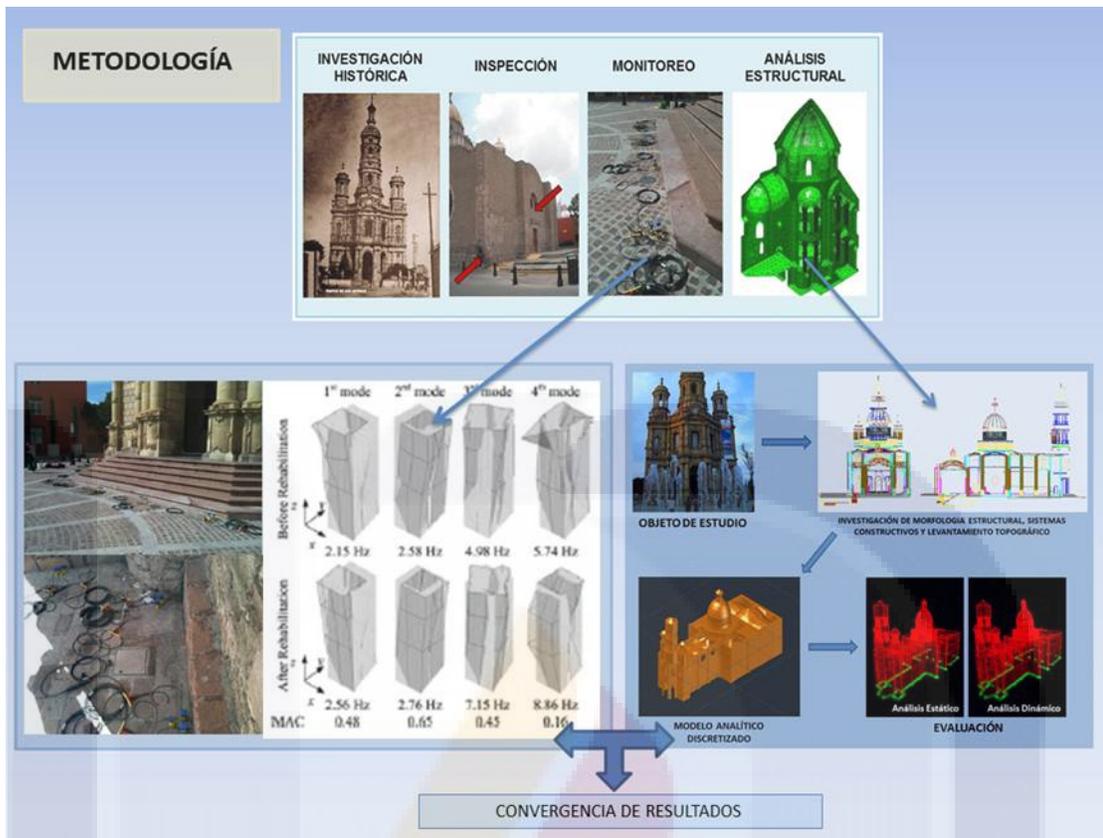


Figura 4.1: Metodología.

El proceso de actualización constará de las siguientes etapas:

a) Cálculo de sus características dinámicas: A partir de los parámetros definidos se calculan las frecuencias y modos de vibración numéricos.

b) Correlación del modelo numérico y experimental: Se realiza la correlación entre las frecuencias y los modos de vibración obtenidos numérica y experimentalmente. El estudio de la correlación proporcionara una primera indicación sobre la validez del modelo de elementos finitos. El objetivo que se persigue es obtener en la correlación unas frecuencias naturales con el mínimo error (para esto se utiliza el μ , antes definido).

c) Ajuste mediante iteración: Los valores de los parámetros serán iterados de forma que el error en las frecuencias y modos relacionados disminuya.

d) Estudio de los valores finales: A partir del modelo actualizado, mediante cambios en sus características dinámicas, se pueden detectar daños. En este proyecto la disminución del el módulo de elasticidad se tomara como un indicador de la severidad del daño.

Para resumir, mediante este método se ajustan los valores de los parámetros de la estructura, de forma que el modelo numérico se ajuste a la estructura real. En el proceso de iteración los coeficientes de correlación se minimizan hasta que la iteración converge. Para obtener un modelo actualizado, el modelo debe haber convergido totalmente con respecto a las frecuencias obtenidas experimentalmente.

Entonces la evaluación de la seguridad estructural consistirá en determinar la aceptabilidad de los niveles de seguridad analizando la presente condición de estructura y de los materiales. Involucrará, en particular, la determinación de la capacidad de la estructura, donde el modelo estructural será usado para obtener un pronóstico cuantitativo de la capacidad de la estructura sujeta a diversas acciones por las que es ser impuesta (la carga descargada la carga viva, sismo, entre otras).

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

Capítulo 5

Discusión de resultados

A medida que el tiempo transcurre, las construcciones dejarán de servir de la misma manera que cuando fueron construidas; es decir, sus propiedades tanto mecánicas como geométricas e incluso estéticas se degradarán paulatinamente. Diferente es el caso cuando una estructura que se encuentra en plena capacidad de servicio es afectada por eventos extremos, tales como sismos, huracanes, tornados, inundaciones, explosiones o medio ambientes agresivos, pues entonces se provoca una degradación mecánica acelerada, que puede verse reflejada de diversas formas en el comportamiento estructural de la misma.

El hecho de que este tipo de edificios se construyeron en un lapso de tiempo de varios años; hace que sea muy difícil hacer una caracterización representativa de las propiedades de los diversos materiales usados, e inclusive en muchos casos con técnicas constructivas distintas aplicadas dentro de su lapso de construcción. Por lo tanto, hay que tomar una serie de factores para poder realizar la evaluación estructural de dichos inmuebles:

- Las estructuras históricas no tienen que cumplir con reglamentos actuales.
- Debido a lo anterior, la conservación de una construcción histórica debe de ser una actividad multidisciplinaria donde el especialista se vea involucrado en todo el proceso de evaluación.

- Es importante realizar una recolección de datos adecuada (historia, valores a preservar, estado de conservación, daño, propiedades de los materiales, geometría, suelo, cimentación y peligros).

- La recopilación de datos en el contexto documental deberá de incluir: el levantamiento arquitectónico o planos arquitectónicos, planos estructurales, memorias de cálculo (en caso de que existan), bitácoras, publicaciones sobre el edificio histórico, investigación en fuentes inéditas, registro fotográfico, registro de deterioros (tipos de deterioro o alteraciones), topografía estructural, plomos, niveles, alineamientos, colocación de testigos, cuadro fisurativo, dirección, profundidad, ancho y longitud de grietas, entre otros.

- Tener una comprensión de los componentes estructurales de dichas estructuras (subsuelo, cimentación, apoyos, entresijos, azoteas, sistemas de techumbre, columnas, contrafuertes, entre otros).

- Valorar las condiciones de frontera entre elementos.

- Tener una comprensión de los posibles problemas estructurales que puedan surgir (daño producido por siniestro, asentamiento del terreno, asentamiento diferencial, subsidencia, fallas, flujo plástico o efectos a largo plazo, agrietamientos, desplazamientos y deterioro).

- Tener comprensión de los posibles siniestros que tengan posibilidad de ocurrir para provocar daño (sismos, viento, huracanes, eventos sociales masivos, guerras, construcción masiva de elementos o volúmenes que afecten el valor histórico del inmueble, vibraciones, entre otros).

- Tener en consideración los factores intrínsecos de daño, o sea los provenientes a errores visibles en la edificación (mano de obra poco hábil, procedimientos constructivos carentes de

técnica, materiales deficientes, suelos sin capacidad de resistencia, rellenos poco compactos y construcciones anteriores).

- En resumen, podremos considerar daño como al conjunto de cambios introducidos en un sistema que puede llegar a provocar la pérdida de funcionalidad del mismo (debido al cambio en las propiedades materiales y/o geométricas de la estructura, incluyendo sus condiciones de frontera, conectividad entre elementos, secciones transversales geométricas, cargas, propiedades materiales y cualquier otro factor capaz de provocar un comportamiento inusual, presente o futuro, de la estructura).

- Tenemos que conocer y, sobre todo, entender el comportamiento de la estructura antes de proponer cualquier tipo de intervención.

- Debido a lo anterior, es preferente mediante el análisis numérico detectar la imposibilidad de equilibrio del sistema estructural en estudio.

- Conocer que elementos conservan la estabilidad del inmueble.

- La intervención debe intentar solucionar el origen del problema y no sólo los síntomas, el objetivo principal es conservar la edificación como monumento arqueológico.

- Debemos estar conscientes de todas las incertidumbres involucradas: historia, materiales, modelos, acciones, entre otros.

- Las estructuras históricas requieren intervenciones periódicas con el fin de preservarlas del deterioro, y de vez en cuando necesitan restauración más precisa con el fin de corregir los daños causados por los fenómenos naturales.

- El ingeniero que hace estos trabajos debería manejar distintas herramientas avanzadas

de análisis estructural.

- Se debe manejar al menos el Método del Elemento Finito y alguna herramienta simplificada.

- Se debe manejar el análisis no lineal de estructuras.

- Validar el modelo numérico y la eficiencia de su solución estructural propuesta.

- Una vez que el modelo estructural del edificio histórico es validado, será utilizado para predecir la posible respuesta estructural del sistema, por lo tanto, el modelo podrá ser validado para deducir la respuesta estructural del edificio ante carga muerta, que será nuestra respuesta de referencia, y en seguida, por ejemplo; ser utilizado para describir el comportamiento sísmico del edificio, ahora bien, tenemos unas cuestiones que hay que tomar en cuenta: i) ¿hasta qué punto nuestro modelo es válido?; ii) ¿cómo podemos decidir si nuestro modelo es válido?; iii) un modelo ya validado, dentro de cierto alcance, ¿podría ser considerado lo suficientemente calibrado para predecir la respuesta estructural ante que diferentes acciones?; iv) ¿cómo podemos calibrar nuestros modelos?; y v) ¿qué accesibilidad tenemos para reconocer como calibrarlo?.

- Es deseable poder manejar distintas herramientas para el análisis estructural.

- La evaluación de la seguridad estructural de una edificación requerirá determinar su capacidad resistente. Dicha capacidad podrá determinarse mediante los métodos del análisis elástico convencional, y estará definida por el nivel de acciones con el cual la estructura alcanza un primer estado límite de falla o de servicio.

- Uno de los objetivos deseables en el monitoreo es la creación de un modelo del comportamiento del edificio que se observa, y analizar sus reacciones a esfuerzos externos, posible-

mente seguido del proceso de extracción de características propias.

La evaluación estructural y la detección de daño son de suma importancia para una comprensión adecuada de la integridad estructural y para la proposición del fortalecimiento y las intervenciones de restauración necesarias en un monumento histórico. La identificación dinámica no da una respuesta directa a las necesidades recordadas anteriormente, pero podría mediante. TIENE QUE SER UN ESTUDIO MULTIDISCIPLINARIO.

El análisis dinámico puede ser usado para cuantificar la degradación de las propiedades mecánicas de construcciones de mampostería, ya que la frecuencia con que vibre el elemento estará en función de la condición de los materiales como un "todo", por lo que se puede clasificar la calidad de la mampostería dependiendo de sus propiedades dinámicas. Esto es debido a que un cambio en las propiedades dinámicas (masa, rigidez y capacidad de disipación de energía), ya sea debido a pérdida del material, corrosión, degradación o fatiga del material, erosión o grietas, van a tener una influencia directa en el comportamiento dinámico de la estructura. La utilización de la frecuencia de vibrar será un parámetro que permitirá determinar un indicador que posibilite evaluar el comportamiento estructural de forma confiable. En este sentido, a partir de un cambio en las características dinámicas de una estructura se puede inferir si presenta una pérdida de rigidez. En teoría, cuando se produce el daño, las frecuencias naturales de una estructura disminuyen.

La razón principal de su gran popularidad es que las frecuencias naturales son bastante fáciles de determinar con un nivel relativamente alto de confianza y en muchas aplicaciones se requiere un solo sensor. Además, las frecuencias naturales tienen mucho menos variación estadística de fuentes de error aleatoria que otros parámetros modales, lo que los convierte en un medio viable en la evaluación de daños

Todas las metodologías hasta ahora desarrolladas al momento poseen ventajas y desventajas para localizar y estimar daño estructural. La idea común en todas ellas consiste en

identificarlo sin afectar la integridad de las estructuras comparando información de un estado dañado con uno de referencia. Esto es, el daño se determina relacionando el cambio de las características dinámicas con el de las propiedades de la estructura que las definen, particularmente con su rigidez.

Las frecuencias modales son una propiedad global de la estructura, por lo tanto los cambios en este parámetro no pueden ser usados para identificar el nivel de daño 1.

Las frecuencias no pueden proveer la información espacial sobre los cambios estructurales en general. Los métodos de detección de daño basado en vibraciones no son limitados a las frecuencias naturales y hay algunas aplicaciones donde la interpretación dinámica y las propiedades modales pueden ser usadas, por ejemplo diagnosticar la degradación de las propiedades de los materiales y el cambio en función de la interacción con el suelo. La mayoría los estudios llegaron a la conclusión de que la detección de daño era solamente posible bajo las condiciones controladas o donde el daño estructural grave y generalmente obvio ya había existido. Es de notar que para la detección de daño basado en los cambios de parámetros modales hay que trabajar respecto a los procedimientos de señales que deben incluir métodos para compensar o filtrar efectos que no se desean dentro de la medición e incertidumbres de modelado.

El uso del S.H.M. mediante el monitoreo del cambio de frecuencia puede ser considerado como una técnica de vigilancia global de un sistema físico. Esta vigilancia de la salud estructural se concebirá entonces, como todo aquel conjunto de tecnologías que se utilizan para evaluar la integridad de las estructuras, para detectar el daño temprano y antes de alcanzar el estado límite, para proporcionar información periódica o continua para realizar un mantenimiento eficiente y tomar decisiones rentables. Y el objetivo de dicha investigación será el de identificar por los medios más simples y más confiables; el adquirir, gestionar, integrar e interpretar datos de rendimiento estructural fiables para información útil máxima a un costo mínimo. La obtención de la respuesta de la estructura con el comportamiento de un mode-

lo numérico es deseable, dicho detallado y equivalente permitiría identificar los parámetros mecánicos de deformación de la estructura, en relación con las condiciones reales de estrés, y también para extrapolar los parámetros de resistencia utilizando una correlación.

Idealmente, la monitorización de la salud estructural consiste en determinar la ubicación y la gravedad del daño, sin embargo los métodos no dan la información suficientemente exacta para determinar la extensión del daño. Actualmente, estos métodos pueden determinar el nivel de daño que está presente en la estructura completa. Tales métodos son conocidos como "monitoreo de la salud global", y son los que se utilizan comúnmente para determinar la seguridad estructural de puentes. La mayoría de los métodos de monitoreo de la salud global están centrados en la observación de los cambios en la frecuencia natural como un indicador del cambio en el desempeño estructural, la premisa de que los cambios en las características dinámicas de una estructura demuestran el daño, es comprometida por el hecho de que las variaciones de temperatura, de la humedad y de otros factores ambientales también causan cambios en las características dinámicas.

La mayoría de los métodos de monitoreo de la salud global están centrados en la observación de los cambios en la frecuencia natural como un indicador del cambio en el desempeño estructural, la premisa de que los cambios en las características dinámicas de una estructura demuestran el daño, es comprometida por el hecho de que las variaciones de temperatura, de la humedad y de otros factores ambientales también causan cambios en las características dinámicas. Pueden ser necesarias miles de lecturas por minuto para caracterizar adecuadamente la oscilación de la estructura causada por una fuente externa de vibración, para posteriormente realizar el procesamiento de señales que conduce a las propiedades dinámicas importantes, tales como las formas de los modos de vibración, frecuencias y de amortiguamiento.

Debido a que el S.H.M. depende de las características de vibración globales de la estructura, la ubicación de las mediciones no necesita coincidir con la ubicación de las zonas o

elementos dañados. El daño estructural causa una reducción local de la rigidez en las inmediaciones del daño, lo cual a su vez causa una reducción a la rigidez global de la estructura. Para una detección eficiente del daño, los cambios en las propiedades globales deben ser suficientemente altos para que puedan ser evidenciados por los cambios en la forma de vibrar de la estructura ante los niveles de ruido ambiental que generalmente son muy bajos. Para lo cual es de gran importancia tener un acomodo adecuado de los sensores debido a la compleja geometría de las estructuras históricas. Estructuras antiguas muestran varias peculiaridades que influyen drásticamente los problemas de seguimiento importantes, como el despliegue de la red de sensores, la calibración del sistema de adquisición y la evaluación de los datos adquiridos. La conformación arquitectónica, las tecnologías de la construcción y los materiales empleados representan fuentes de debilidad que influyen significativamente en el desarrollo de eventos de daño y degradación producidos por el medio ambiente y la intervención humana. Una cuidadosa investigación de los posibles fenómenos que afectan a la integridad estructural y la comprensión de sus efectos consiguientes en la estructura son elementos esenciales para identificar el objetivo de vigilancia y establecer la estrategia adecuada para detectar los síntomas de daño.

Antes o al llevar a cabo un programa de seguimiento, se necesita tener una caracterización detallada del edificio. Se necesita realizar una investigación histórica, estudios geométricos y morfológicos para permitir la interpretación correcta de los datos de salida de la monitorización. El monitoreo normalmente realiza en conjunto con ensayos de caracterización basados en pruebas no destructivas o destinados a la determinación de la morfología interna de los miembros estructurales y las propiedades mecánicas de los materiales. Los patrones de daño (en particular, las principales grietas) también deben ser reconocidos y cuidadosamente documentados.

La información para determinar el comportamiento global puede ser obtenida con rapidez mediante la colocación de pocos sensores. Sin embargo, las mediciones de vibración brindan desafíos en cuanto al procesamiento de datos, particularmente para la detección del daño atri-

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

buible a las vibraciones de ruido ambiental, así como a las condiciones climático-ambientales las cuales producen cambios pequeños en la respuesta de la estructura. Así que, al fin de proporcionar información significativa, los puntos críticos de la estructura o materiales deben ser seleccionados.

Algunos trabajos de S.H.M. muestran que la pérdida de un miembro en una estructura, puede resultar en cambios de la frecuencia natural fundamental de hasta un treinta por ciento. Esto se explica por el cambio de la rigidez global de la estructura por la pérdida del elemento. Por su parte si un miembro no está sujeto al modo fundamental (elemento no estructural, por ejemplo: muro divisorio, elemento ornamental), la pérdida de ese miembro no tiene ningún efecto sobre la rigidez global de la estructura, y si la masa de dicho elemento es despreciable entonces tampoco cambiará la frecuencia fundamental o el modo de vibrar de la estructura. En el mismo orden de ideas si la estructura fuera estáticamente determinada, entonces la pérdida de cualquier miembro resultaría en una estructura inestable. Aunque la pérdida de elementos estructurales importantes de la estructura resulta en los cambios medibles de la frecuencia natural del edificio, en estructuras hiperestáticas no se puede detectar daños y afectaciones que se compensan mediante una redistribución de esfuerzos hacia otros elementos. Por lo tanto, la metodología no proporciona la información para caracterizar el daño localmente en una estructura. Además, algunas formas del daño no producen cambios en el comportamiento dinámico ante niveles bajos de la vibración de la estructura, lo que es un inconveniente para la evaluación de la salud estructural del edificio.

Las evaluaciones de estructuras deben de ser complementadas con análisis de elementos finitos. El problema con este método analítico es que es difícil determinar el modelo estructural real para la mayoría de los edificios y puentes. Los modelos generalmente son construidos asumiendo muchas simplificaciones, tal como suponer que la estructura es monolítica. Otro problema es la dificultad de determinar cuáles elementos estructurales y en qué medida se han degradado por el envejecimiento o alteración de los materiales. Muchos estudios suponen el acceso a un modelo de elementos finitos detallado de la estructura presumiendo de un conjun-

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

to de datos de la estructura sana afirmando que son disponibles, la falta de la disponibilidad de este tipo de datos puede hacer un método poco práctico para las aplicaciones, mientras sea dudosa dicha información podría considerarse que toda dependencia sobre modelos y datos previos pueden ser eliminados, otro asunto que ha recibido casi ninguna atención en la literatura técnica es el análisis entre cambios en las propiedades modales que resultan del daño y los cambios que resultan de las diferencias en las mediciones debido al error.

Así mismo, el comportamiento estructural de un edificio antiguo de mampostería difiere sustancialmente de una estructura moderna. Esto se debe, principalmente, al tipo de estructuración y a los materiales usados. Por lo que, los estudios analíticos de este tipo de estructuras requieren de procedimientos específicos. Debido a esto, es necesario que el ingeniero conozca los materiales y técnicas constructivas usadas en el pasado para que pueda hacer una buena descripción del comportamiento estructural del edificio histórico. Un asunto de la importancia es la dependencia sobre modelos analíticos previos o datos de prueba previos para la detección y ubicación del daño. Muchos algoritmos suponen el acceso a modelos F.E.M. detallados de la estructura, mientras que los otros presumen que uno la información de la estructura intacta disponible. A menudo, la falta de la disponibilidad de este tipo de datos puede hacer un método poco práctico.

Un uso adecuado y racional del análisis estructural puede ayudar a definir el estado de peligro y pronosticar el comportamiento futuro de la estructura. Con este objetivo, la definición de las propiedades mecánicas de los materiales, es necesaria mediante la aplicación de las leyes constitutivas de los materiales y los métodos de análisis de daño estructural. Sin embargo, cuando la estructura es compleja, sólo los modelos elásticos lineales son fácilmente utilizables. Los modelos no lineales o modelos de diseño de estado límite son difíciles de aplicar, también porque las leyes constitutivas necesarias para el material son raramente disponibles.

La comparación entre los resultados experimentales procedentes de la excitación dinámi-

ca y la respuesta numérica del modelo F.E.M. permiten definir el parámetro de deformación de las estructuras luego de extrapolar las características mecánicas. Los análisis preliminares numéricos utilizando un modelo de elementos finitos pueden contribuir significativamente para estimar la respuesta estructural y para la planificación de las pruebas estáticas y dinámicas.

Sin embargo, los cambios dinámicos (en algunos casos), son mínimos o muy pequeños como para identificar con éxito algún daño. Hay que considerar que, por otra parte, factores ambientales como cambios de temperatura entre dos pruebas dinámicas puede dar lugar a diferencias en los parámetros dinámicos debido a la interferencia que causen en los equipos de medición.

El segundo desafío importante es la identificación de los daños que puedan detectarse, así como anomalías en la estructura. Existen varios métodos de identificación de los daños validados con éxito en las estructuras de ingeniería civil moderna. Sin embargo, la extracción de las características más adecuadas para la detección de daños de la enorme cantidad de datos comúnmente adquiridos por un sistema de seguimiento de diagnóstico es un punto crucial que todavía requiere más investigación.

Respecto a los métodos de detección de daño basados en vibraciones:

a) El método de detección de daño basado en el cambio de curvatura es un método que pueda ayudar a analizar la salud estructural de edificios históricos solo mediante un estudio analítico (con la ayuda de un modelo analítico que describa la estructura, es posible experimentar teóricamente en qué condiciones estaría en peligro la integridad del inmueble). Es necesario conocer la geometría real de la estructura antes del daño y después de las afectaciones para que experimentalmente se pueda comprobar el método. Mediante el monitoreo de su comportamiento ante la vibración ambiental, es una tarea demasiado compleja de resolver ya que como la estructura se encasillada dentro de un rango elástico, solo podrían ser obser-

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

vables los cambios ante un evento de vibración intensa (sismos), las cuales son de magnitud superior al ruido ambiental. Pero cabe señalar que hay la posibilidad de validar el método en caso que la estructura tenga una reducción de rigidez importante, y hay que tomar en cuenta que debe de existir un elemento que esté en su límite de falla a lo cual el simple ruido ambiental puede provocar su fractura, pero la detección de dicho elemento es difícil.

b) El método de detección de daño basado en el cambio de frecuencia es un método donde es simple obtener el cambio de frecuencia de una estructura teóricamente, en la práctica se convierte en un problema, pero más allá de dicho problema, existe uno más complejo que es el de plantear que porcentaje de cambio ya sea positivo o negativo es donde existe un perjuicio tal que no sea segura la estructura.

c) El cambio de frecuencia y formas modales son formas de obtener experimentalmente los parámetros relacionados con el comportamiento estructural global de una construcción. Sin embargo, la comprensión de la propagación de los daños estructurales se limita fuertemente. Los parámetros relacionados con la respuesta dinámica de la estructura se comportan siempre en el rango no lineal (al menos los de interés para la detección de daños) y son muy sensibles a las propiedades de los materiales locales o globales y las condiciones de apoyo.

d) Se ha demostrado que es posible encontrar la frecuencia natural de las edificaciones históricas, sin embargo la detección local de daño no ha sido posible debido a que la metodología es una técnica de obtención de características globales. Ahora bien, una de las partes fundamentales para mejorar la aplicación del método será el buen diseño de la prueba experimental. Las pruebas experimentales consisten en la medición de la respuesta de la estructura por efecto de una fuerza de excitación conocida en condiciones de prueba controladas.

e) Los métodos de detección de daño basados en el cambio de rigidez y flexibilidad son métodos que tienen mucha relación con el cambio de curvatura y validan el uso de dicho método, aunque hay que incluir sus limitaciones antes expuestas.

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

f) Así como el criterio de confiabilidad modal es un método más bien dirigido a "validar un modelo teórico realizando una comparación directa y objetiva entre respuestas distintas de un sistema ante una misma excitación basándose en cambios para el mejoramiento del modelo, cuya aplicación es muy amplia en el diseño, puede ser utilizado para comparar el cambio de la salud estructural de un edificio histórico realizando una comparación de su respuesta de dos formas distintas: a) antes y después de la aparición de daños, y b) antes y después de la rehabilitación de una estructura.

g) Casi todos los métodos de identificación de daño revisados en la literatura, dependen de modelos estructurales lineales. El desarrollo adicional de los métodos ampliando su explicación mediante los efectos de la reacción estructural no lineal tendría el potencial de aumentar esta tecnología significativamente. La caracterización no lineal ha sido limitadamente aplicada a la tipificación de estructuras reales, debido a la gran cantidad de datos requeridos y a la dificultad del problema. Sin embargo, la información sobre el comportamiento no lineal de una estructura puede ser esencial en la evaluación del comportamiento dinámico de una estructura real. Además, los cambios en las propiedades dinámicas de la estructura, incluyendo desviaciones de la linealidad, pueden proporcionar evidencia cuantitativa de que los fenómenos perjudiciales que transgreden a la estructura.

Un asunto que es un punto de controversia entre muchos investigadores es el nivel general de la sensibilidad que los parámetros modales tienen a los defectos pequeños en una estructura. Gran parte de las pruebas sobre ambos lados de este desacuerdo son anecdóticas porque es solamente demostrado para estructuras específicas o sistemas y no demostrado en un sentido fundamental. Este asunto es importante para el desarrollo de la técnica de observación de salud porque el usuario de tales métodos tiene que tener confianza de que el daño será reconocido mientras la estructura todavía tiene integridad suficiente para admitir la reparación. Un asunto que ha recibido casi ninguna atención en la literatura técnica es la habilidad de discriminar entre cambios en las propiedades modales que resultan del daño y

esos cambios que resultan de las diferencias en las mediciones. Estas diferencias resultan de cambiar ambientales y/o las condiciones de las pruebas. Una desventaja de usar vibración ambiental es que el tipo de entrada es a menudo no estacionario (las características del mismo varían con el tiempo), y que se desconoce la contribución de cada causante particular de la excitación ambiental, además de que las fuentes de vibración ambiental producen contribuciones adicionales que son superfluas (que no son necesarias o están de más) las cuales son una fuente inevitable de contribución de ruido ambiental adicional a los datos que se miden en la estructura.



TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

Capítulo 6

Conclusiones

La evaluación de la seguridad e integridad estructural mediante la obtención de las propiedades dinámicas de una construcción cualquiera mediante su respuesta ante la vibración ambiental o ante sus condiciones operacionales normales, es una técnica que a partir su concepción dentro de la industria aeroespacial (finales de los años 70's), ha sido adaptada para ser empleada en el contexto de la ingeniería civil desde finales del siglo pasado, enfocándose principalmente para la valoración de las condiciones de estabilidad, salud estructural, predicción de funcionamiento y localización de daños en estructuras de gran envergadura (como es el caso de puentes de grandes claros y edificios altos). Su estudio en el marco de la investigación de construcciones históricas es un tema que ha llamado la atención de pocos investigadores desde hace un poco menos de dos décadas, pese a este corto lapso, han sido un considerable número de monumentos (tanto arquitectónicos como arqueológicos) los estudiados alrededor del mundo mediante técnicas de caracterización dinámica en función de realizar una estimación de las condiciones de estabilidad de los mismos. Diversos estudios han demostrado que es posible extraer las propiedades dinámicas de dichas construcciones, tales como: las frecuencias de vibración y las formas modales.

La evaluación estructural y la detección de daño son de suma importancia para una comprensión adecuada de la integridad estructural y para la proposición del fortalecimiento y las intervenciones de restauración necesarias en un monumento histórico. La identificación

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

dinámica no da una respuesta directa a las necesidades recordadas anteriormente, pero podría mediante. TIENE QUE SER UN ESTUDIO MULTIDISCIPLINARIO.

Todas las metodologías hasta ahora desarrolladas al momento poseen ventajas y desventajas para localizar y estimar daño estructural. La idea común en todas ellas consiste en identificarlo sin afectar la integridad de las estructuras comparando información de un estado dañado con uno de referencia. Esto es, el daño se determina relacionando el cambio de las características dinámicas con el de las propiedades de la estructura que las definen, particularmente con su rigidez.

Las frecuencias modales son una propiedad global de la estructura, por lo tanto los cambios en este parámetro no pueden ser usados para identificar el daño espacial en la estructura, sino solo sobre los cambios estructurales en general. El tomar en cuenta el cambio de las propiedades mecánicas con relación a las propiedades dinámicas, es una forma fiable de diagnosticar la degradación de las propiedades de los materiales.

Es de notar que para la detección de daño basado en los cambios de parámetros modales hay que trabajar respecto a los procedimientos de señales que deben incluir métodos para compensar o filtrar efectos que no se desean dentro de la medición e incertidumbres de modelado, dicha información puede ser obtenida con rapidez mediante la colocación de pocos sensores, aun que hay que tomar en cuenta que las condiciones climático-ambientales las cuales producen cambios pequeños en la respuesta de la estructura. Así que, al fin de proporcionar información significativa, los puntos críticos de la estructura o materiales deben ser seleccionados.

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

Capítulo 7

Bibliografía

Achenbach, J. D., (2008). “From NDE With A Q To SHM And Beyond”, DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR ZERSTÖRUNGSFREIE PRÜFUNG E.V.

Ahmanian, H. (1997). “Parameter Selection Strategies in Finite Element Model Updating”, Journal of Vibration and Acoustics, 119(37), 9.

Aktan, A. E. (2001). “MODAL TESTING FOR STRUCTURAL IDENTIFICATION AND CONDITION ASSESSMENT OF CONSTRUCTED FACILITIES”.

Aguilar, R. (2012). “Operational Modal Analysis Tests on Peruvian Historical Buildings: The Case Study of the 19th Century Hotel Comercio” (p. 10). Presented at the 15 WCEE, Lisboa, Portugal.

Aguilar, R. (2013). “EXPERIMENTAL MODAL IDENTIFICATION OF AN EXISTENT EARTHEN RESIDENTIAL BUILDING” (p. 10). Presented at the 5th International Operational Modal Analysis Conference, Guimaraes, Portugal.

Alshawabkeh, Y. (2013). “DETECTION AND QUANTIFICATION OF MATERIAL DISPLACEMENTS AT HISTORICAL STRUCTURES USING PHOTOGRAMMETRY AND

LASER SCANNING TECHNIQUES”, Mediterranean Archaeology and Archaeometry, 13(12), 57–67 11pg.

Amezquita, J. P. (2012). “Monitoreo de vibraciones en tiempo real para detectar daños en estructuras” (Tesis Doctoral). Universidad Autónoma de Queretaro, Queretaro, México.

Anastasi, G. (2009). “WSNs for structural health monitoring of historical buildings”. In Proceedings of the 2nd Conference on Human System Interactions, 7; pp. 574–579.

Anaya y Barajas. (2011).” METODOLOGÍA PARA LA DETECCIÓN DE DAÑOS EN ESTRUCTURAS METÁLICAS EMPLEANDO LA TÉCNICA DE ANÁLISIS MODAL TEÓRICOEXPERIMENTAL” (Tesis de Licenciatura). Universidad industrial de santander facultad de ingenierías físico – mecánicas escuela de ingeniería mecánica, Colombia.

Ancona, A. (2010). “EVALUACIÓN DE MÉTODOS DE DETECCIÓN DE DAÑO EN ESTRUCTURAS MEDIANTE EL USO DE VIBRACIONES”. Revista SMIS, XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, 21.

Animas, et al., (2014), “Dinámica multidisciplinaria de los factores que influyen en la preservación de los edificios patrimoniales”, Convergencias del Diseño y de la Construcción; Arquitectura, Ingeniería Civil y Urbanismo: Infraestructura, Patrimonio y Territorio. Vol IV.

Araujo, A. S. (2011). “Seismic Assessment of St James Church by Means of Pushover Analysis – Before and After the New Zealand Earthquake”. The Open Civil Engineering Journal, 6(1-M5), 13.

Arceo, D. (2013). “Diseño de algoritmos genéticos para la detección de daños en estructuras” (Diseño No. 386) (p. 97). México: SCT.

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

Arun, S. (2013). “Wireless sensors for structural health monitoring and damage detection techniques”. CURRENT SCIENCE, VOL. 104, NO. 11, 10.

Atalla, M. J. (1996). “Model Updating Using Neural Networks” (Tesis Doctoral). Virginia Polytechnic Institute and State University, Estados Unidos.

Atamturktur, H. S. (2008a). “Sensitivity of Modal Parameters of Historic Monuments to Geometric Distortion”.

Atamturktur, H. S. (2008b). “Validation of Nonlinear Finite Element Models with Dynamic Tests: an Overview”.

Atienza, R. (2004). “TÉCNICAS DE ACTUALIZACIÓN APLICADAS A LA DETECCIÓN DE DAÑOS” (Tesis de Maestría). DEPARTAMENTO DE MOTOPROPULSIÓN Y FLUIDODINÁMICA ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS AERONÁUTICOS, UPM Madrid España.

Avendaño, Y. M. (2009). “Monitoreo de salud estructural empleando filtros Kalman” (Tesis de Maestría). Universidad Nacional de Colombia Facultad de Ingeniería y Arquitectura Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación Manizales, Colombia.

Avitabile, P. (2000). “Vibrations: experimental modal analysis. Modal Analysis Control Laboratory”. doi:052700

Balageas, D. (2006). “Introduction to Structural Health Monitoring”.

Barrios, R. (2014). “DETECCION DE DAÑO EN ESTRUCTURAS UTILIZANDO PROPIEDADES DINAMICAS DAMAGE DETECTION IN STRUCTURES USING DYNAMIC PROPERTIES”.

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

Begg, et al., (1994). “Structural integrity monitoring using digital processing of vibration signals”. In: Proceedings, 8th Offshore Technology Conference, Houston, Texas.

Blakely, K. (2000). “Updating Models Data”.

Blevins, R. D. (1979). “Formulas for Natural Frequency and Mode Shape”. Robert E. Krieger Publishing Co., Inc.

Blinda, L. (2000). “Investigation procedures for the diagnosis of historic masonries”. Construction and Building Materials, 14, 35. doi:0950-0618r00r

Bonett, R. (2007). “Capacidad de los edificios de mampostería no reforzada”.

Boroscheck, R. (2010). “Diagnóstico e identificación de daño estructural” (No. Bit 73) (p. 8).

Botello, S. (2006). “Ejemplos de Aplicación de los Métodos Numéricos a Problemas de Ingeniería”.

Branko, et al., (2007), “Actividades fundamentales del monitoreo estructural”.

Brown, S. (2012). “Assessment of masonry bell tower response to bell ringing using operational modal analysis and numerical modelling” (p. 7). Presented at the Proceedings of Acoustics 2012, Fremantle, Fremantle, Australia.

Brownjohn, J. (2004). “A Structural Health Monitoring Paradigm for Civil Infrastructure”. In Session 6 - Fibre Optic Workshop (p. 15). Nottingham, United Kingdom.

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

Brownjohn, J. (2011a). “Vibration-based monitoring of civil infrastructure: challenges and successes”. *J Civil Struct Health Monit*, 1, 17; 79 – 95. doi:10.1007/s13349-011-0009-5

Brownjohn, J. (2011b). “Vibration-based monitoring of civil infrastructure: challenges and successes”. *J Civil Struct Health Monit*, 1(1), 79:95.

Brownjohn, J. (2011c). “Vibration-based monitoring of civil infrastructure: challenges and successes”. *J Civil Struct Health Monit*, 1:79–95. doi:10.1007/s13349-011-0009-5

BS 7385-1. (1990). “Evaluation of Measurements of Vibration in Buildings”. British Standard.

Cabrera D. (2004), “Imaginario social, comunicación e identidad colectiva”.

Capítulo de Instrumentación. (2002). “Instrumentación. In Determinación de características Dinámicas de Estructuras”.

Carretero E. (2006), “La religiosidad futbolística desde el Imaginario social. Un enfoque antropológico”.

Carrión, (2010), “Modal Assurance Criterion”.

Carpinteri, et al., (2006), “Damage monitoring of an historical masonry building by the acoustic emission technique”, *Materials and Structures* 39:161–167.

Carpio, C. (2011). “RESCATE DE EDIFICIOS DAÑADOS POR SISMO”. Presented at the MEMORIAS 2008 CONGRESO NACIONAL DE ADMINISTRACIÓN Y TECNOLOGÍA PARA LA ARQUITECTURA, INGENIERÍA Y DISEÑO.

Casano, A. M. (2009). “ANALISIS DE ESTRUCTURAS BAJO ACCIONES DINÁMICAS”. Departamento de Ingeniería Civil Facultad Regional Paraná – Universidad Tecnológica Nacional.

Casarin, F. (2007). “DYNAMIC IDENTIFICATION OF S. MARIA ASSUNTA CATHEDRAL, REGGIO EMILIA, ITALY”.

Casarin, F. (2012). “Structural Health Monitoring of the Roman Arena of Verona”, Italy. In Lecture 03 (p. 8).

Caselles, J. O. (2012). “Approach to Seismic Behavior of Mallorca Cathedral” (p. 10). Presented at the 15 WCEE, Lisboa, Portugal.

Chakraborty, D. (2008). “TIME-FREQUENCY METHODS FOR STRUCTURAL HEALTH MONITORING”.

Chang, P. C. (2003). “Review Paper: Health Monitoring of Civil Infrastructure. Structural Health Monitoring”, 2, 10. doi:10.1177/1475921703036169

Ching, J. (2006). “Structural Model Updating and Health Monitoring with Incomplete Modal Data Using Gibbs Sampler”. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 21, 16.

Chrysostomou, C. Z. (2013). “Seismic Retrofitting and Health Monitoring of School Buildings of Cyprus”. The Open Construction and Building Technology Journal, 7(1), 13.

Coias, V. (2006). “Inspección y diagnóstico de construcciones antiguas: Conocer antes de intervenir e construções antigas”.

Conte, C. (2011). "On-site assessment of masonry vaults: Dynamic tests and numerical analysis". *Geofizica*, 28, 17.

Cruz, J. I. (2007). "Estudio analítico y con vibración ambiental de las gradas de un estadio". *Ciencia Nicolaita*, (48), 12.

Cruz, G. J. (2012). "Propuesta de un Procedimiento Integral para la Evaluación Estructural de Puentes" (Tesis de Licenciatura). Universidad Veracruzana., Veracruz, México.

Cuadra, P. E. (2007). "APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE VIBRACIONES AMBIENTALES: ANÁLISIS DE MICROTREMORES Y VIBRACIONES NATURALES, PARA LA CARACTERIZACIÓN DE SITIO" (Tesis de Licenciatura). Universidad Simón Bolívar, Sartenejas.

Cuadra, C. H. (2012). "Dynamic characteristics of traditional adobe-quincha buildings in Peru" (p. 9). Presented at the 15 WCEE, Lisboa, Portugal.

Cuc Adrian I. (2002), "Vibration-Based Techniques for Damage Detection and Health Monitoring of Mechanical Systems". Thesis of Master of Science. 127 pag. Department of Mechanical Engineering, College of Engineering and Information Technology, University of South Carolina. U.S.A.

Dackermann, U. (2010). "Vibration-Based Damage Identification Methods for Civil Engineering Structures using Artificial Neural Networks" (Tesis Doctoral). University of Technology Sydney, Sydney, Australia.

Dawari, V. B. (2012). "Structural Damage Identification Using Modal Curvature Differences". *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*, 6.

De la Colina, J. (2008). “Pruebas Dinámicas de Vibración Forzada en un Edificio de Concreto Reforzado de Cuatro Niveles”. Revista Tecnológica ESPOL, 21(1), 9.

De Stefano, A. (2006). “S.H.M. ON HISTORICAL HERITAGE: ROBUST METHODS TO FACE LARGE UNCERTAINTIES”. SAMCO Final Report 2006. Retrieved from www.samco.org

Diaferio, M. (2011). “Operational Modal Analysis of a Historic Tower in Bari”.

Doebbling, et al., (1998), “Summary review of vibration-based damage identification methods”, Shock and Vibration Digest, 30(2), 91-105.

Dong, Y. (2010). “Bridges Structural Health Monitoring and Deterioration Detection - Synthesis of Knowledge and Technology”. Department of Civil and Environmental Engineering University of Alaska Fairbanks.

Drianfel, (2004). “Identificación de daños en vigas de hormigón experimentales y analíticas utilizando metodologías modales”. Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes E Infraestructura Civil, 4(2).

Dusi, A. (2012). “ESTIMATION OF THE SEISMIC RESPONSE OF CIVIL ENGINEERING STRUCTURES USING AMBIENT EXCITATIONS: A CASE STUDY”.

Escobar, J. A. (2007). “DETECCIÓN DE DAÑO EN EDIFICIOS MEDIANTE SUS CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS”. ai México.

Eusani, F. (2009). “Modal and Structural Identification of a Masonry Chimney”. DISAT, University of L’Aquila, Italy.

Ewins, D. J. (1984). “Modal testing: Theory and Practice”. Research Studies Press, Ltd,

Letchworth, Herfordshire, Inglaterra.

Farfan G. (2014), “Patrimonio edificado en México”.

Farrar C. R., (1999), “Excitation methods for bridge structures”, IMAC-XVII.

Farrar, C. (2006). “An introduction to structural health monitoring”. Phil. Trans. R. Soc. A, 3003 – 315. doi:10.1098/rsta.2006.1928

Filoni, P. T. (2012). “DESARROLLO DE UN SISTEMA DE DETECCIÓN DE FALLAS DE MATERIALES COMPUESTOS BASADO EN EL MÉTODO DE GOLPETEO”. Iberoamerican Journal of Industrial Engineering,, 4(8), 15.

Foti, D. (2012). “Dynamic Investigation of an Ancient Masonry Bell Tower with Operational Modal Analysis”. The Open Construction and Building Technology Journal, 6, 8. doi:1874-8368/12

Franco, G. C. (2012). “CALIBRACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO EXISTENTE DE UNA EDIFICACIÓN DE VALOR HISTÓRICO MEDIANTE MEDICIONES DE VIBRACIÓN AMBIENTAL. CASO DE ESTUDIO: TEMPLO DE SAN FRANCISCO DE ASÍS DE BUCARAMANGA”. (Tesis de Licenciatura). UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER, Colombia.

Gajanan, S. (2011). “Structural Health Monitoring: A Dire Need of India”.

Galiote, M. (2006). “UNA APLICACIÓN DE LA INSTRUMENTACIÓN SÍSMICA DE EDIFICIOS” (Tesis de Maestría). UNAM, México.

Gallote, M. (2008). “UNA APLICACIÓN DE LA INSTRUMENTACIÓN SÍSMICA DE

EDIFICIOS” (p. 17). Presented at the XV Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Puerto Vallarta, Jalisco,.

Galvin, P. (2008). “Análisis experimental del comportamiento dinámico de estructuras” (Tesis de Maestría). ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS, Sevilla, España.

Gandomi, A. H. (2008). “Development in Mode Shape-Based Structural Fault Identification Technique”. World Applied Sciences Journal, 5(1), 10.

Garcés, F. (2008). “IDENTIFICATION OF CIVIL ENGINEERING STRUCTURES” (Tesis Doctoral). UNIVERSITÉ PARIS-EST ÉCOLE DOCTORALE MODES.

García-Ruvalcaba José Luís, (2012), Director de Proyectos de Rescate Patrimonial y de restauración de la SICOM. Comunicación personal.

Garavaglia Architecture, Inc. (2013). MARYSVILLE HISTORIC COMMERCIAL DISTRICT.

Gattulli, V. (2013). “Structural Health Monitoring of the Basilica S. Maria di Collemaggio”.

Gentile, C. (2004). “Dynamic-based F.E. Model Updating to Evaluate Damage in Masonry Towers” (p. 12). Presented at the Proc. 4th Int. Seminar on Structural Analysis of Historical Constructions.

Gentile, C. (2007). “Ambient vibration-based investigation of the Victory arch bridge”. Presented at the ARCH’07 – 5th International Conference on Arch Bridges.

Gentile, C. (2009). “Operational Modal Analysis and FE modelling of a masonry tower”.

Presented at the IOMAC'09 – 3rd International Operational Modal Analysis Conference.

Giro, J. F. (2012). “IDENTIFICACIÓN DE PARÁMETROS DE LA DINÁMICA DE SISTEMAS ESTRUCTURALES”. *Mecánica Computacional*, XXXI, 20.

Grafe, H. (1998). “Model Updating of Large Structural Dynamics Models Using Measured Response Functions” (Tesis Doctoral). Imperial College of Science, Technology and Medicine University of London, London U.K.

Gomez, B. (2012). “Detección de Fallas en Estructuras Civiles Parcialmente Instrumentadas a través de Observadores de Estado” (Tesis Doctoral). CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS AVANZADOS DEL INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL, México.

Gonzales, L. (2009). “SIMULACIÓN DINÁMICA DE ESTRUCTURAS MEDIANTE MODELADO POR ELEMENTOS FINITOS Y REDUCCIÓN DE ORDEN EMPLEANDO EL ESPACIO DE ESTADO”. *Mecánica Computacional*, XXVIII, págs. 2905–2926.

Gopalakrishnan, S. (2010). “Computational Techniques for Structural Health Monitoring”. *Springer Series in Reliability Engineering*, 505. doi:10.1007/978-0-85729-284-1

Govers, Y. (2011). “MODEL UPDATING USING UNCERTAIN EXPERIMENTAL MODAL DATA”. *IFASD-2011-96*, 22.

Güemes, A. (2003). “Direct Updating Techniques Applied to Damage Detection in Spacecraft Equipment Panel”. *Memorias del 4o Taller Internacional en Structural Health Monitoring*. Stanford.

Guerrero, H. (2007). “LOCALIZACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE DAÑO ESTRUCTURAL APLICADO A ELEMENTOS FINITOS” (Tesis de Maestría). UNAM, México.

Guzman, M. A. (2002). “MODELADO DEL COMPORTAMIENTO NO LINEAL DE UNA ESTRUCTURA HISTÓRICA DE MAMPOSTERÍA MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS” (p. 10). Presented at the XIII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Puebla, Pue., México: Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, A.C.

Hamze, A. (2012). “COMPARATIVE STUDY OF DAMAGE IDENTIFICATION ALGORITHMS APPLIED TO A PLEXIGLAS BEAM” (p. 10). Presented at the 15th International Conference on Experimental Mechanics, Porto/Portugal.

Henao, D. V. (2013). “IDENTIFICACIÓN DE LAS PROPIEDADES DINÁMICAS DE UNA ESTRUCTURA SOMETIDA A VIBRACIÓN AMBIENTAL EMPLEANDO ANÁLISIS ESPECTRAL” (Tesis de Maestría). UNIVERSIDAD EAFIT ESCUELA DE INGENIERÍA, Medellin colombia.

Hernandez, M. R. (2005). “DETECCION DE DAÑO A PARTIR DE CAMBIOS EN LAS CARACTERISTICAS VIBRACIONALES USANDO REDES NEURONALES”.

Hernandez, J. M. (2010). “Aspectos a considerar en la mejora de modelos de elementos finitos en máquinas herramienta mediante datos procedentes del análisis modal experimental” (p. 10).

Herrera, L. K. (2008). “Modern Methods for Materials Characterization and Surface Analysis to Study the Effects of Biodeterioration and Weathering on Buildings of Cultural Heritage”. *International Journal of Architectural Heritage*, 3(1), 20. doi:10.1080/15583050802149995

Herrera, el al., (2012), “Modern Methods for Materials Characterization and Surface Analysis to Study the Effects of Biodeterioration and Weathering on Buildings of Cultural Heritage”, *International Journal of Architectural Heritage: Conservation, Analysis, and Res-*

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

toration.

Hunt, D. L. (1992). "Application of enhanced coordinate modal assurance criteria". Presented at the 10th International Modal Analysis Conference, California, EUA.

ICOMOS. (2004). "RECOMENDACIONES PARA EL ANÁLISIS, CONSERVACIÓN Y RESTAURACIÓN ESTRUCTURAL DEL PATRIMONIO ARQUITECTÓNICO. INTERNATIONAL SCIENTIFIC COMMITTEE FOR ANALYSIS AND RESTORATION OF STRUCTURES OF ARCHITECTURAL HERITAGE".

Jaques, S. (2013). "A Review of Damage Detection and Health Monitoring of Mechanical Systems from Changes in the Measurement of Linear and Non-linear Vibrations". Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systemes.

James, R. (2011). "On Model- and Data-based Approaches to Structural Health Monitoring" (Tesis Doctoral). The University of Sheffield.

Joint, V. (2006). "Airport Link Environmental Impact Statement Construction Noise and Vibration".

Kasal, B. (2010). "Stress Waves". In Situ Assessment of Structural Timber, 20.

Katkhuda, H. (2005). "Health Assessment at Local Level with Unknown Input Excitation". JOURNAL OF STRUCTURAL ENGINEERING, 10. doi:10.1061/ ASCE!0733-9445 2005!131:6 956

Kie, D. (2001). "Instrumentation of Bridges for Structural Health Monitoring". KSCE Journal of Civil Engineering, 5(3), 12.

Kumar, (2008), "Safety assessment of Mallorca Cathedral", Master thesis UPC, Advanced Master in Structural Analysis of Monuments and Historical Constructions.

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

Kumar, et al., (2009). “An approach to structural health assessment and management technology”. Industrial Technology 2009 ICIT 2009 IEEE International Conference on (pp. 1-6). IEEE.

Leidin, D. (2008). “IDENTIFICACIÓN DE PROPIEDADES DINÁMICAS DE ESTRUCTURAS CONSIDERANDO EFECTOS DE INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA (CASO DE ESTUDIO)”. Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil., 8(2), 16.

León, J. (2000). “Planteamiento del análisis estructural. Identificación de modos de fallo y criterios de decisión”. FHECOR Ingenieros Consultores ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. UPM.

Lieven, N. A. J. (1988). “Spatial correlation of mode shapes, the coordinate modal assurance criterion (CoMAC)”. Presented at the 6th International Modal Analysis Conference, Society for Experimental Mechanics, Connecticut, U.S.A.

Lisman, D. F. (2012). “ADVANCED IN SITU MONITORING TECHNIQUES FOR THE BEHAVIOUR OF HERITAGE STRUCTURES”. J. of A. E. S., 2(15), 4.

Lourenço, (1996), “Computational strategies for masonry structures” Ph.D. thesis Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Lourenco, P. (2001). “Analysis of historical constructions: From thrust-lines to advanced simulations. Historical Constructions”.

Lourenço, (2001), “A review of the out-of-plane behaviour of masonry”, Masonry International, 14(3), p. 67-73.

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

Lourenco, P. (2002). “Computations on historic masonry structures”. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 4(3), 301–319.

Lourenço, (2008), “Damage identification in masonry structures with vibration measurements”, *Structural Analysis of Historic Construction*, Ed D’Ayala and Fodde, Taylor and Francis Group, London, ISBN: 978-0-416-46872-5.

Lourenco, P. (2011a). “Recent developments in vibration analysis of historic and masonry structures: damage detection and wireless sensor networks”. Presented at the EVACES 2011 – Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures.

Lourenco, P. (2011b). “Types of analysis: Linear static, linear dynamic and non linear static”. Universidade do Minho.

Mannan, M. A. (1990). “Detection and Location of Structural Cracks using FRF Measurements” (p. 6). Presented at the IMAC VIII.

Maurizi, M. J. (2003). “TÉCNICAS ANALÍTICA Y EXPERIMENTAL PARA LA DETECCIÓN Y LOCALIZACIÓN DEL DAÑO EN ESTRUCTURAS”. *Mecánica Computacional*, XXII, 13.

Meli, R. (2012). “Diagnóstico y rehabilitación estructural de edificios históricos”. Instituto de Ingeniería UAM.

Merluzzi, 2008, “Historical case study: the Frari’s Basilica in Venice”, Master thesis Università degli Studi di Padova, Advanced Master in Structural Analysis of Monuments and Historical Constructions.

Meza, J. M. (2013). “METODOLOGÍA CON BASE EN MACROELEMENTOS PARA LA EVALUACIÓN DE RESISTENCIA Y MECANISMOS DE COLAPSO DE IGLESIAS ANTIGUAS DE MAMPOSTERÍA” (Tesis Doctoral). UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO, México.

Mitchell, L. D. (1998). “Increasing the sensitivity of the modal assurance criteria (MAC) to small mode shape changes: the IMAC”. Presented at the 16th International Modal Analysis Conference, California, E.U.A.

Moatasem, M. (2011). “Detection of damage location using mode shape deviation: Numerical study”. International Journal of the Physical Sciences, 6(24), 11. doi:10.5897/IJPS11.971

Modena, (2004), “Structural Analysis of Historical Constructions: Possibilities of Numerical and Experimental Techniques”. Proceedings of the Fourth International Seminar on Structural Analysis of Historical Constructions, 10-13 November 2004 Padova, Italy, Volume 1

Molina, M. S. (2012). “DETECCION DE DAÑO EN PUENTES MEDIANTE UN MODELO EXPERIMENTAL”. XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural.

Monti, G. (2010). “Robustness against the noise in sensors network design for heritage structures: the case study of the Colosseum” (p. 14). Presented at the 4th International Workshop on Reliable Engineering Computing (REC 2010). doi:0.3850/978-981-08-5118-7 072

Moran, C. (2011). “DETECCIÓN, LOCALIZACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE DAÑO EN MATERIAL COMPUESTO. ESTUDIO NUMÉRICO Y EXPERIMENTAL. ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS”.

Moreno C. (2008), “Imaginarios: Desarrollo y aplicaciones de un concepto recientemente

utilizado en las Ciencias Sociales”.

Mottershead, J. E. (1993). “Modal Updating in Structural Mechanics: A Survey”. *Journal of Sound and Vibrations*, 167(2), 29.

Nakke, H. G. (1988). “Application of System Identification in Engineering”. Vienna: Springer.

National Instruments. (2011). “Software de Análisis para Prueba Estructural y Monitoreo”.

Noise and Vibration. (2004). “N and V”.

NTC-RDF-2004, “Normas Técnicas Complementarias, Reglamento de Construcción del Distrito Federal”.

Orduña, A. (2001). “UNE APPROCHE D’ANÁLISE LIMITE POUR DES STRUCTURES EN MAÇONNERIE”.

Orduña, A. (2004a). “UN ESTADO DEL ARTE DEL ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE EDIFICIOS HISTÓRICOS DE MAMPOSTERÍA”. PARTE I: COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y MODELOS CONSTITUTIVOS (p. 12). Presented at the XIV Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Acapulco, Gro.

Orduña, A. (2004b). “UN ESTADO DEL ARTE DEL ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE EDIFICIOS HISTÓRICOS DE MAMPOSTERÍA. PARTE II: MODELOS DE ANÁLISIS” (p. 10). Presented at the XIV Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Acapulco, Gro.

Orduña, et al., 2007, “Evaluación sísmica de construcciones históricas de mampostería:

comparación de tres modelos de análisis”, Revista de Ingeniería Sísmica No. 77 pags 71-88.

Pacheco, et al., (2012 a), “Las vibraciones como una fuente de información para evaluar el comportamiento estructural de edificios patrimoniales”, Ponencia in extenso “2do Foro Internacional Convergencias del Diseño y de la Construcción, Arquitectura, Ingeniería Civil y Urbanismo”, 11 y 12 de junio de 2012.

Padley. (1991). “Damage detection from changes in curvature modeshapes”. Journal of Sound and Vibration, 145(2), 312–332.

Panplona, M. (2008). “D2.1 Real Problems apparent at cultural heritage and monitoring demands and deficits”. SMooHS.

Parloo. (2002). “Sensitivity-based operational mode shape normalization”. Mechanical Systems and Signal Processing, 16(5), 757–767.

Pau, A. (2005). “Health monitoring of cultural heritage using ambient and forced vibrations”.

Pau, A. (2014). “Dynamic Characterization of Ancient Masonry Structures. Advances in Vibration Analysis Research”.

Peña, F. (2010). “ESTRATEGIAS PARA EL MODELADO Y EL ANÁLISIS SÍSMICO DE ESTRUCTURAS HISTÓRICAS”. Revista de Ingeniería Sísmica, 83, 21.

Peña, F. (2012). “CRITERIOS PARA EL REFUERZO ANTISÍSMICO DE ESTRUCTURAS HISTÓRICAS”. Revista de Ingeniería Sísmica, 87, 20.

Peralta, M. H. (2008). “ANÁLISIS NUMÉRICO Y EXPERIMENTAL DE VIBRACIONES”.

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

NES PARA LA EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE UN PUENTE”. *Mecánica Computacional*, XXVIII, págs. 2033–2052.

Perez, T. J. (2007). “DETECCIÓN DE DAÑO EN EDIFICIOS UTILIZANDO REDES NEURONALES”.

Perez, M. A. (2012). “Análisis de sensibilidad para la ubicación de sensores en estructuras”.

Peeters, B. (2011). “Efficient operational modal testing and analysis for design verification and restoration baseline assessment: Italian case studies”.

Pfeiffer, H. (2007). “Aircraft integrated structural health assessment–Structural health monitoring and its implementation within the European project AISHA”. *EU Project Meeting on Aircraft Integrated Structural Health Assessment AISHA Leuven Belgium* (Vol. 26, pp. 1-9).

Prabhu, S. (2011). “STRUCTURAL HEALTH MONITORING OF HISTORIC MASONRY MONUMENTS” (Tesis de Maestría). *Clemson University*.

Prabhu, S. (2011a). “Feature assimilation in structural health monitoring applications”. *Civil Engineering Topics, Volume 4, Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series 7, The Society for Experimental Mechanics*.

Preciado, A. (2007). “EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD SÍSMICA DE EDIFICIOS HISTÓRICOS EN COLIMA POR MÉTODOS EMPÍRICOS” (p. 9). Presented at the XVI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Ixtapa-Zihuatanejo, Guerrero: SMIS.

Querejazu, P., (2010), “LA APRO PIACIÓN SOCIAL DEL PATRIMONIO. ANTECE-

DENTES Y CONTEXTO HISTÓRICO”.

Quintana, J. A., (2009). “Análisis del Método de Búsqueda Global para la Detección de Daño y Monitoreo Estructural de Puentes” (Tesis Doctoral). INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA UNIDAD PROFESIONAL “ADOLFO LÓPEZ MATEOS,” México.

Quintero, A. F., (2010). “ESTADO DEL ARTE EN MONITORIZACIÓN DE SALUD ESTRUCTURAL: UN ENFOQUE BASADO EN AGENTES INTELIGENTES”. *Ciencia E Ingeniería Neogranadina*, 20(1), 16.

Quiroz, A. (2010). “Seismic Risk Mitigation of Historical Masonry Towers by Means of Prestressing Devices”. *Advanced Materials Research*, 133-134, 7: pp 843–848. doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.133-134.843

Rainieri, C. (2011). “Operational modal analysis for the characterization of heritage structures”. *Geofizica*, 28, 18.

Ramos, E. M. (2012). “Aplicación de Análisis Modal Operacional a Estructura Singular” (Tesis de Maestría). Universidad de Granada, España.

Ramos, L. F. (2006). “Vibration Based Damage Identification of Masonry Structures” (p. 10). Presented at the Structural Analysis of Historical Constructions, New Delhi.

Ramos, L. F. (2007a). “Damage Identification on Masonry Structures Based on Vibration Signatures” (Tesis Doctoral). Universidade do Minho, Guimaraes, Portugal.

Ramos, L.F. (2007b). “MONITORING OF HISTORICAL MASONRY STRUCTURES

WITH OPERATIONAL MODAL ANALYSIS: TWO CASE STUDIES”.

Ramsey, K. (1983). “Experimental Modal Analysis, Structural Modifications and FEM Analysis on a Desktop Computer”. *Sound and Vibration*, 10.

Robles, S. I. (2005). “Detección de daño de elementos estructurales lineales. *Mecánica Computacional*”, XXIV(VIII).

Roca, et al., (2001), “Studies on the structure of gothic cathedrals” *Historical constructions*, Uminho.

Roca, P. (2009). “Purpose and Possibilities of Structural Analysis.” Master Lectures presented at the SA1 Lectures. Barcelona: Advanced Master in Structural Analysis of Historical Constructions and Monuments, UPC, Barcelona, Spain.

Roca, et al., (2010), “Structural analysis of masonry historical constructions. Classical and advanced approaches”.

Rodriguez, R. (2007). “SEGUIMIENTO Y DETECCIÓN DE DAÑO ESTRUCTURAL EN EDIFICIOS SIN PARÁMETROS MODALES BASE” (Tesis Doctoral). UNAM, México.

Rojas, R. (2006). “Detección de fallos en estructuras mediante la medida de la variación de sus propiedades dinámicas” (Tesis de Licenciatura). Departamento de mecánica de medios continuos y teoría de estructuras. Escuela técnica superior de ingenieros. Universidad de Sevilla., España.

Ruocci, (2009), “Application of the SHM Methodologies to the Protection of Masonry Arch Bridges from Scour”, PhD Thesis Dottorato di Ricerca in Ingegneria delle Strutture Politecnico di Torino, Politecnico di Torino, Italy.

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

Rytter, (1993), “Vibration based inspection of civil engineering structures”. University of Aalborg, Denmark.

SA2 Lectures at SAHC (UPC). (2012). “Structural Analysis Techniques”. Retrieved from <http://www.msc-sahc.org/>

Saisi, A. (2013). “Dynamic and seismic assessment of the Gabbia tower in Mantua, Italy” (p. 8). Presented at the Built Heritage 2013 Monitoring Conservation Management.

Salawu, O. S. (2001). “Damage Location Using Vibrational Model Shapes”.

Salgado, R. E. (2008). “Damage detection methods in bridges through vibration monitoring: evaluation and application” (Tesis Doctoral). Universidad de Minho-ISISE, Guimaraes, Portugal.

Samali, B. (2007). “EXPERIMENTAL MODAL ANALYSIS OF U-SHAPED ADOBE-MUDBRICK WALL UNITS”.

Schueremans, L. (2001). “Probabilistic evaluation of structural unreinforced masonry” (Tesis Doctoral). KATHOLIEKE UNIVERSITEIT LEUVEN, Belgium.

Schwarz, B. J. (1999). “Vibrations: experimental modal analysis”. CSI Reliability Week, 12.

Schwarz, B. J. (2007). “FEA Model Updating Using SDM”. Presented at the IMAC XXV.

Silva, E. (2009). “COMPARACIÓN DE LAS PROPIEDADES DINÁMICAS DE EDIFICIOS DE CARACTERÍSTICAS SIMILARES UBICADOS EN ZONAS GEOTÉCNICAS DIFERENTES”.

Sohn, H. (2003). A Review of Structural Health Monitoring Literature: 1996–2001. Los Alamos.

Sortis, A. (2004). “Dynamic identification of a masonry building using forced vibration tests”. *Engineering Structures*, 27, 11; pp 155–165. doi:10.1016/j.engstruct.2004.08.012

Sotelo y Acevedo, (2009), “IDENTIFICACIÓN DE DAÑO EN PÓRTICOS 2D EMPLEANDO INFORMACIÓN MODAL Y EL MÉTODO PARTICLE SWARM OPTIMIZATION (PSO)” (Tesis de Licenciatura). UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECHANICAS ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL, BUCARAMANGA.

Stewering, U. (2006). “Comparative Study of Vibration-based Damage Detection Methods on a Bridge”.

Svinkin, M. R. (2004). “Minimizing Construction Vibration Effects”, 8. doi:10.1061/(ASCE)1084-0680(2004)9:2(108)

Thickett, D. (2012). “Vibration damage levels for museum objects” (p. 6). Presented at the 13th Triennial Meeting Rio de Janeiro Reprints, Brasil. Retrieved from dthickett@thebritishmuseum.ac.uk

Török, (2010), “In Situ Methods of Testing Stone Monuments and the Application of Nondestructive Physical Properties Testing in Masonry Diagnosis”, *Materials, Technologies and Practice in Historic Heritage Structures*, Springer Science+Business Media B.V.

Torres, C. A. (2009). “Pruebas de Vibración Ambiental Para Deterinar las Propiedades Dinámicas de un Edificio de 23 Niveles y los Efectos Interacción suelo-Estructura” (Tesis de Maestría). IPN, México.

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

Vargas, L. (2011). “Monitoreo de salud estructural de aeronaves basado en mediciones de impedancia electromecánica”. AVANCES Investigación En Ingeniería 15 (2011).

Vazquez, T. D. E., (2004). “Identificación de daños en vigas de hormigón experimentales y analíticas utilizando metodologías modales”. Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes E Infraestructura Civil, 4(2).

Vazquez, D. E. (2005). “IDENTIFICACIÓN DE DAÑOS EN VIGAS DE HORMIGÓN EXPERIMENTALES Y ANALÍTICAS UTILIZANDO MÉTODOLOGÍAS MODALES”. Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes E Infraestructura Civil., 4(2), 18.

Ventura, C. E., (2010). “Structural Assessment of Damaged Bridges Using Ambient Vibration Testing”. Society for Experimental Mechanics Inc., 5(Proceedings of the IMAC-XXVIII), 7. doi:10.1007/978-1-4419-9825-5-5

Ventura, et al., (2011), “Structural Assessment of Damaged Bridges Using Ambient Vibration Testing, in Dynamics of Bridges”, Volume 5, vol. 3, edited by T. Proulx, pp. 41–47, Springer New York. [online] Available from: <http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4419-9825-5-5>

Villegas V.M. (1974). “Arquitectura de Refugio Reyes”, Imprenta Madero, México IN-BA. Departamento de arquitectura, 149 pags.

Wang, L. (2009). “Review of Vibration-Based Damage Detection and Condition Assessment of Bridge Structures using Structural Health Monitoring”. Queensland University of Technology, U. K.

Wenzel, H. (2004). “Structural Assessment of the Cultural Heritage”.

Wenzel H. and D. Pichler (2005) “Ambient Vibration Monitoring”. 301 pag. John Wiley and Sons Ltd. England.

Wilhelmina, J. (1992). “UPDATING STRUCTURAL DYNAMICS MODELS USING FREQUENCY RESPONSE DATA” (Tesis Doctoral). University of London, London U.K.

Wilmer, J. (2009). “ESTIMACIÓN DE LOS PERIODOS NATURALES DE VIBRACIÓN DE VIVIENDAS DE BAJA ALTURA CON MUROS DE CONCRETO”. Ciencia E Ingeniería Neogranadina., 19(1), 16.

Wilson, Ihrig and Associates, Inc. (2012). “CURRENT PRACTICES TO ADDRESS CONSTRUCTION VIBRATION AND POTENTIAL EFFECTS TO HISTORIC BUILDINGS ADJACENT TO TRANSPORTATION PROJECTS”.

Wolff, T. (1989). “FAULT DETECTION IN STRUCTURES FROM CHANGES IN THEIR MODAL PARAMETERS” (p. 8). Presented at the IMAC VII.

Worden, K. (2004). “An Overview of Intelligent Fault Detection in Systems and Structures”. Structural Health Monitoring, 3(1), 85–98.

Xu, Y.-L. (2012). “Health Monitoring of Large Civil Structures”. Forum Presentation presented at the The Second Future Infrastructure Forum (FIF2), Cambridge, UK.

Xu, Y.-L. (2013). “Accuracy of Acoustic Emission Localization for Masonry Structures Monitoring”. Presented at the 13th International Conference on Fracture, Beijing, China.

Yan. (2004). “Structural damage location by combined analysis of measured flexibility and stiffness”. Presented at the International Conference on Structural Engineering, Mechanics and Computational (SEMC), Cape Town, South Africa. (Tesis Doctoral). UNIVERSITÀ

DEGLI STUDI DI BOLOGNA, Italia.

Zhou, Z. (2006). “VIBRATION-BASED DAMAGE DETECTION OF SIMPLE BRIDGE SUPERSTRUCTURES” (Tesis Doctoral). University of Saskatchewan, Saskatoon.

Zhu, H. (2005a). “Detection of Structural Damage Through Changes in Frequency”. Wuhan University Journal of Natural Sciences, 10(6). doi:1007 1202(2005)06-1069-05

Zhu, H. (2005b). “Detection of Structural Damage Through Changes in Frequency”. WUJHS Wuhan University Journal of Natural Sciences.

Zonta, D. (2000). “STRUCTURAL DAMAGE DETECTION AND LOCALIZATION BY USING VIBRATIONAL”.

Zonta et al., (2010), “Wireless sensor networks for permanent health monitoring of historic constructions”, Smart Structures and Systems, Vol.6, No.5-6, p. 595-618.

Zuluanga, J. (2012). “ESTUDIO DE UNA TÉCNICA DE DETECCIÓN DE DAÑO EN UNA VIGA MEDIANTE VIBRACIONES TRANSVERSALES OBTENIDAS CON EL MÉTODO DE SIMULACIÓN POR REDES” (Tesis de Licenciatura), Universidad de los Andes.

Capítulo 8

Anexo 1 - Caso de estudio: "Morfología y comportamiento estructural del templo de San Antonio"

Capítulo del libro: Convergencias del Diseño y de la Construcción; Arquitectura, Ingeniería Civil y Urbanismo: Infraestructura, Patrimonio y Territorio. Vol III".

Autores: Animas H., Navarro M., Pacheco J., García J.L., Arroyo M.G., Cordero T. y Esparza C.J.

ISBN: 978-607-8285-92-1

Fecha de publicación: Junio de 2014 (Aguascalientes, Mexico).

MORFOLOGÍA Y COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DEL TEMPLO DE SAN ANTONIO

HÉCTOR ANIMAS RIVERA¹, MARISOL NAVARRO HERNANDEZ², JESÚS PACHECO MARTÍNEZ³, JOSÉ LUIS GARCÍA RUVALCABA⁴, MOISES GUADALUPE ARROYO CONTRERAS⁵, TONATIUH CORDERO HERNANDEZ⁶, CARLOS JOB ESPARZA R.⁷

RESUMEN

El templo de San Antonio ubicado en la ciudad de Aguascalientes, Ags. México, es reconocido no solo por su importancia religiosa, sino también por su relevancia arquitectónica, simbólica e histórica; además de estar catalogado por el INAH como monumento histórico de propiedad federal. Dada la importancia cultural del inmueble para la ciudad de Aguascalientes, es prioritaria su preservación. El conocer la integridad del edificio es de suma importancia para su uso con los niveles de seguridad adecuada, así como para la planeación de su mantenimiento. El análisis dinámico puede ser usado para cuantificar la degradación de las propiedades mecánicas de la construcción y puede ser usado para la detección de daño. El alcance del presente trabajo se basará en realizar un estudio analítico del templo de San Antonio, fundado desde su morfología para proponer un modelo analítico, donde se comparará su respuesta dinámica ante diferentes configuraciones de materiales teóricos para comprender como puede afectar el cambio de dichas propiedades a su comportamiento estructural.

¹ Maestro en Ingeniería, Universidad Autónoma de Aguascalientes, Doctorado en Ciencias de los Ámbitos Antrópicos, Centro de Ciencias del Diseño y de la Construcción, hectoranimas@hotmail.com

² Arquitecto, Universidad Autónoma de Aguascalientes, Maestría en Ingeniería Civil con Especialidad en Estructuras, Centro de Ciencias del Diseño y de la Construcción, arg.marinah@hotmail.com

³ Doctor en Ciencias, Universidad Autónoma de Aguascalientes, Doctorado en Ciencias de los Ámbitos Antrópicos, Centro de Ciencias del Diseño y de la Construcción, jesus.pacheco@edu.uaa.mx

⁴ Maestro en Arquitectura, SICOM Secretaria de Infraestructura y Comunicaciones, Gobierno Municipal de Aguascalientes, jose.garcia@aguascalientes.gob.mx

⁵ Doctor en Ciencias, Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Ingeniería, maroyoc@uqa.mx

⁶ Ingeniero Civil, Universidad Autónoma de Aguascalientes, Maestría en Ingeniería Civil con Especialidad en Estructuras, Centro de Ciencias del Diseño y de la Construcción, tonatiah_cordero@yahoo.com.mx.com

⁷ Arquitecto, Universidad Autónoma de Aguascalientes, Maestría en Ingeniería Civil con Especialidad en Estructuras, Centro de Ciencias del Diseño y de la Construcción, carlosjob.es@gmail.com.

Palabras clave: integridad; análisis dinámico; propiedades mecánicas; estudio analítico; morfología; respuesta dinámica.

ABSTRACT

The temple of San Antonio located in the city of Aguascalientes, Ags. Mexico is known not only for his religious importance, also for his architectural significance, symbolic, and historical, as well as being cataloged by the INAH like historical monument of federal property. Given the cultural significance of the property for the city of Aguascalientes, is priority their preservation. The knowledge of the structural integrity of the building is critical for their own use with appropriate security levels and for their maintenance planning. The dynamic analysis can be used to quantify the degradation of the mechanical properties of the construction and can be used to detect damage. The scope of this work is based on an analytical study of the Temple of San Antonio, founded from his morphology with the purpose to propose an analytical model, where the dynamic response is compared to different theoretical material settings in order to understand how the change of the properties can affect their structural behavior.

Keywords: integrity; dynamic analysis; mechanical properties; analytical study; morphology; dynamic response.

INTRODUCCIÓN

La edificación en la antigüedad se practicaba a base de conocimientos tradicionales y los procesos constructivos obedecían reglas prácticas muy generales, no fue sino hasta final del siglo XVII, cuando se desarrollaron teorías de análisis estructural que permitieron dimensionar los elementos de las construcciones. Por lo anterior, desde las últimas décadas del siglo XX, el estudio analítico de las estructuras históricas de mampostería ha llamado la atención de un pequeño número de investigadores, pero debido a que son pocos los expertos que trabajan en este campo, el progreso de la investigación para la comprensión de su comportamiento, no ha sido satisfactorio (Lourenço, 1996). Hay que reconocer de igual forma, que el actual círculo de investigación de la ingeniería estructural está orientado a materiales y sistemas modernos. El análisis estructural de las edificaciones patrimoniales antiguas, es un gran desafío, se ha admitido por parte de los expertos en este campo, que es inherente a la complejidad geométrica y edad de las construcciones (Lourenço, 2001; Roca, 2001; Modena, 2004).

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

Saber en qué condiciones se encuentra una estructura, para determinar su nivel de seguridad para resistir eventos, es importante y necesario. El gran número de estructuras de edificios patrimoniales e históricos todavía hoy en uso, generan la necesidad de este tipo de evaluaciones con fines de garantizar su preservación o rehabilitación ([Pacheco, et al., 2012 a](#)).

El estudio del patrimonio histórico desde el punto de vista estructural plantea varios desafíos: (i) la caracterización de materiales por la diversidad de calidades y tipos de materiales (materiales compuestos) y por la degradación de sus propiedades; (ii) la geometría de los edificios por su complejidad; (iii) la discontinuidad en los elementos causadas por los rellenos, cavidades, inserciones, etc.; (iv) el determinar las acciones de diferente naturaleza que actuaron a lo largo del tiempo histórico; (v) la integración a la modelización numérica de los daños, miembros deformados o agrietados; (vi) la adquisición de datos está limitada por el respeto de las condiciones originales del monumento y las pruebas no destructivas o no invasivas tienen un alcance limitado; (vii) existe documentación que recopila la historia del edificio que desapareció al paso del tiempo por diversos factores ([Roca, et al., 2009](#)). Aunque estas tareas son complejas y en la actualidad se consideran como problemática asociada a la estudio de edificios históricos, representan un área de oportunidades para la investigación, que de ser resueltos abonarán a la preservación de patrimonio edificado ([Pacheco, et al., 2012 b](#)).

Tres factores principales propician la degradación de las propiedades de los materiales de construcción usados en la construcción de dichos edificios: 1) la intemperie de materiales expuestos al ambiente; 2) procesos de biodeterioración; y 3) acción humana y contaminación antrópica ([Herrera, et al., 2012](#)). El hecho de que el cambio de las propiedades estructurales causen cambios en la frecuencia de vibración, es una razón para usar métodos dinámicos para la identificación de daño considerando que la frecuencia natural es una propiedad global de la estructura ([Zhu, et al., 2005](#)). El análisis dinámico puede ser usado para cuantificar la degradación de las propiedades mecánicas de construcciones de mampostería, tiene la ventaja sobre técnicas convencionales ya que la frecuencia con que vibre el elemento estará en función de la condición de los materiales como un todo, por lo que se puede clasificar la calidad de la mampostería dependiendo de sus propiedades dinámicas ([Herrera, et al., 2008](#)). A partir dicha

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

conjetura, parece que la propuesta es útil y aplicable a estructuras históricas de mampostería. La observación de la frecuencia natural parece ser un enfoque fiable para la detección de daños (Lourenço, 2008).

Es sabido que las propiedades dinámicas de una estructura son función de su masa, rigidez y capacidad de disipación de energía. Un cambio en estas propiedades, ya sea debido a pérdida del material, corrosión, degradación o fatiga del material, erosión o grietas, van a tener una influencia directa en el comportamiento dinámico de la estructura (Vázquez, et al., 2004). La hipótesis principal de la metodología propone que al reducirse la eficiencia estructural, hay un cambio en las propiedades dinámicas de la estructura (asociadas a la rigidez) (Pacheco, et al., 2012a), el presente trabajo deriva de la línea de investigación: “Evaluación del empleo del modo de vibrar como indicador de la condición estructural de edificios históricos”, el principio de la metodología de dicho trabajo a grandes rasgos, consiste en medir las vibraciones de las estructuras por efecto del ruido ambiental para determinar las características dinámicas de la estructura (i.e. frecuencia natural, modos de vibrar, etc.), y mediante la comparación ante modelos analíticos, determinar condiciones de seguridad estructural y patrones de degradación o pérdida de propiedades resistentes de los materiales. Recapitulando, el alcance del presente trabajo se basará en realizar un estudio analítico del templo de San Antonio, donde se comparará su respuesta dinámica ante diferentes configuraciones de materiales teóricos para comprender como puede afectar el cambio de dichas propiedades a su comportamiento estructural. Se establece como metodología el desarrollo de un modelo analítico que representara todas las características fundamentales de la construcción teniendo en cuenta todos sus parámetros y condiciones de frontera que permitan predecir aproximadamente su respuesta dinámica.

TEMPLO DE SAN ANTONIO

El Templo de San Antonio (imagen 1) es un monumento y obra maestra religiosa, situado en la esquina que forman las calles de Pedro Parga e Ignacio Zaragoza. Construido durante el porfiriato, la primera piedra se colocó el 12 de octubre de 1895 y el edificio se concluyó el 8 de diciembre de 1908. Fue el hacendado e industrial del negocio del tabaco, el michoacano Antonio Morfin Vargas (hombre de gran peso político en la época), quien financió los cuantiosos gastos invertidos en la construcción

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

(aproximadamente \$200,000.00 pesos) (Rojas et al., 1994). La obra fue encargada por frailes franciscanos, aunque actualmente el recinto está bajo la custodia del sacerdotes agustinos; diseñada y construida por el arquitecto práctico autodidacta (sin título académico), el zacatecano Refugio Reyes Rivas. Es una obra maestra del eclecticismo, una síntesis perfecta en la que se combinan varios estilos artísticos, con alarde de elementos ornamentales inclasificables (Ramírez, 1997).

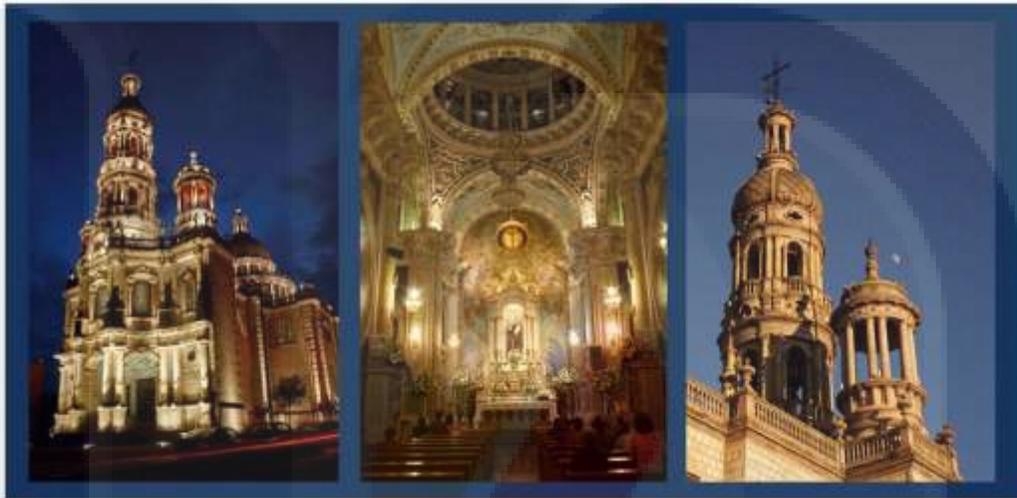


Imagen 1. Templo de San Antonio.

Considerado por muchos como el recinto religioso más hermoso de la ciudad, las características con las que cuenta en Templo y que lo hacen único en México son, según los expertos, que posee diversos estilos arquitectónicos como pueden ser el estilo gótico, neoclásico, barroco, estilo árabe, estilo ruso, entre muchos otros plasmados armoniosamente. En su interior se pueden admirar grandes obras, como los milagros de San Antonio, obra del pintor zacatecano Candelario Rivas. En la parte posterior del templo, se encuentra la capilla dedicada a Santa Rita de Casia y el Santo Sepulcro.

Una anécdota respecto a Refugio Reyes Rivas cuenta: “se sabe que entre los 14 y 19 años trabajó en las obras del Ferrocarril de Zacatecas, en donde, se dice, aprendió el cálculo de resistencia de materiales que los ingenieros constructores de la línea ferroviaria le enseñaban para distraerse”, lo cual nos denota que tenía conocimientos

muy básicos respecto a la teoría de cargas, pero que de alguna forma le ayudarían a proyectar con cierta teoría el templo.

MORFOLOGÍA ESTRUCTURAL DEL TEMPLO

Para tener una comprensión del comportamiento estructural de una edificación, hay que conocer la morfología de su construcción, ya que al entender el sistema constructivo (el conjunto de elementos, materiales, técnicas, herramientas, procedimientos y equipos, que son característicos para un tipo de edificación en particular) se podrá tener una visión más clara del porqué de la respuesta de la edificación ante distintos sucesos y condiciones de carga. Lo que diferencia un sistema constructivo de otro es la forma en que se ven y se comportan estructuralmente los elementos de la edificación, para cada sistema constructivo se usan diferentes procedimientos de construcción, distintos materiales y su funcionamiento estructural será incomparable a edificaciones similares.

Comprender un edificio patrimonial como es el caso de las iglesias y templos, implica comenzar con las pruebas que se tienen a la mano, y una construcción de este tipo ofrece muchas pistas de ayuda. Estas incluyen cosas tales como la forma de la planta, cambios de los materiales, la riqueza ornamental o la presencia de torres. Hay que buscar pruebas de alteraciones: cambio de diseño de materiales constructivos, gabletes de distintas formas, cubiertas desiguales o motivos desgastados o deteriorados por la intemperie. Examinando tanto las discontinuidades como las diferencias, la finalidad y la historia del edificio empezarán a develarse ([McNamara, 2011](#)).

La ondulante fachada (imagen 2.a) es de dos cuerpos y guarda equilibrio en su sentido horizontal y vertical; se combina la cantera de dos colores amarilla y rosa. Se compone de tres torres, las laterales más bajas que la central. Esta última es de dos cuerpos y muestra una pequeña cúpula en forma de bulbo. En toda la portada encontramos una recargada ornamentación con elementos neobarrocos góticos y neoclásicos. La planta es en forma de cruz latina (imagen 2.b), de tradición románica, con un ábside poligonal en la cabecera, misma que era usada en la mayoría de los templos de esa época. Sobre el crucero se encuentra una cúpula de doble tambor desplantada en cuatro pechinas y sostenida por tres filas de columnas coronadas por anillos metálicos hechos a base de rieles ([Villegas, 1974](#)). Dicha cúpula causó controversia durante su construcción, debido

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

a que el ingeniero Camilo Pani aseguraba que se vendría abajo al retirar la cimbra, cosa que no sucedió (Rojas, 2008). La planta es del estilo gótico (siglo XII – XV), vocablo correspondiente al adjetivo “gordo”, en sentido peyorativo, este término se usó para denominar a la arquitectura anterior al renacimiento, cuyos componentes parecían confusos, desordenados y poco dignos contra la perfección racional del arte clásico. En términos estructurales, dicha arquitectura de corte robusto contribuye a adquirir más carga para lograr una mayor verticalidad de las construcciones y vencer la esbeltez. Las principales contribuciones estructurales se dan en las cubiertas (imagen 2.c), que son de vigueta y bóveda de ladrillo apoyada en muros de carga, arcos de medio punto y columnas. El arco ojival es uno de los elementos técnicos más característicos del gótico, ya que es el arco más esbelto y ligero que el arco de medio punto por transmitir menos tensiones laterales permitiendo tomar formas más flexibles debido a su verticalidad. Las bóvedas o crucerías (cubiertas), son arcos apuntalados en forma de esqueleto, es la cascara estructural más ligera de todas las formas de bóveda hasta su fecha, es el trabajo que refleja el más alto conocimiento técnico estructural que alcanzaron los constructores de catedrales. En lugar de construir muros más gruesos para soportar el empuje del peso de las bóvedas, se construían contrafuertes (imagen 2.d) en forma de pilares adosados exteriormente a los muros con un anchura creciente. En estilo gótico perfecto se presentan las columnas con núcleo cilíndrico en forma de pilar compuesto (imagen 2.e), apoyadas sobre zócalos poligonales o bases de moldura. Estructuralmente, el conjunto da más redundancia a la estructura aportando resistencia, de igual forma al inicio y fin de las columnas, elementos que aportan una rigidez mayor y restringe desplazamientos laterales. Los capiteles (imagen 2.f), como su estilo lo marca, presentan como un tambor algo cónico, abrazados con follaje cuyos motivos se toman de la flora del país (estilo en uso durante el siglo XIV). Es un elemento robusto de transmisión de cargas verticales, con una rigidez mayor al elemento en transición. La cúpula (imagen 2.g), en forma de ténpano suspendido por nervios radiantes que arranca de una forma poligonal, formando un subconjunto de arcos colgantes de una forma muy artística. Dichos elementos, producen esfuerzos de flexión porque la circunferencia se aleja de la forma óptima de la catenaria, cayendo la resultante fuera del tercio medio de la sección, pero éste alejamiento está generalmente por encima de la catenaria, lo cual permite anular ésta flexión con anillos de acero horizontales en forma de paralelos

trabajando a la tracción y permitiendo así ajustar el polígono funicular de fuerzas a la forma circular requerida.



Imagen 2. Elementos morfológicos del templo de San Antonio.

SISTEMAS CONSTRUCTIVOS

Sistema constructivo 1. Corresponde a la fachada está compuesta de piedra labrada con muchos detalles, pegada a hueso, aparentemente se trata de una toba (ceniza volcánica consolidada) de grano muy fino de color verde-amarillo con pseudo-estratificaciones, porosa (absorbe el agua) y otra de color rosa-beige sin pseudo-estratificaciones de grano fino (imagen 3.a).

Sistema constructivo 2. Se trata aparentemente del Muro de “cimentación” construido de mampostería a case de bloques prismáticos de toba, posiblemente ignimbrita, bien consolidada, con grano de fino a mediano, color naranja-salmón con juntas rajueleadas con el mismo material, no porosa y no absorbe. (imagen 3.b).

Sistema constructivo 3. Muro de despegue de mampostería de fragmentantes de roca de formas sensiblemente redondeadas de diferentes tamaños, colocadas de forma aleatoria

y con juntas rajueleadas con el mismo material, porosa, absorbe el agua, estructura vesicular (imagen 3.c).

Sistema constructivo 4. Muros de la nave, contruidos con mampostería de sillar de una toba color beige-café claro, grano de medio a grueso, de bloques cuadrados de tamaño promedio 35x35 cm, rajueleado con, lo que parece ser, el desperdicio (fragmentos) de toba gris y verde de la fachada (imagen 3.d).

Sistema constructivo 5. Mampostería del camarín (cuerpo posterior) compuesto de mampostería con bloques de lo que aparentemente es una arenisca arcillosa muy porosa, (en uno de los bloques se encontró materia orgánica lo que podría confirmar su origen sedimentario). Los bloques están burdamente cuadrados, rajueleados horizontalmente con fragmentos de toba gris que parece ser desperdicios de la usada en la fachada (imagen 3.e).



Imagen 3. Sistemas constructivos del templo de San Antonio.

ESTUDIO ANALÍTICO Y RESPUESTA DINÁMICA

El comportamiento estructural de un edificio patrimonial o histórico depende de muchos parámetros tales como a) las propiedades de los materiales, b) el proceso constructivo, c) técnicas de fabricación, d) el ambiente de carga, e) condiciones de colindancia, entre

otros. La influencia de estos parámetros no es lineal, haciendo el pronóstico de dichos modelos difícil (Kumar, 2008). Hay que tomar en cuenta que el trabajo de investigación de la morfología estructural y los sistemas constructivos inherentes de la estructura son sumamente importantes para realizar el estudio análisis estructural de la edificación.

El análisis estructural es una de las cuatro herramientas diferentes o fuentes de información (imagen 4) que pueden ser consideradas para investigar una estructura histórica. La evidencia proporcionada por ellas se debe de integrar en un solo enfoque o entendimiento. La información resultante mediante el análisis estructural no debe estar en contradicción con la proporcionada por las otras fuentes.



Imagen 4. Fuentes de información para investigar una estructura histórica.

El rol del análisis estructural en el estudio de monumentos históricos es: (i) contribución al diagnóstico; (ii) relacionar su estado con la historia del mismo; (iii) inspección y monitoreo para contribuir a la evaluación de su seguridad estructural; (iv) validación e interpretación de modelos discretizados; (v) contribución al diseño de soluciones para su conservación y preservación.

El análisis y modelamiento estructural debe realizarse en forma combinada con las actividades de naturaleza empírica. Primero, la historia, la inspección y los experimentos son necesarios para la obtención de datos para formular el modelo estructural. Segundo, estas actividades deben de proveer información empírica para la validación. Las hipótesis son formuladas implícitamente aumentando el modelo, el cual es validado

mediante la comparación de resultados con las pruebas empíricas suministradas por la historia, la inspección y la observación (imagen 5).

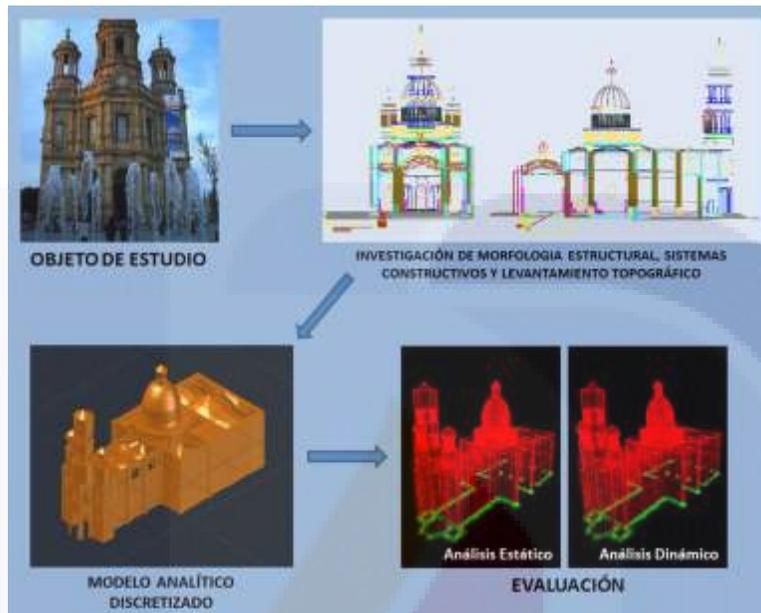


Imagen 5. Fases del análisis y modelamiento estructural.

Es posible ahora realizar un análisis para evaluar los diferentes modos de vibrar de la estructura (imagen 6).

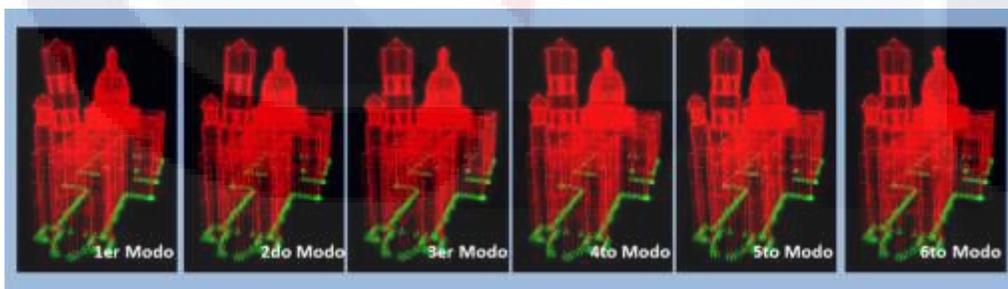


Imagen 6. Modos de vibrar del templo de San Antonio.

Es viable de igual manera el realizar el análisis de cada elemento por separado para tener conclusiones que den a nuestra investigación mayor validez (imagen 7).

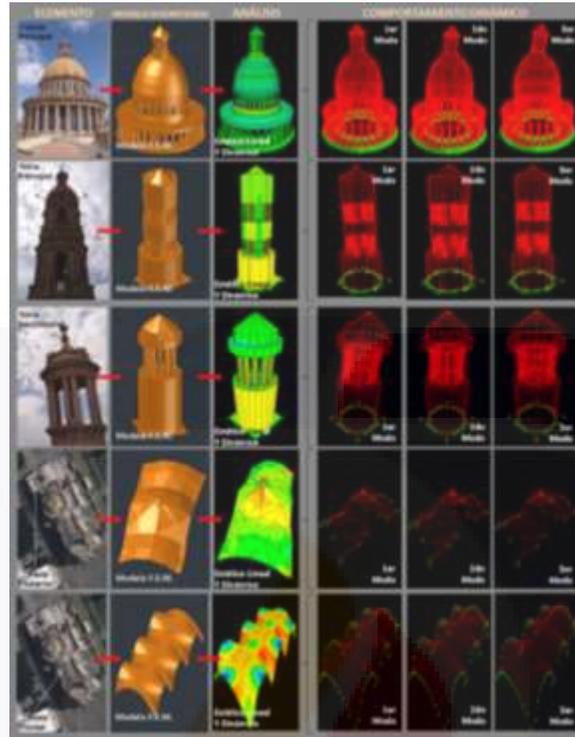


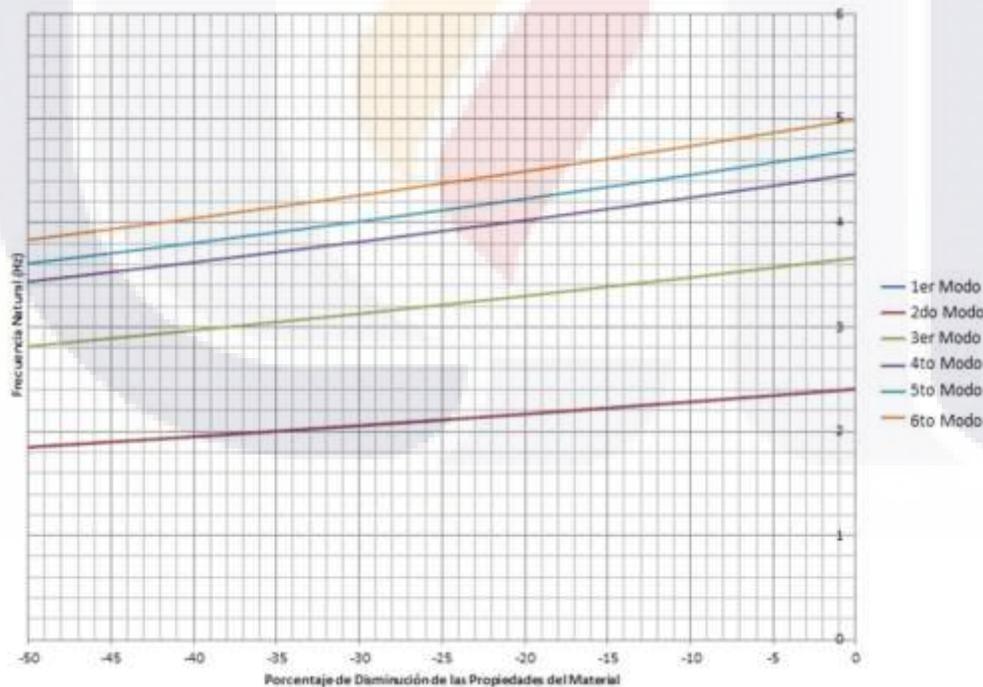
Imagen 7. Análisis de elementos singulares.

Ahora considerando valores de $\gamma=2.2 \text{ Ton/m}^3$, $E=611807.89\text{Ton/m}^2$ y $\nu=0.20$ teóricos (Pelá, et al., 2009; Scheibmair, 2012) aplicados al macromodelo y disminuyendolos hasta un 50%, que corresponde al porcentaje de disminución de resistencia de la mampostería debido al transcurso del tiempo y algunos otros efectos (Pelá, et al., 2012), y teniendo como referencia las recomendaciones italianas “Reference mechanical values: Circolare 2/2/09 n. 617”, donde el módulo de Young puede llegar disminuir su valor al orden de los $356887.93 \text{ Ton/m}^2$ que es solo un 1.22% menor al valor de E disminuido en un 50% de el presente estudio, podenos considerar la disminución de las propiedades de los materiales en el porcentaje antes mencionado como teóricamente sustentable, ahora bien, hay que tener en cuenta que para próximos estudios se deben de justificar los valores a tomar mediante pruebas en los materiales, ya sea destructivas o no destructivas.

Se obtienen las frecuencias naturales de vibrar para los primeros seis modos de vibrar del edificio (tabla 1), se observa que cada 10% que disminuyen las propiedades del material existe una tendencia de 5.13% de disminución de la frecuencia natural en todos modos fundamentales de vibrar (gráfica 1):

Propiedades	Frecuencia Natural (Hz)					
	1er Modo	2do Modo	3er Modo	4to Modo	5to Modo	6to Modo
Original	2.4032	2.4106	3.6652	4.4712	4.7	4.9928
-10%	2.2799	2.2869	3.4771	4.2418	4.4588	4.7366
-20%	2.1629	2.1695	3.2986	4.0241	4.23	4.4936
-30%	2.0519	2.0582	3.1294	3.8176	4.0129	4.263
-40%	1.9466	1.9526	2.9688	3.6217	3.807	4.0442
-50%	1.8467	1.8524	2.8164	3.4358	3.6116	3.8367

Tabla 1. Frecuencias naturales de vibrar del modelo del templo de San Antonio.



Gráfica 1. Tendencia de disminución de la frecuencia natural de vibrar.

Material 100 veces mas resistente

M1	M2	M3	M4	M5	M6
24.0320	24.1060	36.6520	44.7120	47.0000	49.9280

Material 100 veces menos resistente

M1	M2	M3	M4	M5	M6
0.2403	0.2410	0.3665	0.4471	0.4700	0.4992

PERSPECTIVAS

Es de suma importancia conocer las propiedades mecánicas de los materiales que componen la estructura del templo de San Antonio por lo que, en primer lugar, se procederá a realizar un estudio de los materiales de los bancos de materiales originales con los que componen el edificio, que son el sitio paleontológico denominado el Soyatal de la ex hacienda Ojocaliente ([Guzmán et al., 1997](#)) y de la ex hacienda de Ciénega Grande, en Clavellinas, Asientos, Aguascalientes ([INHA](#)). El material debe ser descrito a fondo apoyandose mediante su comparación con un número significativo de los resultados experimentales. Con la descripción a fondo del material podrá ser desarrollado un modelo numérico fiable y preciso para entender el comportamiento general de la construcción. Como requisito más importante: la caracterización de las propiedades mecánicas elementales. El análisis por medio de elementos finitos siempre será útil para la validación de los modelos de la estructura ([Lourenco, 1996](#)).

CONCLUSIONES

El análisis estructural es significativamente una herramienta importante para la evaluación de la salud estructural de edificios históricos. Al hacer referencia de ellos, se carecen de diversos datos inherentes a las propiedades de la estructura debido a la edad de los mismos, procesos constructivos diferentes, geometría compleja, incidencia de diversos sucesos en ellos durante el paso del tiempo e intemperización de los materiales. El trabajo de investigación es elemental en la definición la morfología y propiedades de los materiales de una construcción patrimonial para comprender su comportamiento estructural, realizar un análisis cuantitativo y cualitativo de su condición. Para finalizar, hemos visto que es viable el determinar la salud estructural de la

edificación basandose en sus propiedades dinámicas, ya que existe una tendencia homogénea de los cambios de comportamiento dinámico analizando la relación entre la frecuencia natural y las propiedades de los materiales.

BIBLIOGRAFÍA

[Burr & Cheatham, \(1995\)](#), "Mechanical Design and Analysis", 2nd edition, section 5.2. Prentice-Hall, 1995.

[Estrada, \(2008\)](#), "Una colección de imágenes que invitan a descubrir el Templo de San Antonio a su primer centenario".

[Guzman, \(1997\)](#), "Catálogo de sitios paleontológicos del estado de Aguascalientes". http://www.academia.edu/3177/Catalogo_de_sitios_paleontologicos_de_Aguascalientes.

[Herrera, et al., \(2012\)](#), "Modern Methods for Materials Characterization and Surface Analysis to Study the Effects of Biodeterioration and Weathering on Buildings of Cultural Heritage", International Journal of Architectural Heritage: Conservation, Analysis, and Restoration.

[Kokcharov & Burov, \(2013\)](#), "Structural integrity analysis", ASIN: B00BWY0ZDK.

[Kumar, \(2008\)](#), "Safety assessment of Mallorca Cathedral", Master thesis UPC, Advanced Master in Structural Analysis of Monuments and Historical Constructions.

[Lopez, \(2009\)](#), "Análisis estructural, modelación con elemento finito y dictamen técnico de la bóveda del coro del templo de San Juan Nepomuceno".

[Lourenço, \(1996\)](#), "Computational strategies for masonry structures" Ph.D. thesis Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

[Lourenço, \(2001\)](#), "A review of the out-of-plane behaviour of masonry", Masonry International, 14(3), p. 67-73.

[Lourenço, \(2008\)](#), "Damage identification in masonry structures with vibration measurements", Structural Analysis of Historic Construction, Ed D' Ayala & Fodde, Taylor & Francis Group, London, ISBN: 978-0-416-46872-5.

[McNamara, \(2011\)](#), "Como leer iglesias. Una guía sobre la arquitectura eclesiástica", Ed. H. Blume, ISBN: 978-84-96669-75-8.

[Modena, \(2004\)](#), "Structural Analysis of Historical Constructions: Possibilities of Numerical and Experimental Techniques : Proceedings of the Fourth International Seminar on Structural Analysis of Historical Constructions, 10-13 November 2004 Padova, Italy, Volume 1

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

Navarro, (2012 a), "Entrevista al M. En Arq. José Luis García Rubalcava".

Navarro, (2012 b), "Entrevista al Arq. Leonor Méndez Martínez".

Navarro, (2012 c), "Entrevista a la Arq. Mercedes Barba".

Pacheco, et al., (2012 a), "Las vibraciones como una fuente de información para evaluar el comportamiento estructural de edificios patrimoniales", Ponencia in extenso "2do Foro Internacional Convergencias del Diseño y de la Construcción, Arquitectura, Ingeniería Civil y Urbanismo", 11 y 12 de junio de 2012.

Pacheco, et al., (2012 b), "Las vibraciones como una fuente de información para evaluar el comportamiento estructural de edificios patrimoniales", XVIII Congreso Nacional SMIE, Noviembre 2012.

Pelà, (2009), Continuum Damage Model for Nonlinear Analysis of Masonry Structures, Ph.D. Thesis, Technical University of Catalonia, University of Ferrara.

Pelà, et al., (2009), "Seismic assessment of masonry arch bridges". Engineering Structures, Issue 31, pp. 1777-1788.

Continuum damage model for orthotropic materials: Application to masonry

Ramirez H., (1997), "Atractivos del estado de Aguascalientes, recorrido panorámico a través de su historia, arte, tradiciones y bellezas naturales", Archivo histórico del estado de Aguascalientes.

Roca, et al., (2001), "Roca, et al., (2009), "Studies on the structure of gothic cathedrals" Historical constructions, Uminho.

Roca, et al., (2009), "Purpose and Possibilities of Structural Analysis". SA1 Lectures. Barcelona: Advanced Master in Structural Analysis of Historical Constructions and Monuments.

Rojas, et al., (1994), "Breve historia de Aguascalientes. Ilustrada, reimpresa", Colegio de México, Fondo de Cultura Económica, 223 páginas.

Scheibmair, (2012), "Nonlinear seismic analysis of a masonry arch bridge", SAHC Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya

Topete, (1973), "Guía para visitar la ciudad y el estado" (Archivo histórico del estado de Aguascalientes). 3ra. Edición.

Török, (2010), "In Situ Methods of Testing Stone Monuments and the Application of Nondestructive Physical Properties Testing in Masonry Diagnosis", Materials, Technologies and Practice in Historic Heritage Structures, Springer Science+Business Media B.V.

[Vázquez, et al. \(2004\)](#), "Identificación de daños en vigas de hormigón experimentales y analíticas utilizando metodologías modales", Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil, Vol 4, No 2

[Villegas, \(1974\)](#), "Arquitectura de Refugio Reyes. México".

[Zhu, et al., \(2005\)](#), "Detection of Structural Damage Through Changes in Frequency", WUJHS Wuhan University Journal of Natural Sciences, Article ID:1007 1202(2005)06-1069-05.



Capítulo 9

Anexo 2 - Caso de estudio: "Evaluation of the structural health of heritage buildings by the use of vibration-based damage detection methods"

Actas: "Proceedings of the Cultural HELP 2014; Cultural Heritage and Loss Prevention".

Autores: Animas H., Pacheco J y Ortiz J.A.

Fecha de publicación: Octubre de 2014 (Casa das Artes, Oporto, Portugal).

Evaluation of the Structural Health of Heritage Buildings by the Use of Vibration-Based Damage Detection Methods

Héctor Animas¹, Jesús Pacheco², José Ángel Ortiz³

¹ DCAA (PNPC) of the Universidad Autónoma de Aguascalientes; Av. Universidad #949, Ciudad Universitaria, Zip Code 20131, Aguascalientes, México; hectoranimas@hotmail.com

² CCDC of the Universidad Autónoma de Aguascalientes; Av. Universidad #949, Ciudad Universitaria, Zip Code 20131, Aguascalientes, México; jesus.pacheco@edu.uaa.mx

³ CCDC of the Universidad Autónoma de Aguascalientes; Av. Universidad #949, Ciudad Universitaria, Zip Code 20131, Aguascalientes, México; aortiz@correo.uaa.mx

ABSTRACT: The historical buildings are an important part of our cultural heritage that we have to preserve for the future generations due by all their intrinsic values (tangible or intangible). The study of these constructions in order to conserve them is a complex task because there are a variety of factors that modify or alter the mechanical properties of their materials due to the passage of time. Generally, the condition of heritage buildings can't be evaluated using traditional destructive techniques, because the structure does not have to be damaged. With the aim of assess these buildings we need to apply non-destructive methodologies, the vibration-based damage detection methods (VBDDM), are a viable option to adopt in order to perform the task of assessing the structural capacity of heritage buildings, the principle of these methods is that any damage, produces observable changes on the dynamic response of the structural system that can provide information about the overall condition of the structure. This paper presents state of the art of the VBDDM available and an analysis of the feasibility of their use to apply in heritage structures. Likewise is presented a methodology applied in the study of a heritage building in Aguascalientes, Mexico.

KEYWORDS: Structural health; VBDDM; Dynamical properties; Global techniques.

1 INTRODUCTION

The knowledge of the condition of constructions is an issue of vital importance for the structural engineering since nowadays there are several causes that damage the infrastructure that is in currently use. In the present context, recognize the condition of a structure is important and necessary to determine its level of safety to withstand events. The large amount of historical buildings that are still in use, generate a need for this type of evaluation with the purpose of ensuring their preservation or rehabilitation. These buildings include a wide variety of archaeological monuments and buildings considered heritage due to its importance for the community (local and international). Generally the heritage buildings cannot be evaluated on its structural health through traditional invasive or destructive techniques (e.g. load testing and core extraction). Therefore, the use of non-destructive methodologies becomes a viable option to recognize the structural health condition of these buildings to propose a maintenance plan in order to improving their conservation.

The fact that the decrease in mechanical properties or the damage on elements cause changes in the dynamic characteristics of a structure (i.e. these characteristics are a global property), is a reason to use vibration-based monitoring methods for the damage identification. Any kind of structure is exposed to static and dynamic loads (that may be of natural or transitory provenience), for which the structural monitoring is a viable technology to study the structural response of the buildings, as it combines data collection with an analysis thereof. Data can be obtained from a non-destructive sensor network, from which can be obtained indicators to detect structural defects (i.e. damage or degradation). This information can be acquired periodically, continuously or in real time, and be associated to different variables (e.g. deterioration, corrosion, fatigue, chemical reaction, moisture and environmental variability) as well as the physical properties relating to: loads, stresses, displacements, deformations, accelerations, cracking, vibration, dislocations and any other necessary parameters in order to achieve the operational assessment of the structure. Structural monitoring success depends heavily on the correct interpretation of the information obtained through the sensors. In general, the main objective of all the methods is the location of structural damage by identifying them at early stage of occurrence, and (if it's possible) provide an estimation of the severity.

2 BACKGROUND

The practice of the SHM on its inception, was mainly based in a periodic visual inspections or surveys of the condition of a structure under study [1], in the late nineteenth century, the railroads workers listened the acoustic emission of the train lines to detect failures or cracks. These techniques of visual and auditory recognition, were the most commonly used alternatives because of the lacked of technology to perform better studies [2]. The possibility of preventing the occurrence of failures due to defects in a structure through early detection, motivated the researchers to develop evaluation methods to allow know the condition or deficiencies in the structural elements [3]. In late 70's, the consideration of the existence of a physical and tangible relationship between stiffness, mass and natural frequency changes, was the impulse to experiment by using dynamical methods as an alternative to identify damage [4]. One of the early forms of damage detection based on vibration for engineering structures was developed in the same decade within the context of non-destructive testing by analyzing changes of natural frequency of the structures [5]. Such tests has succeeded in the scope of aerospace engineering, where the detection of damage proved to be a viable tool to apply for modal inspection systems in space shuttles [6]. The same technique was also used in industry for the evaluation of machinery elements, and especially in the aviation industry where it is used for the detection of damage in aircraft and helicopters [7]. It was not until end of the 90's that the term of "Structural Health Monitoring" (SHM) formally appeared, thanks that previously were developed monitoring and data acquisition technologies, when as sub-branch of SHM; the "Vibration-Based Monitoring" (VBDM) emerged, focused on the dynamic behavior of a structure, in which beyond the observation and interpretation, it's based on the continuous identification of the physical parameters of a structure by using time-dependent data [12]. For which, since the late twentieth century have been proposed diverse methods of analytical damage detection (VBDDM), which are based on the hypothesis that the structural damage causes changes on the dynamic parameters of any structure. These methods have taken great popularity due to the technological advances through the invention of sensors and systems for data acquisition [13]. Based on this relationship between the degradation of the structural health and the changes on the dynamic response, the aim of VBDDM is detect and locate damaged, and if it is possible, predict the impact of the damage on the structure [14]. Historically, in the field of civil engineering the vibration based monitoring activities has been applied mainly in large bridges [15]. Although it has proven to be a promising method for monitoring modern civil engineering systems of reinforced concrete or steel, the methodology for its application to other structures, such as unreinforced masonry systems, has not yet fully developed [18].

3 GENERAL HYPOTHESIS OF THE VBDDM

The main hypothesis of the method proposes that when is reduced the structural efficiency; there is a change on the dynamic properties of the structure. The use of these dynamic parameters (i.e. stiffness, mass and damping), as an indicator of damage, will enable us to assess the structural behavior. In this regard, the changes on the dynamic characteristics of a structure can be understood like the loss of structural capacity [20]. It is not difficult to see that the philosophy behind the damage detection methods intuitively indicates that the damage or the occurrence of a defect in a structure will produce a change on its performance or response [21].

It is known that the dynamic properties of a structure are a function of its mass, stiffness and energy dissipation capacity. A change on these properties, due to: loss of mechanical properties, corrosion, material fatigue, degradation, erosion and cracking, will have a direct influence on the dynamic behavior of the structure [23]. The most frequently used parameters for the inspection of the dynamic characteristics of a structure are: the vibration period, damping and modal forms [24]. This parameter identification will be performed by the use of analytical techniques in order to extract information for each property of the structure by an experimental monitoring and a mathematical analysis [2].

The principle of the methodology consists to measure the vibrations of the structures by the effect of the environmental noise and determine the dynamic characteristics of the structure [20]. This ambient noise will provide the structural response due to an external excitation [15]. The obtainment of the dynamic response of the structure will be the result of "filter" the excitation signal through the structure and get the variations of the magnitudes of analysis (i.e. displacements, velocities and accelerations) versus time [25], while extracting the dynamic properties will require special data processing techniques based on the theory of structural dynamics [17]. To conduct a study of damage

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

detection, it is proposed to carry out a mathematical model that could represent the dynamic behavior of the structure (plus an experimental phase in which the real dynamic response is obtained). To give meaning to the concept of damage, in mathematical terms, it will be necessary to resort to the comparison between two different states of the system (at least), in which the initial is the one where the structure is undamaged and the second in whom there is idealized the damage. A key part will be the calibration of the model, because an inadequate representation of the physical phenomena will lead to the failure of any method employed [26], such model updating techniques are generally based on "iterative methods" [21]. The relationship between physical parameters and dynamic characteristics obtained will allow the detection of damage [28]. Overall, the damage could be detected as the changes on the system that adversely affect the current or future performance of the structure [21].

4 DAMAGE

The damage can be defined as any change on the mechanical properties of materials that could cause changes on the geometry of the structure, including: boundary conditions, connectivity between elements, change in cross sections, load redistribution and any other factor capable of eliciting unusual behavior (present or future of a building) [15]. In this definition is implicit that the concept of damage, becomes meaningful only by a comparison between two states of the structure, one of which is considered to be the initial state (in some cases the state without damage) and the damaged state [30]. Therefore, minimal changes as a crack in a structural element will produce local changes on the flexibility of it, which would result in changes of the static and dynamic behavior of the structure [31]. This structural damage affects the original stiffness resulting in more flexibility of the structure and consequently in a structure more vulnerable to static and dynamic actions [32]. In brief, damage in historical constructions is the set of changes induced on its structural system that will eventually lead to loss of its functionality.

As time goes on, the buildings left to serve in the same way as when they were built; this means that its mechanical properties degrade gradually (and even its esthetic). Different factors propitiate the degradation of the properties of the materials used in the construction of heritage buildings: i) weathering; ii) biodeterioration; iii) human action; and iv) natural accidents [33]. Such actions fatigue the life of the constructions and affect the own parameters of the building, these parameters are any structural variable that describe the structural model (modulus of elasticity, stiffness, density, geometry and damping) [34]. The weathering produces mechanical and chemical effects on masonry as a composite (rock and mortar). For the first effect, the masonry is attacked physically (e.g. by hitting, rubbing or overload); for the second effect, masonry passes through chemical changes that result in its gradual disintegration (the climate along with local environmental conditions also influence the degradation of masonry biodeterioration, and increase through the effects of micro-flora) [11].

5 VIBRATION-BASED DAMAGE DETECTION METHODS

The term of damage detection can defined like the set of operations and necessary work to be performed in a building to assess its structural health by the location and categorization of the existing affectations on its structural system with the help of visual, destructive and non-destructive techniques. The principle behind the VBDD algorithms is that any changes (defects), produces observable changes in the dynamic response of the structural system [22]. Such changes in the response of the building will be susceptible due to their own vibration, because the measurement of the vibration of the structure is a sensitive parameter to be measurable. An acceptable tool to investigate this dynamic feature of the buildings is the ambient vibration tests [13]. The measurement of the structural response produced by the environmental excitation provides a way of assessing the response of the structure to an external excitation [15]. This external excitation will be caused by the usual natural phenomena that affect the structure under its normal operating conditions such as traffic, wind and seismicity.

The common idea in all methods to identify damage is not to affect the integrity of the buildings by comparing information from a damaged state versus a reference state. The damage is determined by the relating change on the dynamic characteristics with the properties that define the structure [13]. This technique arises from the necessity of preserving intact the building by inspecting the structure performing non-destructive testing, which as a result, caused the union of tuning techniques (of theoretical models) with experimental monitoring (in situ), being jointly able to increase the capacity

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

of the analytical predictions made by finite element models [38]. It is possible to apply multiple VBDDM, where starting from obtaining the dynamic response of a structural system, it is feasible to determine a rational procedure to evaluate the performance of a building, so it is necessary to calibrate an experimental modal test with a numerical model [39]. A key aspect of modeling is the parameterization of the structural damage system. Based from approaches must be considered a model with damages, the successful estimation of the damage will depend on the quality of the model used, the type of structural discretization proposed and the mechanism of injury (the damage model can be simple or complex).

5.1 Classification

Depending on the amount of information of damage resulting from the application of the VBDDM, will be classified into four levels depending on its scope [40]: 1) identification of damage that has already occurred; 2) level 1, plus the determination of its location; 3) level 2, plus the estimation of its severity, and 4) level 3, plus a prediction of the remaining life of the structure. Recently, according to [41], was proposed a new classification with an intermediate level based on the precepts of SHM, adopting a new classification of the level 3, which seeks to know the information about the type of damage, another subsequent level 4, where it is proposed to calculate the extension of damage and, a last level 5 that aims to predict the residual life and provide information about the current operability of the structure.

VBDDM can also be classified into linear and nonlinear methods [15]. Linear methods assume that the structure is still elastic after the failure, and the structure never collapse, while the nonlinear methods should be used in case of the existence of cracking [42].

So far, the VBDDM that not use theoretical structural models reach (using the first classification levels) the level 1, and level 2 at times [15]. When the monitoring techniques are complemented with numerical structural models, level 3 is reached. To achieve the level 4, the research should be complemented with fracture mechanics models [15]. Most applications reported in literature [15] remain in the early stages of the previous classification, so the development of a methodology to achieve the level 4 is still one attractive line of research.

Basically the damage detection methods can be grouped into local and global methods. Local methods inspect the structure in relatively small areas. These methods are very sensitive and can detect damage although it is not possible to use them in inaccessible zones [39]. The global methods focus on the damage localization by identifying changes in the structural parameters from the propagation of waves on the structure. The basis of this method lies the existence of a structural model that represents the dynamic behavior of the structure, which aims to obtain the dynamic response of the structure to an excitation of the same on specific points of interest where the experimental monitoring was performed in order to compare the behavior and calibrate the model to obtain a numerical representation of the real structure [34].

5.2 Local methods

Local methods are traditional damage detection strategies consisting of visual inspection and non-destructive local evaluations [37]. Local methods provide insight into the mechanical or physical properties of the constituent material properties of the structure, punctually, these methods require access to the area to be inspected and obviously its coverage is limited [26]. Classical methods involve visual or experimental procedures, such as: 1) visual inspection; 2) ultrasonic emission; 3) X rays; and 4) Eddy currents. However, such methods require that the location of the damage is known and that the structure to be inspected is easily accessible [43]. These limitations have led to the development of the global monitoring [44].

5.3 Global methods

Global methods are techniques that provide information on the overall condition of a structure, without necessarily determine or locate the damage, but able to provide an overall rating of structural integrity [26]. Global methods use the fact that damage into a specific point causes a reduction in stiffness at that location which has an influence on the global behavior of the whole structure in terms of time and space. For example, the reduction in stiffness leads to a decrease of the Eigen frequencies [39]. In general, global damage detection methods assume that structural modal parameters are a

function of the physical parameters [37]. The experimental modal analysis, by which the dynamic properties of a real system are obtained, it is useful for the detection and location of damage. This task is accomplished through the study of the variation of any of its modal parameters, as always damage is associated with a change in its overall dynamic behavior [45]. To understand the changes in the dynamic characteristics of the buildings is necessary to use seismic instrumentation to obtain experimental data. This involves determining the appropriate amount and location of the necessary devices throughout all the structure to know the response [46].

5.3.1 Method based on changes of frequency (ω)

The measured change on the vibration characteristics due to variation of the properties of the structure is an indication of damage. The most common indicator of damage is the change in the natural frequency and its change on the mode shapes [14]. It is known that the modal parameters of a structure (the frequency and mode shapes) are based on physical properties (mass, stiffness and damping). The modal parameters are the solution of the differential equation of motion that is based on the mass, damping and stiffness of the structure. Therefore, any changes in physical properties will cause changes in the modal properties. Since the mode shapes change when a physical change occurs, the aim of the method is to detect the changes of the vibration mode obtained from experimental tests conducted, where basically from variations of the natural frequency is possible to identify and quantify the presence of damage in a structure due to the decrease of their mechanical properties [47]. This technique is classified into methods that require experimental data and analytical models [48]. Among all the structural characteristics of vibration, the natural frequency is relatively simple and accurate to measure in a structure: it provides the information of overall damage into the structure and can accurately be measured by sensors; the most important thing is that it can be easily obtained even with low ambient vibration excitation [49]. When there is a damage on a structure, the strength is reduced [50], and in theory, when the damage occurs: "the natural frequencies of a structure decreases" [4].

It should be noted that changes often have significant practical limitations to its application; the sensitivity of the equipment to detect frequency changes requires very precise measurements for the data acquisition [15]. Although the loss of structural elements results in measurable changes in the natural frequency of the building, damage and effects of hyper static structures are compensated by a redistribution of loads and stresses, while in some monitoring works, has been reported that the loss of a member on a structure have result on changes in the fundamental natural frequency by up to thirty percent [1]. Another limitation of this method is that the frequencies cannot provide spatial information about structural changes in general, we must take into account that: "the frequency cannot provide spatial information on the structural changes in general" [49].

5.3.2 Method based on changes of modal shapes (ψ)

A mode shape is a standard deviation associated with a particular natural frequency. The relative displacement of all the parts of a structure for that particular mode is represented, providing spatial information of motion. The shapes of the normalized mode are characterized by the fact that all parts of the structure are moving together. Thus, they can be considered as standing waves with elements of fixed nodes. If a structure is damaged locally, the changes of the mode will occur in the vicinity of the damage. Therefore, a comparison between the two data sets from mode shaped can be used to identify damages.

Many modal analysis techniques feature the extraction of the modal form from the data measured in the time domain. Detection methods have been developed by direct identification of the mode shapes or their curvatures [48]. Numerous researchers have used this approach to develop methods for identifying faults; many of them use the Modal Assurance Criterion (MAC) to determine the level of correlation between modes for the presence of damage [51].

5.3.3 Modal assurance criterion (MAC)

Damage into a structure produces changes on its mode shapes, additional damage may cause the generation of new mode shapes associated with the structure. Therefore it is possible to detect the presence of failure by noticing these changes [4]. This method relies on the so called "modal scale factor" (MSF) which is another way of quantifying the damage and represents a measure of the slope of the line that best fits the relationship between the coefficients of the modal vectors of the damaged condition against condition without damage [52]. The MAC value relates by measuring the similarity

of two mode shapes (mode shapes on the intact and damaged state). Where the MAC value 1.00 is a similarity of perfect fit between the two states and MAC value 0.00 means that they are completely different, which this tend to zero can be regarded as the presence of damage [30]. Then, for the same mode shape vector (for one point), i (without damage) and j (with damage) MAC is defined as (Equation 1):

$$MAC = \frac{|\Phi_i \cdot \Phi_j|^2}{|\Phi_i \cdot \Phi_i| \cdot |\Phi_j \cdot \Phi_j|} \quad (1)$$

The expression of this factor is calculated in the same way on the coordinates of each point analyzed, therefore each node will have a MSF, and shall be having more proximity to the location of damage as it tends to values that do not match (MAC = zero).

From this approach have been developed similar methods as: the Coordinate Modal Assurance Criterion (COMAC) that differs from the definition of MAC due to the way that gives a precise measure of the difference between two sets of mode shape, and the Modal Flexibility Assurance Criterion (MFAC) that corresponds qualitatively to the analytical comparative of the analytical flexibility matrix Ka^{-1} and experimental flexibility matrix Ke^{-1} .

One of the main disadvantages in the use of the MAC and other criterions of this kind as indicators of damage is the ability to estimate the detailed mode shape, measurements are required in a large number of points and the duration of the measurements can be significantly increased if the change of mode shape exist, so it requires long time to process the data acquired [50].

5.3.4 Method based on changes of curvature (φ)

The use of the curvature for the damage identification is based on the assumption that changes on the curvature of the mode shapes are locatable in the region of the damage. This method can be useful to detect the location of damage on a structure which is mainly deformed by bending [53]. The curvature is proportionally inverse to the flexural stiffness as shown (Equation 2):

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{M(x)}{EI} \quad (2)$$

Where $M(x)$ is the bending moment at the location x , E is the Young's modulus of elasticity and I is the inertia moment of the cross section. It is apparent from the equation, that any reduction in the bending rigidity (EI) due to damage will lead to an increase in the curvature, and that the gap between the shapes of the curvature mode will be larger in the place of damage [55]. Thus the reduction of EI results in a increasing of the curvature in the damage zone. Therefore, it is expected that the absolute difference between the curvature of the mode shapes of the structure without damage and the damaged structure will provide the damaged region [48]. The mode shape curvatures are sensitive to structural changes; therefore they are suitable for the location of damage. The curvatures are calculated directly from the identified mode shapes by a central difference approximation [56].

However, if the damage is distributed throughout the structure, it may not be a good indicator of damage if an initial data point measurement of the intact structure is not available. Even without the data as a starting point, it is impossible to locate the abnormalities by the change of curvature.

5.3.5 Method based on changes of stiffness (K)

By observing changes in the stiffness of the elements which compose a structure, it exist a directly influence in its lateral rigidity, a method based on the geometric transformation matrix is proposed, the damage is expressed as the loss of stiffness (Equation 3). With this method it is possible to determine where the structure has been damaged and estimate the percentage of degradation of their stiffness.

$$DIFF_{stiffness} = \frac{K_i - K_f}{K_i} (100) \quad (3)$$

Each damage state is available for an array of different stiffness. Then, a state of damage, and its evolution can be detected from the observed differences between these matrices. Knowing the stiffness matrix of the undamaged structure (reference structure) and stiffness matrix determined from its

dynamic characteristics, it is possible to locate the damage [46]. Using this approach, it is equally possible to determine the increased of stiffness that has gained the structure after been rehabilitated

5.3.6 Method based on changes of flexibility (K^{-1})

Another class of methods for the identification of damage is based on the use of the dynamically measurable flexibility matrix to estimate changes in the static behavior of the structure. Because the flexibility matrix is defined as the inverse of the static stiffness matrix, can be used to relate the applied static forces and the resulting displacements on the structure [51]. The flexibility matrix can be obtained with high accuracy by the normalized mass matrix and an Eigen frequency, the flexibility matrix is expressed as follows (Equation 4):

$$K^{-1} = \Phi \cdot \omega^{-1} \cdot \Phi^T \quad (4)$$

For the conditions of the normalized mass matrix (modal form i):

$$\Phi = [\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n] \quad (5)$$

And the diagonal frequency matrix (model form i):

$$\Omega = \text{DIAG}[\omega_i^2] \quad (6)$$

This method operates differentiating matrices for damaged and undamaged systems. The change in flexibility is generally expressed as an absolute or relative value. Considering the diagonal entry of the matrix of flexibility is formulated [57] a relative indicator of damage (Equation 7):

$$\text{rel}\Delta K^{-1} = \frac{K_u^{-1} - K_d^{-1}}{K_u^{-1}} \quad (7)$$

We must take into account the fact that items with minimal flexibility, such as those near the supports or boundary restraints conditions, are susceptible to released results with numerical errors, this can be explained with the example of the cantilever beam, analyzing the item from the free end until the embedment, the analytical flexibility in early stages before the damage will be equal to the theoretical flexibility without damage.

5.3.7 The inverse problem

These methods are generally located into the levels 2 (determination of the location of the damage) and 3 (quantification of the severity of damage) [51], they consists on compute the parameters of damage, e.g. length, size and location, from the frequency shifts [15]. The experimental techniques for the determination of the dynamic characteristics of a mathematical model can be referenced as the inverse problem, that is, through the response of a system can be inferred the equations that describe its behavior, and hence the physical characteristics could be determined dynamically. These properties that define the system parameters are called modal parameters [22]. This method can be considered a "model tuning"; the model of the structure is discretized using a finite element model to describe their physical characteristics. Then, the dynamical parameters may be extracted from the model (this means, modal parameters required can be calculated from the analytical model) [58]. The experimental detection will be followed after this step to update the numerical model by comparing the modal properties extracted with experimental results [39]. Using the concepts of system identification, the modal properties and measures can be used to set or modify the structural analytical model for an exact damage diagnosis. There are two categories of structural system identification: the first attempts to establish an analytical model called direct identification system; the other is to modify the existing analytical model or called indirect identification system [59].

5.3.8 The forward problem

These methods usually fall into level 1 (determination of the presence of structural damage) of damage identification [51], consist of calculate the change in modal frequencies from a known type of damage. Typically the damage is modeled mathematically and then to determine the damage, the measured frequencies are compared with the frequencies predicted [15].

6 THE USE OF VBDDM ON HERITAGE BUILDINGS

The structural behavior of a heritage building depends on many parameters, such as: a) the material properties; b) the construction process; c) the manufacturing techniques; d) his load environment; and e) its boundary conditions. The influence of these parameters is not linear, making the prediction of the behavior of these structures a difficult task [60]. It has been recognized by experts in this field, that such challenges are mainly inherent to the geometric complexity and the age of the constructions [61], because from the structural point of view, several challenges arise: i) characterization of materials; ii) complex geometry; iii) discontinuity on the elements; iv) determining the actions that acted over time; v) numerical modeling of damage; vi) data acquisition is limited; and vii) lack of documentation to compile the history of the buildings [62].

Adopting from the literature [64], generally it can be said that VBDDM can be applied to heritage buildings in the following cases: 1) changes in their structure; 2) if construction is affected by additional external loads; 3) to monitoring a demolition process; 4) to systems subject to long relative displacements or degradation of materials; 5) for those where it is desired to apply an structural reinforcement; and 6) for the assessment of fatigue phenomena in materials. The implementation of a monitoring system based on vibration measurements for historical constructions raises two challenges [65]: The first concerns to the proper design of the data acquisition system, and the second is the identification of the damage that could be detected, this is because the monitoring acquired is really a large amount of data collected, that requires more research to process it.

Some recommendations made by [66], for vibration-based monitoring on historical buildings are: i) have a detailed characterization of the building; ii) the actions that affect the construction shall be monitoring; iii) even if the climate action is not the target, is required to be characterized; iv) monitoring should be carried out for a period long enough to cover a total cyclic action; v) to provide meaningful information, the critical points of the structure or materials should be selected; vi) the global nature of the structural response should be taken into account when designing the monitoring strategy; and vii) the monitoring system should be designed to allow the measurement of the desired effects. ICOMOS recommends a methodology for the evaluation of the ancient structures that requires data acquisition in the first place (e.g. the geometry of the building and historical compilation), secondly inspection of the current condition of the building by visual inspection and experimental tests. Then perform numerical modeling to simulate and evaluate the behavior of the structure, to finally perform the safety assessment and design of corrective actions, if necessary [67].

7 CASE STUDY

It is known that current legal codes and standards are oriented to the design of modern constructions; the application of these regulations to review the structural safety of historic buildings becomes obsolete or even inapplicable due to the age of the materials and existing affectations [68]. There are in the literature recommendations to follow for the analysis, monitoring and evaluation of historic structures [69], as well as case studies performed successfully [71] (among many others). Should be noted that all studies and recommendations emphasizes on the importance to perform a multidisciplinary investigation that involves: historical investigation, inspection, monitoring, structural modeling and analysis [68].

This paper presents the study of a heritage building located in the state of Aguascalientes, Mexico. The VBDDM chosen is oriented to the obtention of the global capacity of the structure since is unknown the overall mechanical properties of each one. By monitoring the response of the response of the building under ambient vibration, a modal update is performed by the calibration of the frequency obtained (ω) and the Young's modulus of the numerical model. The study of the building was conducted (based on the literature recommendations) applying the follow adapted methodology: i) acquisition of preliminary data; ii) historical research; iii) inspection of the present condition; iv) construction of a structural model and its analysis; v) monitoring of its response due to the ambient vibration; vi) data analysis; vii) acquisition of dynamical parameters; and vii) modal updating (to obtain E and f_k).

7.1 *Temple of San Antonio of Padua*

Built between the years 1895-1908 in two stages (having a pause between 1896 and 1897), the Temple of San Antonio of Padua is a monument and masterpiece known not only for his religious importance

(originally commissioned by the Franciscan order), also for his architectural (Roman style, Neo-baroque, Neoclassical, Gothic and Russian style), symbolic, and historical significance [77]. Its structure is based on un-reinforcement load-bearing walls of fine-grained sandstone joined with sand and lime mortar, the domes and vaults are made based on clay-bricks, and the facade is constructed with quarry stone of three different colors: green, yellow and pink [78]. More detailed descriptions of its history, architecture and structural morphology can be reviewed on the literature [78].

A first approach to the structural condition was made (Figure 1), that include: acquisition of the geometry of the building by a topographic survey, the discretization of the model by shell elements and a linear elastic structural analysis were performed considering worst conditions of the material data taking theoretical properties from the Euro code 6 ($f_k=4.0N/mm^2$, $E=500f_k$, $G=0.4E$ and $\nu=0.3$).



Figure 1. First approach to the structural condition of the Temple with SAP2000.

In the same way, it was done a modal analysis in which the structure was studied with a consideration of their young modulus in a range between -20% to +20% of its value of $f_k=4.0N/mm^2$ (Table 1).

Table 1. Results of the modal analysis.

ω for 0.8E	ω for 0.9E	ω for E	ω for 1.1E	ω for 1.2E
1.3132	1.3929	1.4682	1.5399	1.6084

The equation that describes the trend of the modal data (Equation 8) is obtained, being E in N/mm^2 .

$$E = 898.3\omega^2 - 16.253\omega + 5.9102 \quad (8)$$

An experimental stage (Figure 2), was conducted in order to obtain the natural frequency in X (transversal) and Y (longitudinal) directions of the building.

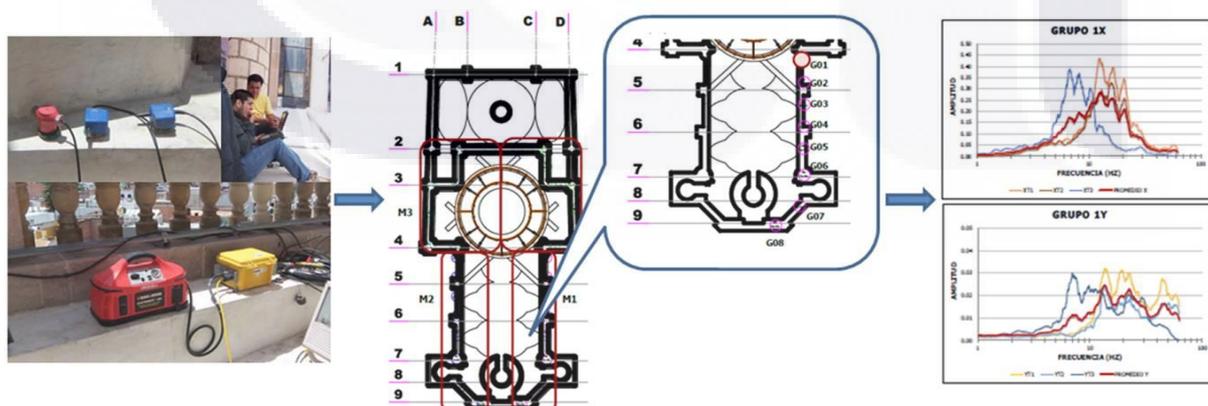


Figure 2. Experimental studies in the Temple.

Obtaining a corresponding frequency for the first mode in X direction of 1.74Hz and for the Y direction a frequency of 2.46Hz, by the use of the method of peak picking [82]. It is chosen for the modal update the data in X because it will result in the most unfavorable condition of the material (Figure 2), because the frequency will increase as the stiffness increases similarly [83].

Applying the Equation 8 for the case of the frequency of 1.74 Hz is obtained theoretically that the update should be made by shifting the data from $E=2000\text{N/mm}^2$ to $E=2697.48\text{N/mm}^2$ in the numerical model. The analysis was performed obtaining as a result for the first analytical mode a frequency of 1.7445Hz, which fits into an error of approximation of 0.25%, that can be taken as an acceptable value due to the closeness of the results obtained (experimental and theoretical).

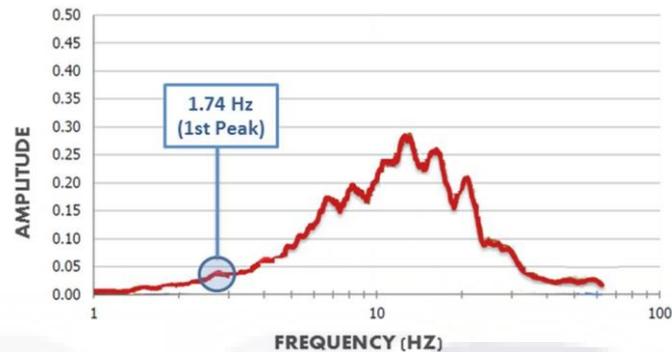


Figure 3. Experimental studies in the Temple.

This means that we can consider that the global elasticity modulus of the structure corresponds to the obtained in the updating, and that its possible maximum compressive stress (f_k) is 5.39N/mm^2 , which indicates that the Temple has a good quality of mechanical properties in general.

8 CONCLUSIONS

Most studies have concluded that the damage detection was only possible under controlled conditions, where the structural damage already has been generated; this means that the detection of minimal changes on a structural system includes a dependence of the sensitivity for the acquisition of the modal parameters. In practice, the detection of damage where the vibration characteristics represent the overall properties of the structure (e.g., the ω method), there is not sufficient sensitivity to detect damage locally, although it is possible to determine the overall capacity building like in the case study presented. Almost all damage identification methods rely on linear structural models, the further development of methods should be able to explain the effects of the nonlinear structural response.

Measurement errors and the intrinsic variability are key factors that can impede the determination of the modal parameters. There are several causes that make the information difficult to handle (e.g. too much data, lack of excitation, the direction of excitation, interaction between elements, electronic interference, imperfect connections and many other sources that launch the virtual data) causing the possibility of losing the critical information about the structure between all the data acquired, which is a subject of controversy among many researchers. Also, the climate and environmental conditions produce small changes in the response of the structure and dependence on these transient data can result in false alarms.

REFERENCES

- [1] Chang P.C., Flatau A., Liu S.C. (2003) Review Paper: Health Monitoring of Civil Infrastructure, Structural Health Monitoring.
- [2] Quintero, A.F. (2010) Estado del arte en monitorización de salud estructural: un enfoque basado en agentes inteligentes. *Ciencia E Ingeniería Neogranadina*, 20(1), 16.
- [3] Driánfel, (2004) Identificación de daños en vigas de hormigón experimentales y analíticas utilizando metodologías modales. *Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes E Infraestructura Civil*, 4(2).
- [4] Dackermann U. (2010) Vibration-Based Damage Identification Methods for Civil Engineering Structures using Artificial Neural Networks (PhD Thesis). University of Technology Sydney, Sydney, Australia.
- [5] Brownjohn, J. (2011) Vibration-based monitoring of civil infrastructure: challenges and successes. *J Civil Struct Health Moni*, 1, 17; 79 – 95. doi:10.1007/s13349-011-0009-5.
- [6] Hunt, D.L. (1992) Application of enhanced coordinate modal assurance criteria. Presented at the 10th International Modal Analysis Conference, California, EUA.
- [7] Begg, R.D., Mackenzie, A.C., Dodds, C.J., Loland, O. (1994), Structural integrity monitoring using digital processing of vibration signals. In: Proceedings, 8th Offshore Technology Conference, Houston, Texas.
- [8] Cuc A.I. (2002) Vibration-Based Techniques for Damage Detection and Health Monitoring of Mechanical Systems. Thesis of Master of Science. 127 pag., University of South Carolina. U.S.A.
- [9] Pfeiffer, H., & Wevers, M. (2007) Aircraft integrated structural health assessment–Structural health monitoring and its implementation within the European project AISHA. EU Project Meeting AISHA Leuven Belgium (Vol. 26, pp. 1-9).

- [10] Achenbach J.D. (2008) From NDE With AQ To SHM And Beyond. Deutsche gesellschaft für zerstörungsfreie prüfung.
- [11] Kumar, A., Srivastava, A., Goel, N., Narasimhan, V., Nayak, A. (2009). An approach to structural health assessment and management technology. Industrial Technology 2009 ICIT 2009 IEEE International Conference on (pp. 1-6). IEEE.
- [12] Brownjohn M.W., De Stefano A., You-Lin Xu, Wenzel H., Aktan A. E., (2011) Vibration-based monitoring of civil infrastructure: challenges and successes, *J civil struct health monit* 1:79-95.
- [13] Cruz, G.J. (2012) Propuesta de un Procedimiento Integral para la Evaluación Estructural de Puentes (Thesis). Universidad Veracruzana., Veracruz, México.
- [14] Prabhu S. (2011) Feature assimilation in structural health monitoring applications. *Civil Engineering Topics*, 4 (Conference Proceedings of the SEM, Series 7), 11. doi:10.1007/978-1-4419-9316-8-26.
- [15] Doebling, S.W. (1996) Damage Identification and Health Monitoring of Structural and Mechanical Systems from Changes in Their Vibration Characteristics: A Literature Review.
- [16] Farrar C. R., Cornwell P. J., Doebling S. W., (1999) Excitation methods for bridge structures, *IMAC-XVII*.
- [17] Kie D. (2001) Instrumentation of Bridges for Structural Health Monitoring. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 5(3).
- [18] Ventura C.E. (2010) Structural Assessment of Damaged Bridges Using Ambient Vibration Testing. *Society for Experimental Mechanics Inc.*, 5(Proceedings of the IMAC-XXVIII), 7. doi:10.1007/978-1-4419-9825-5-5.
- [19] Prabhu S. (2011) Structural health monitoring of historic masonry monuments (MSc Thesis) Clemson University.
- [20] Pacheco J., Animas H., Ortiz J. A., García J. L., Zermeño M., Cordero T., Navarro M., Araiza G., (2012) The use of ambient vibration as a source of information to evaluate the structural behavior of historic buildings, Paper for the XVIII National Congress of the Mexican society of Structural Engineering, ISBN 978-607-9599a-0-9.
- [21] Grafe H. (1998) Model Updating of Large Structural Dynamics Models Using Measured Response Functions (PhD Thesis). Imperial College of Science, Technology and Medicine University of London, London U.K.
- [22] Atienza R. (2004) Técnicas de actualización aplicadas a la detección de daños (MSc Thesis). Escuela técnica superior de ingenieros aeronáuticos, UPM Madrid España.
- [23] Vazquez T.D. (2004) Identificación de daños en vigas de hormigón experimentales y analíticas utilizando metodologías modales. *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes E Infraestructura Civil*, 4(2).
- [24] Boroscheck R. (2010) Diagnóstico e identificación de daño estructural (No. Bit 73) (p. 8).
- [25] Casano A. M. (2009) Analisis de estructuras bajo acciones dinámicas. Universidad Tecnológica Nacional, Panamá.
- [26] Arceo D. (2013). Diseño de algoritmos genéticos para la detección de daños en estructuras. México: SCT.
- [27] Blakely K. (2000) Updating Models Data.
- [28] Moatasem M. (2011) Detection of damage location using mode shape deviation: Numerical study. *International Journal of the Physical Sciences*, 6(24), 11. doi:10.5897/IJPS11.971.
- [29] Sohn H. (2003). A Review of Structural Health Monitoring Literature: 1996–2001. Los Alamos.
- [30] Anaya and Barajas (2011) Metodología para la detección de daños en estructuras metálicas empleando la técnica de análisis modal teóricoexperimental (Thesis). Universidad Industrial de Santander, Colombia.
- [31] Robles, S. I. (2005). Detección de daño de elementos estructurales lineales. *Mecánica Computacional*, XXIV(VIII).
- [32] Peralta M.H. (2008) Análisis numérico y experimental de vibraciones para la evaluación del comportamiento de un puente. *Mecánica Computacional*, XXVIII, págs. 2033–2052.
- [33] Herrera L. K., Borgne S. L., Videla H. A., (2012) Modern Methods for Materials Characterization and Surface Analysis to Study the Effects of Biodeterioration and Weathering on Buildings of Cultural Heritage, *International Journal of Architectural Heritage: Conservation, Analysis, and Restoration*.
- [34] Quintana J. A. (2009) Análisis del Método de Búsqueda Global para la Detección de Daño y Monitoreo Estructural de Puentes (Phd Thesis), Instituto Politécnico Nacional, México.
- [35] Carpinteri A., Lacidogna G., (2006) Damage monitoring of an historical masonry building by the acoustic emission technique, *Materials and Structures*, 39:161–167.
- [36] Török Á. (2010) In Situ Methods of Testing Stone Monuments and the Application of Nondestructive Physical Properties Testing in Masonry Diagnosis, *Materials, Technologies and Practice in Historic Heritage Structures*, Springer Science+Business Media B.V.
- [37] Wang L. (2009) Review of Vibration-Based Damage Detection and Condition Assessment of Bridge Structures using Structural Health Monitoring. The Second Infrastructure Theme Postgraduate Conference: Rethinking Sustainable Development: Planning, Engineering, Design and Managing Urban Infrastructure.
- [38] Zhou Z. (2006) Vibration-based damage detecton of simple bridge superstructures (PhD Thesis). University of Saskatchewan, Saskatoon.
- [39] Molina M.S. (2012) Deteccion de daño en puentes mediante un modelo experimental. XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Acapulco, Guerrero.
- [40] Rytter (1993) Vibration based inspection of civil engineering structures. University of Aalborg, Denmark.
- [41] Worden K. (2004). An Overview of Intelligent Fault Detection in Systems and Structures. *Structural Health Monitoring*, 3(1), 85–98.
- [42] Salgado, R. E. (2008) Damage detection methods in bridges through vibration monitoring: evaluation and application (PhD Thesis). Universidade do Minho-ISIS, Guimaraes, Portugal.
- [43] Avendaño Y.M. (2009) Monitoreo de salud estructural empleando filtros Kalman (MSc Thesis). Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Manizales, Colombia.
- [44] Amezquita, J. P. (2012). Monitoreo de vibraciones en tiempo real para detectar daños en estructuras (PhD Thesis). Universidad Autónoma de Queretaro, Queretaro, México.
- [45] Rojas R. (2006). Detección de fallos en estructuras mediante la medida de la variación de sus propiedades dinámicas (Thesis). Escuela técnica superior de ingenieros. Universidad de Sevilla., España.
- [46] Escobar, J. A. (2007). Detección de daño en edificios mediante sus características dinámicas. ai México.
- [47] Wolff T. (1989). Fault detection in structures from changes in their modal parameters (p. 8). Presented at the IMAC VII.

- [48] Sotelo and Acevedo (2009) Identificación de daño en pórticos 2d empleando información modal y el método particle swarm optimization (PSO) (Thesis). Universidad Industrial de Santander.
- [49] Zhu H. (2005). Detection of Structural Damage Through Changes in Frequency. *Wuhan University Journal of Natural Sciences*, 10(6). doi:1007 1202(2005)06-1069-05.
- [50] Jaques S. (2013) A Review of Damage Detection and Health Monitoring of Mechanical Systems from Changes in the Measurement of Linear and Non-linear Vibrations. *Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systemes*.
- [51] Gomez B. (2012). Detección de Fallas en Estructuras Civiles Parcialmente Instrumentadas a través de Observadores de Estado (PhD Thesis). Instituto Politécnico Nacional, México.
- [52] Ewins D. J. (1984) *Modal testing: Theory and Practice*. Research Studies Press, Ltd, Letchworth, Hertfordshire, England.
- [53] Silva E. (2009). Comparación de las propiedades dinámicas de edificios de características similares ubicados en zonas geotécnicas diferentes (M.Sc. Thesis). UNAM, México.
- [54] Dawari V.B. (2012) Structural Damage Identification Using Modal Curvature Differences. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*, 6.
- [55] Hamze A. (2012) Comparative study of damage identification algorithms applied to a plexiglas beam. 15th International Conference on Experimental Mechanics, Porto/Portugal.
- [56] Stewering U. (2006). Comparative Study of Vibration-based Damage Detection Methods on a Bridge.
- [57] Yan. (2004). Structural damage location by combined analysis of measured flexibility and stiffness. Presented at the International Conference on Structural Engineering, Mechanics and Computational (SEMC), Cape Town, South Africa.
- [58] Mottershead J. (1993) Modal Updating in Structural Mechanics. *Journal of Sound and Vibrations*, 167(2), 29.
- [59] Nakte H. G. (1988). *Application of System Identification in Engineering*. Vienna: Springer.
- [60] Kumar (2008) Safety assessment of Mallorca Cathedral, UPC M.Sc. thesis, Advanced Master in Structural Analysis of Monuments and Historical Constructions.
- [61] Lourenço P. (2001) A review of the out-of-plane behaviour of masonry, *Masonry International*, 14(3), p. 67-73.
- [62] Roca P., Cervera M., Gariup G., Pela L., (2010) Structural analysis of masonry historical constructions, classical and advanced approaches, *Arch Comput Methods Eng*, 17:299-325, DOI 10.1007/s11831-010-9046-1, Spain.
- [63] Modena C. (2004) Structural Analysis of Historical Constructions: Possibilities of Numerical and Experimental Techniques : Proceedings of the Fourth International Seminar on Structural Analysis of Historical Constructions, 10-13 November 2004 Padova, Italy, Volume 1.
- [64] Brownjohn J. (2004) A Structural Health Monitoring Paradigm for Civil Infrastructure. In Session 6 - Fibre Optic Workshop (p. 15). Nottingham, United Kingdom.
- [65] Ruocci G. (2009) Application of the SHM methodologies to the protection of masonry arch bridges from scour (PhD Thesis). Politecnico di Torino, Italia.
- [66] SmooHS (2008) Monitoring of Historic Structures.
- [67] Araujo A.S. (2011) Seismic Assessment of St James Church by Means of Pushover Analysis – Before and After the New Zealand Earthquake. *The Open Civil Engineering Journal*, 6(1-M5), 13.
- [68] Roca P. (2012) SA1.12 General methodology for analysis and restoration. SAHC 2012 UPC Lectures.
- [69] ICOMOS (2001) Recommendations for the analysis, conservation and structural restoration of architectural heritage. International Scientific Committee for Analysis and Restoration of Structures of Architectural Heritage.
- [70] Lourenco P., Ramos L.F. (2011) Recent developments in vibration analysis of historic and masonry structures: damage detection and wireless sensor networks. EVACES 2011 – Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures.
- [71] Vestroni F., Beolchini G.C., Antonacci E., Modena C. (1997) Identification of dynamic characteristics of masonry buildings from forced vibration test. 17th WCSE. ISBN: 0-08-042822-3.
- [72] Ramos L.F., de Roeck G., Lourenco P., Campos-Costa A. (2006) Vibration Based Damage Identification of Masonry Structures. *Structural Analysis of Historical Constructions*, New Delhi.
- [73] Gentile C., Saisi A. (2006) Ambient vibration testing of historic masonry towers for structural identification and damage assessment. *Construction and Building Materials* 21 (2007) 1311–1321. doi:10.1016/j.conbuildmat.2006.01.007.
- [74] Ramos L.F., de Roeck G., Lourenco P., Campos-Costa A. (2007) Global damage identification based on vibration signatures applied to masonry structures.
- [75] Ramos L.F., Marques L., Lourenco P., de Roeck G., Campos-Costa A., Roque J. (2007) Monitoring of historical masonry structures with operational modal analysis: two case studies.
- [76] Gentile C., Saisi A., Gallino N. (2009) Operational Modal Analysis and FE modelling of a masonry tower. IOMAC'09 – 3rd International Operational Modal Analysis Conference.
- [77] Topete A. (1973) Aguascalientes, guide to visit the city and the state, Historical archive of the city of Aguascalientes, 3rd Edition, No. OCLC: 50201775, México.
- [78] Navarro M. (2013) Geometrical and damage survey of the Temple of San Antonio and structural analysis of his current status, M. Eng. Thesis, Autonomus University of Aguascalientes, Mexico.
- [79] Gómez J., Aguascalientes en la historia, 1786-1920, III, Vol. 1, Gobierno del Estado de Aguascalientes/Instituto Mora, ISBN 968-6173-43-9, Mexico, 1988.
- [80] Villegas V. M., *Arquitectura Refugio Reyes*, Imprenta Madero, No. OCLC: 1997345, Mexico, 1974.
- [81] Animas H., Navarro M., Pacheco J., García J. L., Arroyo M. G., Cordero T., Esparza C. J. (2013) Morphology and structural behavior of the temple of San Antonio, 3rd FICAA, Universidad Autónoma de Aguascalientes, Mexico.
- [82] Brincker R., Zhang L., Andersen P. (2007) Modal identification of output-only systems using frequency domain decomposition.
- [83] Pau, A. (2005) Dynamic Characterization of Ancient Masonry Structures. Università di Roma La Sapienza, Italia.

Capítulo 10

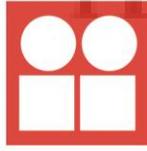
Anexo 3 - Caso de estudio: "Structural analysis of the Temple of San Antonio in Aguascalientes, Mexico"

Artículo indexado de publicación: "INTERNATIONAL CONFERENCE ON STRUCTURAL ANALYSIS OF HISTORICAL CONSTRUCTIONS".

Autores: Animas H., Navarro M., Pacheco J., García J.L., Cordero T., Esparza C.J. y Ortiz J.A.

ISBN: 04-2014-102011495500-102

Fecha de publicación: Octubre de 2014 (México, D.F.).



**INSTITUTO
DE INGENIERÍA
UNAM**

COORDINACIÓN
Estructuras y Materiales

Edificio 2 - 401
Tel: +52 (55) 56233600 ext. 8404
fpem@pumas.iingen.unam.mx

México D.F. a 17 de febrero de 2015

A quien corresponda:

Por medio de la presente hago constar que el artículo intitulado **Structural analysis of the temple of San Antonio in Aguascalientes, Mexico**, cuyos autores son *H. Animas, M. Navarro, J. Pacheco-Martínez, J.L. García, T. Cordero, C.J. Esparza y J.A Ortiz-Lozano*, fue presentado en el **9th International Conference of Structural Analysis of Historical Constructions – SAHC2014**, realizado en la ciudad de México del 15 al 17 de octubre de 2014. Así mismo, dicho artículo se encuentra publicado en las memorias del congreso siendo F. Peña y M. Chávez editores, con ISBN e Indexación en trámite.

Atentamente,

Dr. Fernando Peña Mondragón
Presidente del Comité Organizador
SAHC2014
<http://www.sahc2014.mx>

STRUCTURAL ANALYSIS OF THE TEMPLE OF SAN ANTONIO IN AGUASCALIENTES, MEXICO

H. Animas¹, M. Navarro², J. Pacheco-Martínez³, J. L. García⁴, T. Cordero², C. J. Esparza², and J. A. Ortiz-Lozano³

¹ DCAA (PNPC), CCDC, Universidad Autónoma de Aguascalientes
Av. Universidad # 940, Ciudad Universitaria, C.P. 20131, Aguascalientes, México.
hectoranimas@hotmail.com

² MIC (PNPC), CCDC, Universidad Autónoma de Aguascalientes
Av. Universidad # 940, Ciudad Universitaria, C.P. 20131, Aguascalientes, México.
arq.marinahe@hotmail.com , tonatiuh_cordero@yahoo.com.mx, carlosjob.es@gmail.com

³ Department of Construction and Structures, CCDC, Universidad Autónoma de Aguascalientes
Av. Universidad # 940, Ciudad Universitaria, C.P. 20131, Aguascalientes, México.
jesus.pacheco@edu.uaa.mx, aortiz@correo.uaa.mx

⁴ Bureau of Projects on Heriage Rescue and Restoration, Aguascalientes State Government
Av. Lic. Adolfo López Mateos Ote. 1500, Zip Code 20260, Aguascalientes, Ags.
jose.garcia@aguascalientes.gob.mx

Keywords: Shell Macromodels, Static Behavior, Pushover Approach, Modal Analysis, Change of Frequency.

Abstract. *Built between the years 1895-1908, the Temple of San Antonio is a monument and masterpiece cataloged like historical construction. It is known not only for his religious importance, also for his architectural, symbolic, and historical significance. Given the cultural significance of the building for the city of Aguascalientes, is priority their preservation. The knowledge of the structural integrity of the building is critical for its appropriate and safe use, also for carry out the planning of preventive maintenance. The scope of this work is to present a multidisciplinary study carried out to achieve the structural analysis of the Temple of San Antonio,. This work presents the main results of the structural analysis of the building. For this purpose, three-dimensional analytical shell macromodels are evaluated and validated using the finite element method. This analysis was performed taking into account the linear and non-linear behavior of the masonry. The static safety level of the structure was evaluated, additionally, the higher probability zones to be damaged were located, and seismic vulnerability was evaluated using a pushover approach.. The dynamic response of the structure was determine for different values of the material properties, after that a comparative assessment between all of the results was performed, in order to determine how the change of the properties can affect the results of the modal analysis.*

1 INTRODUCTION

The construction in ancient times was practiced based on traditional knowledge and following general rules of building processes [1]. One example of this, is the Temple of San Antonio (Figure 1), which was designed and built by Refugio Reyes Rivas (1862-1965), autodidact and practical constructor, who was awarded in 1975 (post mortem) with the title of architect due to the materialization of several buildings that now are considered heritage [2, 3, 4]. Actually, the studied building shows damage in different elements (structural and non structural), first of them observed 25 years ago, which have increased in number and intensity since then, however it is believed that the different interventions and the increased in recent years of the closer vehicular traffic are the principal causes of damage [5]. Also, it was not until a few years ago that his structural study has caught the attention of researchers [6, 7]. Heritage buildings of historical importance as in this case, generate the needing to perform different assessments with the purpose of guarantee their preservation or rehabilitation [8, 9]. For this goal, a monument requires a good comprehension of its structural behavior under static and dynamic loading to obtain the enough data in order to reach a successful intervention [10].

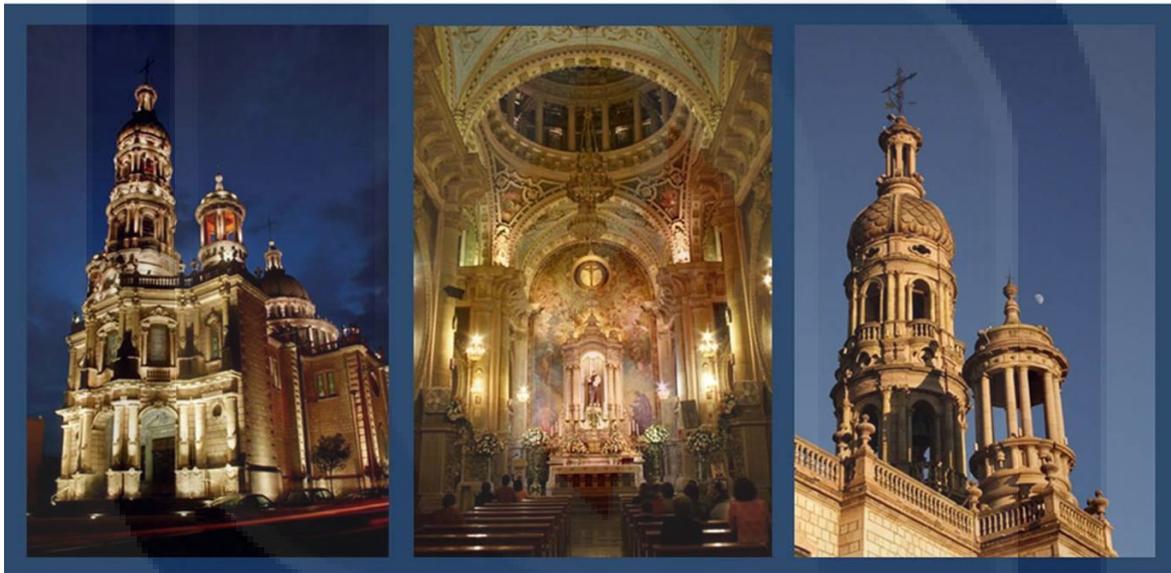


Figure 1: Views of the Temple of San Antonio [11].

2 METHODOLOGY OF THE CASE OF STUDY

There are in the literature different proposed methodologies for the analysis and evaluation of historic structures [12, 13, 14, 15]. All of them aim to provide results that can be used to preserve the heritage constructions, due to their intrinsic values, whether tangible or intangible (architecture, art, economical importance, cultural identity, history, etc.) [10]. This study was conducted applying the follow methodology: i) acquisition of the preliminary data; ii) election of the philosophy of structural analysis; iii) determination of the mechanical properties of the material; iv) construction of the structural model: discretization of the structural features in the modeling; v) definition of the actions and loads to take in account for the analysis; vi) representation and analysis of the results; and vii) assessment of the structural condition. Finally we define the future work to improve the study.

3 IMPLEMENTATION OF THE METHODOLOGY

In order to conduct a proper analysis, it is very important to propose a suitable methodology which help us to understand the study case. This section describe each of the steps taken to assess the structural condition of the temple.

3.1 Preliminary Data

The acquisition of the preliminary data involved a) the documentation of the location of the material sources, b) the history of interventions of the building, c) the acquisition of descriptive information as the architectural features, and the used constructive systems, and d) the geometrical survey. In order to have an understanding of the structural behavior of a building, we must know the history and the morphology of the construction, besides comprehension of the constructive system (the elements, materials and techniques, which are characteristic for the type of building) we could have a clearest picture about the response of the building facing different events imposing different load conditions [6].

The Temple of San Antonio is one of the most important architectural heritage constructions of the state of Aguascalientes, it is located in the historic downtown of the capital between the streets Zaragoza and Pedro Parga (coordinates: 21°53'8.24" N, 102°17'30.54" W). This construction began on October 22, 1985 and ended on December 8, 1908. It was a project originally commissioned by the Franciscan order, but currently administered by the Augustinian order. It was built in two stages, having a period of pause of work between 1896 and 1897 [16]. Its structure is based on un-reinforcement load-bearing walls of matacán (a soft and fine-grained sandstone) joined with sand and lime mortar [5, 17]. The domes and vaults are made of masonry based on clay-bricks, and the facade was constructed with quarry stone of three different colors: green, yellow and pink [7]. The temple mostly hosts paintings done by the artist Candelario Rivas (1878-1949), which were made between 1906 and 1908. These paintings mainly reflect the miracles of Saint Antony of Padua. Most of the interior decorations were brought from Europe, the bells were made in the United States and the tubular organ manufactured by the German company Wagner [2, 3, 4]. The National Institute of Anthropology and History (INAH, with its acronym in Spanish) has catalogued the Temple of San Francisco as a heritage building property of the Mexican nation (INAH id 00967). This appointment is awarded only to buildings linked to the history of México.

The understanding of a heritage building such as churches and temples, involves starting with the evidence at first hand, they provides many clues appreciating and observing its composition [18]. In this case, the temple has several elements and architectural styles and features to refer. The ichonography of the building is a latin cross form (style of Roman tradition), with a polygonal apse at the back, where are located a chapel dedicated to Saint Rita of Cascia and the Holy Sepulchre (as an underground catacomb).The facade (Gothic), that shows Neo-Baroque and Neo-Classical ornamentation, consists of three towers (the lateral ones lowers than the central). The central tower has circular section and is formed by two bodies (two stories), and it is topped with a bulbous dome (Russian style). The other two towers have the same section of one story. The main dome is located in the central part of the cross form at the top. It is supported by two rows of columns (concentric alignment), restricted by metal rings with the shape of rails. The vaults are constructed of joist and brick (armed in branch radiated), they rely on the bearing walls and ogiva-shaped arches (characteristics of the Gothic). The building has buttresses shaped pillars attached externally to the walls with increasing width (from the top to the bottom), instead of having thicker walls to withstand the lateral pressure due to the weight of the vaults. The composite columns have polygonal bases that provide both stiffness and more range of transition of the vertical loads to the foundation.

In general structural terms, the gothic architecture having the temple helps to support vertical load caudes by the robustness of the construction [6]. The temple in general is composed by six different constructive systems: i) one corresponding to the facade of stone carved with different details; ii) a second in the foundation made by large blocks of masonry of prismatic form; iii) a third corresponding to the bottom walls of masonry stone with joints of mortar and stone; iv) the fourth is the bearing walls of masonry blocks formed by averaging measures of 35x35 cm; v) the fifth is the masonry walls of the rear body; and vi) the sixth which is the roofing system, integrated by domes and vaults [7]. Although it was not until the end of the seventeenth century, when the theories of structural analysis were developed allowing to rationalize the size of the elements of the constructions [1]. The temple was designed without the technical rigor of analysis which already existed for the late nineteenth century. An anecdote cataloged in the archive of the state of Aguascalientes regarding about the constructor said that: "he learned to calculate the strength of materials with railway engineers builders when he worked with them before the age of 20", which indicates that he had very basic knowledge about the theory of loads, but his few knowledge somehow helped him to project the temple with a little of theory [6]. Another example of this, was the main dome that caused controversy during its construction, because the engineer Camilo Pani (1878-1955) claimed that it would collapse after removing the formwork, collapse that didn't happen [19]. There is no existence of documents or physical evidence of the original plans or drawings with dimensions of the temple, so that a topographical survey (Figure 2) was conducted to define the geometry [7] by mean of which was obtained the deformed shape of the structure.

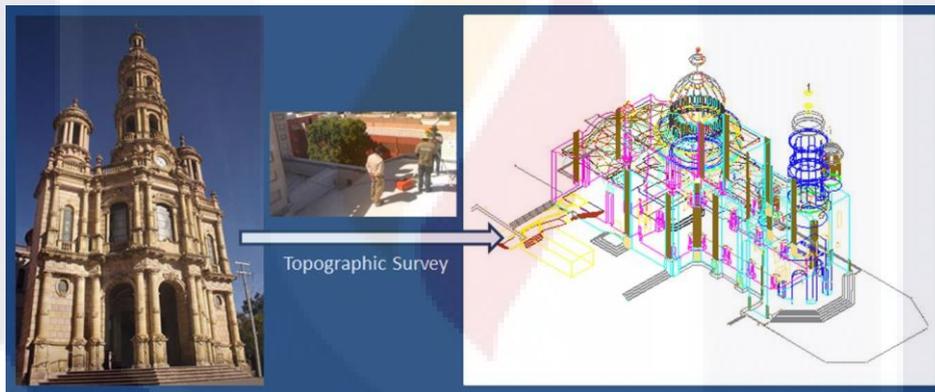


Figure 2: Topographical survey of the Temple of San Antonio [7, 11].

3.2 Structural analysis

The elected programs to simulate the structure were the software SAP2000 and ANSYS (currently, several studies are available in the specialized literature, in which the use of these programs are validated for carry out historical structures analysis [20, 21, 22, 23, 24, 25]). The softwares allowed us evaluate correctly the linear and non linear behavior of the masonry. The done analysis both with ANSYS as with SAP 2000 had the same input features (geometry, materials, boundary conditions, loads and degrees of freedom), in order to perform a verification of the results. The numeric modeling of a real ancient structure (as the temple of San Antonio) is a complex computationally demanding task [20], nevertheless some general recommendations were followed in order to elaborate a geometric model able to describe adequately the geometry and morphology of the real construction, representing the structural elements in the most simple form for the analysis [13], then a macro-model of the temple was constructed with shell elements, excluding existing damage and considering constant vertical walls.

3.3 Mechanical properties

The knowledge of the structural materials properties ought to be a necessary condition to perform a successful analysis; laboratory or in-situ experimental proceedings and visual inspections are of utmost importance to define them [26]. Masonry exist in many forms, shape, size and physical characteristics [27], so that, thorough models (as detailed and simplified micromodels [1]) are difficult to set for the analysis of a structure of the dimensions of the study case, for this reason, the mechanical properties are setting as a heterogeneous anisotropic composite material.

Although in the early 80's and between 2008 and 2011 restoration works were performed at the temple by the centenary of its construction [5, 17], there are currently (at end of 2013), 90 different cataloged pathologies in 37 different zones of the temple [7], in addition, there is a active geological fault (caused by the phenomenon of subsidence) located at a approximate distance of 500 meters [28]. For these reasons, and because there are no recommendations in the Mexican normative regarding a resistance of material to choose for historic buildings, the decision was to consider, based on the Eurocode 6 [29], the smallest possible theoretical value for compressive strength ($f_k = 4.0 \text{ N/mm}^2$). Also, the EC6 suggests to consider the relationships for Young's modulus (E), of a value between 400 and 600 times f_k , in this study is elected a value of 500 times f_k , and shear modulus (G), like 40% of the Young's modulus (E).

The mechanical behavior of the different types of masonry exhibits a very low tensile strength [30], here the tensile strength, will be considered as 5% of f_k . For the poisson ratio, was elected a common value of 0.20 and for the density a value of 2200 kg/m^3 . A summary of these values (for the linear elastic model), can be seen in the Table 1.

Table 1: Material properties.

Compressive Strength (f_k)	Tensile Strength	Young's Modulus (E)	Shear Modulus (G)	Density (γ)	Poison Ratio
4.0 N/mm^2	0.2 N/mm^2	2000 N/mm^2	800 N/mm^2	2200 kg/m^3	0.20

There are circumstances or phenomenon that might require a nonlinear solution. The analyses implemented for this building was a static analysis, a modal analysis and non-linear static analysis. To achieve this last, a non-linear behavior of masonry adapted from a model from the literature was proposed [31], which agree with the ultimate stress and strain capacity desirable to perform the analysis, and in the highest part of the compression curve the rheological model have a behavior similar to the concrete and finishing with a strain softening, different case in the tension where the curve is given by a straight bilinear behavior (Figure 3).

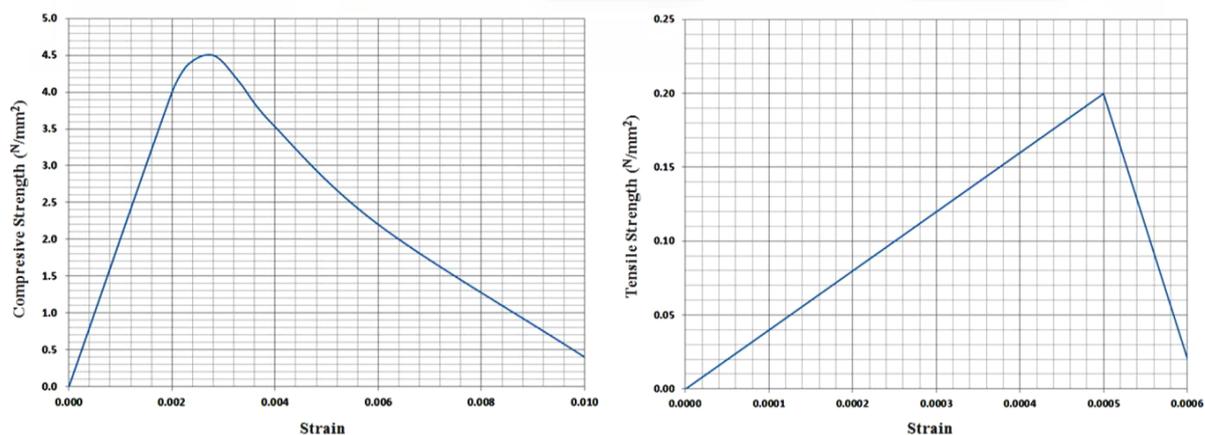


Figure 3. Non-linear properties for masonry (compression and tension).

3.4 Discretization and modelling

The units, mortar and unit–mortar interfaces were disregarded in the 3D homogeneous continuum masonry model (macromodel [1]). No distinction between the individual units and joints was made; the model of the structure was elaborate by continuum surface members (shell elements). The model had 18175 nodes (with six degrees of freedom each one), 17240 surface elements (isotropic triangle elements of three nodes and isotropic square members of four nodes). The meshed model consists of more than 330000 elements. In the linear analysis the elements have three integration points, and in non-linear analysis the elements have five integration points (for both computer programs).

The support conditions, were assumed that there are not translations and rotations in it's base. Also, were considered steel rail beam elements (6" high and 4" width W beam section), used in the dome with steel A36 properties, which act peripherally bordering the dome at the base, preventing the lateral opening of the dome due to horizontal loads. This consideration was made because in previous studies [6], was found that if these beam elements are not included, then an stress amplification were generated and it exceeded in a high percentage the permissible compressive and tensional stresses, causing non acceptable deformations.. The geometry were sketched in a program with DXF as format of output , which was imported to SAP2000. The same coordinates of the nodes and arrange of the elements were used in ANSYS and SAP2000.

Due to the macromodel is based on planar elements, is necessary to find the thicknesses of them, for which an analysis was performed in order to find an equivalence of inertias between the shells and the real structural elements (e.g., in the case of zones where there exist walls, buttress and inner columns, the equivalent thickness in the shell was equal to the inertia of the three components). Similarly, the thickness of the shell only corresponded to the inertia of the elements, but not in weight, so it was calculated the proper weight ratio, and a scale density factor that will affect the density of each shell element was proposed (the fact of not consider this change in density could affect the results, because it could consider a different load to bear). In the following chart are detailed last these considerations (Figure 4).

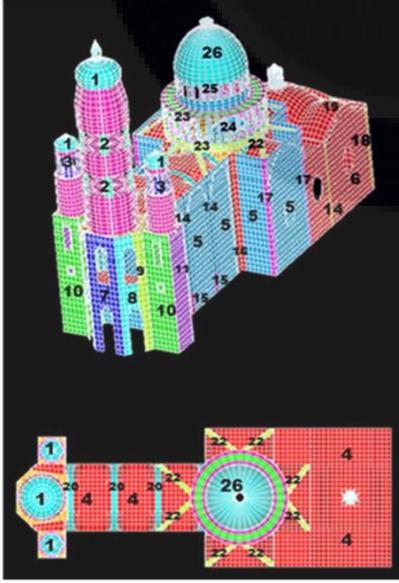
Location	No.	Element Description	Equivalent Thickness (m)	Density Scale Factor
	1	Top of the Towers	0.150	1.000
	2	Principal Tower's Columns	0.600	0.564
	3	Lateral Tower's Columns (Both)	0.600	0.318
	4	All Vaults	0.260	1.000
	5	Temple Walls	1.100	1.000
	6	Rear Temple Walls	0.900	1.000
	7	Facade (Principal Entrance)	1.880	1.000
	8	Facade (1st Half part of Lateral Entrance)	2.000	1.000
	9	Facade (2nd Half part of Lateral Entrance)	1.790	1.000
	10	Interior Walls of the Entrance to the Towers	1.375	0.830
	11	Exterior Walls of the entrance to the Towers	0.810	1.250
	12	1st Bay's Buttress (Top Side)	1.970	0.870
	13	1st Bay's Buttress (Bottom Side)	2.030	0.870
	14	2nd & 3rd Bay's Buttress (Top Side)	2.580	1.080
	15	2nd & 3rd Bay's Buttress (Bottom Side)	2.730	1.070
	16	Central Bays	2.100	0.840
	17	Corner Bays	1.730	0.720
	18	Lateral Bays (Rear of de Temple)	1.620	0.920
	19	Bays of Rear Facade	2.740	0.800
	20	Arches	0.750	1.000
	21	Support of the Structure of the Dom	0.460	1.000
	22	Ring Around the Support of the Structure of the Dom	0.500	1.000
	23	Slabs of the Structure of the Dom (Top and Bottom)	0.400	1.000
	24	Equivalent Masonry Beams in Top Slab of the Dom	1.240	1.000
	25	Bottom Columns of the Structure of the Dom	0.270	0.990
	26	Top Columns of the Structure of the Dom	0.210	1.330
	27	Dom	0.150	1.000

Figure 4. Thickness and density scale factors used in the model.

3.5 Considered effects and loads

For gravitational analysis only were considered the weight of the materials (with linear elastic properties).

The static pushover analysis was made in two stages: the structure was subjected to gravity loading and then, a monotonic displacement-controlled lateral load pattern was imposed which was continuously increased through elastic and inelastic behavior until an ultimate condition was reached. It consisted in a monotonic increase of the horizontal acceleration in longitudinal direction (measured in PGA).

The modal analysis was performed because the frequency of the structure is an important data that could help to calibrate the model, by mean of the measuring of the response of the structure to the ambient vibration using non-destructive techniques [32].

3.6 Performed analysis

The analyses were performed, and we found that the displacements (Figure 5) and stresses obtained with both softwares, were similar having a $\pm 4.0\%$ of difference (because of these reason is showed the average value). We considered that the error between the results of the two analyses was despicable and then the numeric analyses are validated.

The same results were obtained in the gravitational linear analysis and in the first stage of the non-linear pushover analysis, in which the structure, that also was analyzed affected by self weight, show that the structure did not reach an inelastic behavior at his normal condition.

In modal analysis only had a difference in the results while the mode shape is getting higher, this could be explained because SAP2000 solves the system using eigen-vectors, and in ANSYS was chosen the block-lanczos method, but both keep the same mode shapes.

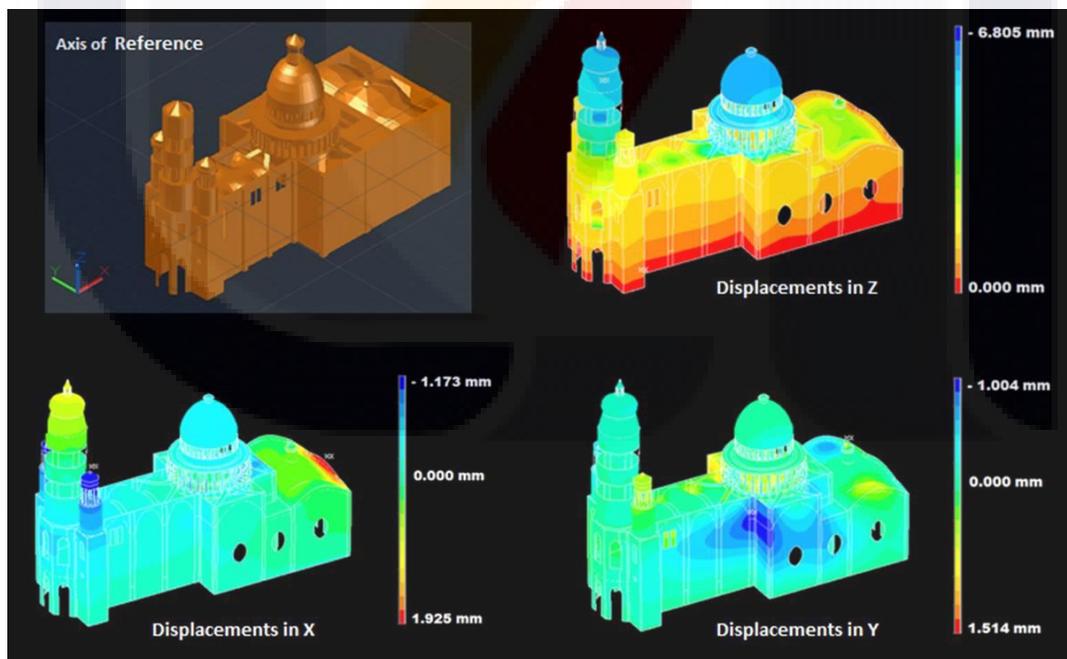


Figure 5. Displacements results.

3.7 Discussion of results

The stresses that the structure generate on the foundation were located and cataloged (Figure 6), we notice that the maximum force transmitted to the ground is 0.47 N/mm^2 is located in the columns of the principal entrance of the facade. We interpret this as an effect of the

weight of the principal tower. All the maximum compression stresses of the walls (located at the base of the structure) did not exceed the maximum allowable, so then we obtained a safety factor of about 8.0 in the most unfavorable position, so we can say that in a matter of security, the structure has great capacity to support vertical loads.

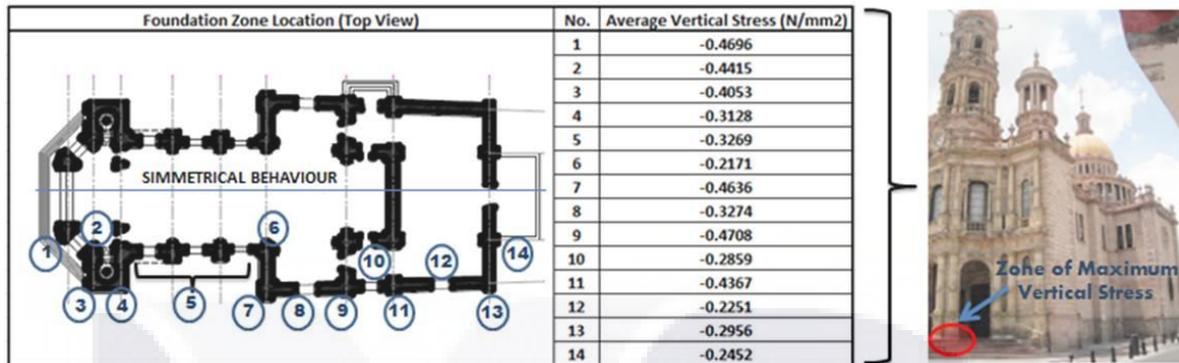


Figure 6. Stresses in the foundation.

The base of the main tower is other of the areas where the most important compression stresses were identified (Figure 7), reaching 0.60 N/mm^2 in this area, and in the base of the dome columns the stress reaches 0.94 N/mm^2 , calculating a safety factor of approximately of 6.5 and 4.0 respectively. That indicates that higher elements that works in compression, also have great capacity to support vertical loads.

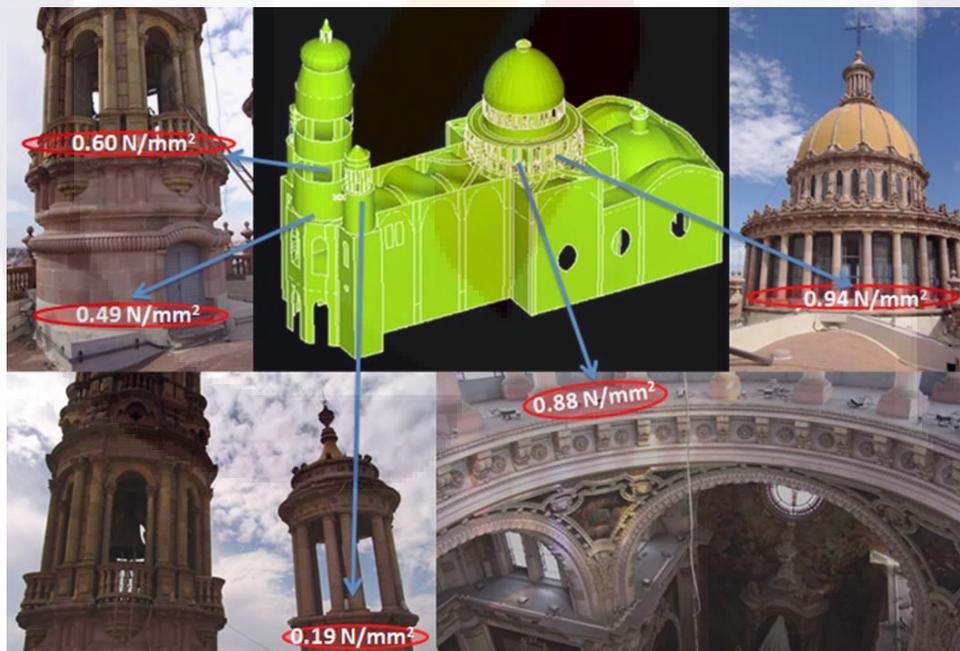


Figure 7. Compression stresses in higher elements.

In other results, high values of tensional stresses (Figure 8) were observed in the roofing system (as were expected), mainly in the vaults, in which the stress reaches values around the maximum allowable of 0.20 N/mm^2 (this explain some existing damage), and taking in account that the vaults causes horizontal forces which induce an opening in their bases against the walls in the order of 1.2 cm, this is a warning sign that vaults do not have the capacity to support additional loads. Also, the results show that the maximum stress in tension, which

exceeds more than twice the stress allowable, is on the rear vault, but no damage was inventoried or seen in the area. Based on this there must be some element or factor increasing rigidity or stiffness, because that it support higher tensional stresses.

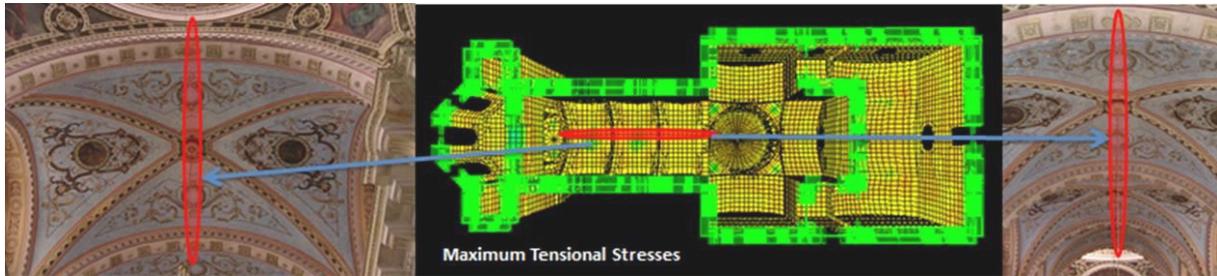


Figure 8. Principal tensional stresses on the structure.

The nonlinear static analysis was performed (Figure 9), by applying acceleration monotonically to the structure in his longitudinal (X) and transversal (Y) directions, such analysis was carried out in two load steps: i) by performing a NL gravitational analysis (self weight in Z); and ii) from this previous load case, applying a monotonic horizontal inertia load (acceleration) until the failure of the tower. Results show that the structure begins to work in plastic range in bottom zones near the base at 0.0169 PGA (0.166 m/s^2). Nevertheless, the main purpose in this study (pushover analysis) was to investigate the performance of the principal tower due to lateral loads (it was believed that this element has very little stiffness to support horizontal actions). The results shown that his linear behavior in x direction finish at 0.042 PGA (0.419 m/s^2) and the yield value where the tower begins to give up to the collapse is at 0.052 PGA (0.514 m/s^2), in y direction his linear behavior finish at 0.041 PGA (0.406 m/s^2) and the collapse begins at 0.059 PGA (0.583 m/s^2). Should be recalled, that the earthquakes starts to be perceptible at 0.001 PGA and for values of 0.02 PGA it causes people lose balance [33]. Worth to note that the seismic hazard for Aguascalientes [34], is an expected acceleration between 0.4 and 0.8 m/s^2 , to be exceeded in a 50-yr period with a probability of 10%.

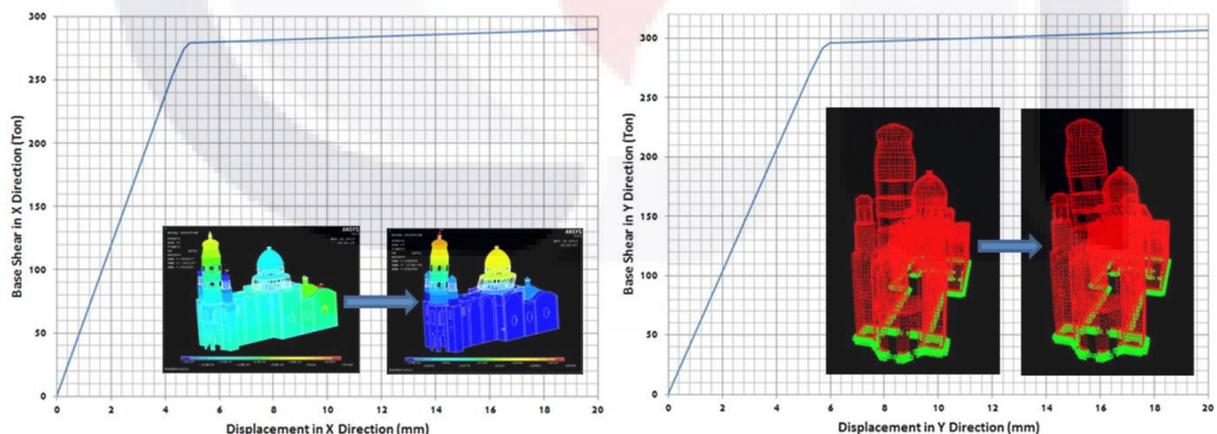


Figure 9. Pushover analysis results (control point on the top of the main tower).

The modal analysis was carried out taking into account changes of the young modulus (E) from -20% until $+20\%$ of its value, obtaining the same shape forms in each way for each change of E , and finding that the change of frequency from an analysis to another it retains a lineal relationship (Figure 10). A slope of 0.56% for each one of the analyzed frequencies is obtained in spite of the complex geometry of the structure.

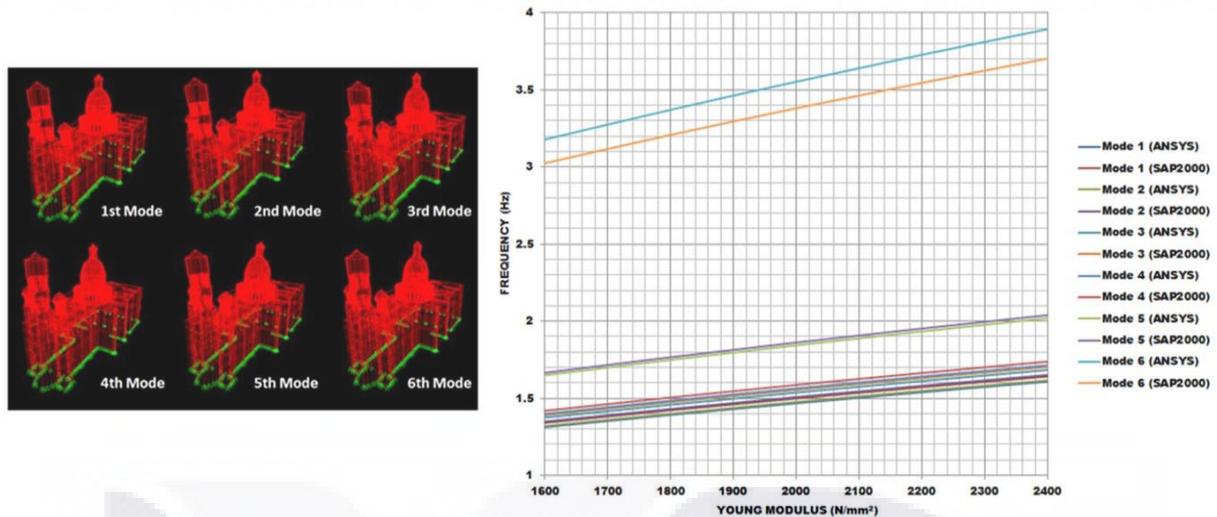


Figure 10. Modal analysis results.

In previous relating SHM studies of the temple [7], was reported that experimentally a frequency of 10.31 Hz for the sixth mode of the temple (by the use of velocity sensors) was obtained. Applying the tendency slope obtained (Figure 10) for the sixth mode, and increasing the value of E by the factor of 5.4 times its value, was found an analytic coincidence with the experimental data obtaining 10.319 Hz. It is notable that 4 N/mm^2 for the resistance to compression of the material is a very conservative value to be considered.

4 CONCLUSIONS AND FUTURE WORK

- In this paper was presented an adapted methodology that was followed with the aim of perform an structural analysis of the temple of San Antonio in Aguascalientes, México. According to the results obtained, it can be concluded that the Temple presents structural safety conditions for their normal use. The unique areas which present higher stresses than the expected are the vaults, there is a match of them with the cataloged damage. According to the modal analysis results and those obtained from previous studies of S.H.M., it is partially concluded that the consideration about the use of the Young's modulus to perform a modal updating is possible numerically. Recommendations specify that sedimentary limestone materials for typical ancient masonry structures could have strength values between 10 and 100 N/mm^2 [35], but considering 5.4 times the value of f_k for a future analysis couldn't be a suitable option to perform it because f_k is also in function of the mortar, and even modern mortars cannot achieve strength over 10 N/mm^2 [35]. Such higher value of f_k obtained theoretically indicates that could exist a factor that causes high stiffness of the overall structure, research should be done to understand this factor.
- The authors propose for future work: i) apply NDT to characterize materials; ii) conduct another monitoring campaign in order to validate previous studies; and iii) compare such results by applying the global VBDD method based on the change of frequency (ω), the hypothesis of this method is that any reduction in stiffness will lead to a decrease of the frequencies. Changes within a range of less than 5.0% difference means that the structure conserves almost all its same characteristics [36], but if the percentage change is relatively high (considering that the structure has no additional damage cataloged since 2012) will indicate that one of the two monitoring campaigns could have had interference or severe noise that affected the data acquisition (recurrent error of the S.H.M. campaigns).

REFERENCES

- [1] Lourenço P., *Computational strategies for masonry structures, Ph. D. Thesis*. Delft University, Netherlands, 1996.
- [2] Appendini G., *Aguascalientes, 46 personajes en su historia*, Gobierno del Estado de Aguascalientes, Mexico, 1992.
- [3] Gómez J., *Aguascalientes en la historia, 1786-1920, III, Vol. 1*, Gobierno del Estado de Aguascalientes/Instituto Mora, ISBN 968-6173-43-9, Mexico, 1988.
- [4] Villegas V. M., *Arquitectura Refugio Reyes*, Imprenta Madero, No. OCLC: 1997345, Mexico, 1974.
- [5] García J. L., *Interview to M. in Arch. José Luis García Rubalcava by Arch. Marisol Navarro Hernandez*, Aguascalientes, Mexico, September 27, 2012.
- [6] Animas H., Navarro M., Pacheco J., García J. L., Arroyo M. G., Cordero T., Esparza C. J., *Morphology and structural behavior of the temple of San Antonio, 3rd International FICAA Forum UAA*, ISBN: 978-607-8285-92-1, Mexico, June 2013.
- [7] Navarro M., *Geometrical and damage survey of the Temple of San Antonio and structural analysis of his current status*, UAA M.Eng. Thesis, Mexico, November 2013.
- [8] Pacheco J., Animas H., Ortiz J. A., *Vibrations as a source of information to evaluate the structural behavior of heritage buildings, 2nd International Forum Convergence of Design and Construction*, ISBN: 978-607-82851-0-5, Mexico, June 2012.
- [9] Pacheco J., Animas H., Ortiz J. A., García J. L., Cordero T., Navarro M., Araiza G., *The use of ambient vibration as a source of information to evaluate the structural behavior of historic buildings, XVIII CNIE*, ISBN 978-607-9599a-0-9, Mexico, November 2012.
- [10] ICOMOS, *The Venice charter for the restoration of historic monuments*, 2nd International Congress of Architects and Technicians of Historic Monuments, Italy, 1964.
- [11] Estada F. J., *A images collection that invites to rediscover: the Temple of San Antonio, in his 1rst centenary*, personal photo gallery collection, Mexico, 2004.
- [12] ICOMOS, *Recommendations for the structural analysis, conservation and restoration of the architectual heritage*, 2004.
- [13] Roca P., Cervera M., Gariup G., Pela L., *Structural analysis of masonry historical constructions, clasical and advanced approaches, Arch Comput Methods Eng*, 17:299-325, DOI 10.1007/s11831-010-9046-1, Spain, 2010.
- [14] Orduña A., Peña F., Roeder G., *State of art of structural analysis of historic buildings of masonry, Part I: mechanical behavior and constitutive models, Paper for the XIV National Congress of the Mexican society of Structural Engineering*, Mexico, 2004.
- [15] Orduña A., Peña F., Roeder G., *State of art of structural analysis of historic buildings of masonry, Part II: analysis models, Paper for the XIV National Congress of the Mexican society of Structural Engineering*, Mexico, 2004.
- [16] Topete A., *Aguascalientes, guide to visit the city and the state*, Historical archive of the city of Aguascalientes, 3rd Edition, No. OCLC: 50201775, Mexico, 1973.
- [17] Barba M., *Interview to Arch. Mercedes Barba by Arch. Marisol Navarro Hernandez*, Aguascalientes, Mexico, September 26, Mexico, 2012.

- [18] McNamara D. R., *How to read churches. A guide about ecclesiastical architecture*, Ed H. Blume, ISBN: 978-84-96669-75-8, Spain, 2011.
- [19] Rojas B., *Brief history of Aguascalientes. Illustrated, reprinted*, Ed. Colegio de México, Fondo de Cultura Económica, ISBN 9681645405 & 9789681645403, Mexico, 1994.
- [20] Asteris P. G., Seismic vulnerability assessment of historical masonry structural systems, *Elsevier: Engineering Structures*, 62–63, pages 118–134, DOI: 0141-0296, 2014.
- [21] Pantazopoulou S. J., *State of the art report for the analysis methods for unreinforced masonry heritage structures and monuments*, October, 2013.
- [22] Sundar S., Seismic performance of a traditional unreinforced masonry building in Nepal, *Kathmandu University Journal of Science Engineering and Technology*, Vol. 9, No. 1, pages 15-28, July, 2013.
- [23] Yardim Y., Effects of soil settlement and deformed geometry on a historical structure, *Nat. Hazards Earth Syst. Discuss*, Discussion paper 1, pages 5911-5934, DOI: 10.5194/nhessd-1-5911-2013, 2013.
- [24] Pouraminian M., Seismic vulnerability evaluation of historical buildings by performance curves, case study for Ramsar Museum, *International Research Journal of Applied and Basic Sciences*, Vol 5 (11), pages 1446-1453, ISBN: 2251-838X, 2013.
- [25] Mavizchi M., The vulnerability seismic assessment and providing strategies for “Najmaddin Kobra” historical monument, *15 WCEE*, Lisboa, 2012.
- [26] Filipe D., *Non linear seismic analysis of ancient buildings, structural characterization for successful seismic retrofit*, Lisboa, 2009.
- [27] Mazzolani F. M., *Vulnerability of historical masonry buildings under exceptional action*, PhD Thesis, Università degli Studi di Napoli Federico II, Italy, November, 2010.
- [28] *Geological Faults and Fissure Informational System of the State of Aguascalientes*, (SIFAGG, <http://www.aguascalientes.gob.mx/sop/sifagg/web/mapa.asp>), 2013.
- [29] Eurocode 6, *Eurocode 6: Design of masonry structures – Part 3: Simplified calculation methods for masonry structures*, 1996.
- [30] Mahini S. S., Ronagh H. R., Eslami A., Seismic rehabilitation of historical masonry vaults using FRPS, a case of study, *Asian – Pacific Conference on FRP in structures (APFIS)*, S. T. Smith Ed., 2007.
- [31] Pela L., *Continuum damage model for nonlinear analysis of masonry structures*, PhD Thesis, Università degli Studi di Ferrara & Universitat Politècnica de Catalunya, Ferrara, Italy, March 26, 2009.
- [32] Peña F., Lourenço P., Mendes N., Oliveira D. V., Numerical models for the seismic assessment of an old masonry tower, Portugal, 2010.
- [33] Lorant G., *Seismic design principles*, Whole Building Design Guide. National Institute of Building Sciences, March, 2011.
- [34] USGS, U. S. Geological Survey, *Mexico Seismic Hazard Map*, March 3, 2014.
- [35] Lourenço P., L. Pela, P. Roca, Introduction to masonry mechanics and modelling techniques, SA2: Structural Analysis Techniques, SAHC Lectures, 2012.
- [36] Aktan A.E., *Modal testing for structural identification and condition assesment*, 2001.