



UNIVERSIDAD
DE GRANADA

Máster en Estructuras

Detección de Daños en Forjados de madera mediante vibraciones dinámicas.

Trabajo Final de Ensayos No Destructivos

BRENDA BLANCO GUZMAN
brendablanca@correo.ugr.es

Índice	
Resumen	2
Introducción	2
1.Forjados	3
1.1 Definición de forjado.....	3
1.2 Funciones de los forjados.....	3
1.2.1 Función resistente	3
1.2.2 Función separadora.....	4
1.3 Tipologías de forjados.	4
1.3.1 Según el sistema de transmisión de cargas	4
1.3.2 Según el sistema de ejecución	4
2.Patologías y daños	5
2.1 Tipos y causas de deterioro en estructuras de madera	5
2.2 Evaluación de daño.....	6
2.3 Técnicas de detección de defectos no destructivas	6
3.Análisis dinámico	10
3.1 Generalidades.....	10
3.2 Reconocimiento dinámico de las estructuras.....	11
3.3 Realización de los ensayos	12
3.4 Análisis de los datos.....	14
3.5 Aplicaciones	15
3.6 Análisis Modal Experimental vs Análisis Modal Operacional	16
Conclusiones	17
Recomendaciones:	17
Referencias bibliográficas	18

Índice de figuras

Imagen 1 Análisis modal experimental (EMA).....	12
Imagen 2 Martillo de impacto (Bilošová, 2011).....	13
Imagen 3 Representación de un acelerómetro piezoeléctrico	13
Imagen 4 Acelerómetro Piezo-resistivo uniaxial.....	13
Imagen 5 Acelerómetro Capacitivo Uniaxial	14

Resumen

A pesar de las múltiples ventajas que proporciona la madera en la edificación, resulta ser un material bastante sensible a las agresiones y fácilmente destructible. Por causa de las degradaciones, es necesario realizar operaciones que aseguren la estabilidad y la conservación de las piezas.

En un principio, los métodos de detección de daño existentes se basaban en la inspección visual o en métodos experimentales localizados, tales como métodos acústicos o ultrasónicos, métodos basados en campos magnéticos, radiografías, etc. Estas técnicas requerían el conocimiento a priori de la localización aproximada del fallo, con las consiguientes limitaciones.

Se hacen necesarias por tanto otras técnicas diferentes a las citadas, aplicables a estructuras complejas y que estén basadas en las características dinámicas de las mismas.

Cualquier sistema mecánico se caracteriza dinámicamente mediante los parámetros modales: frecuencias naturales, modos de vibración y amortiguamientos. Son las variaciones en dichos parámetros las que nos dan idea de la presencia de un daño en las estructuras.

A lo largo de este trabajo estudiaremos en los forjados de madera el comportamiento estructural que está provocando los daños y se propondrán las técnicas no destructivas para evaluarlo, haciendo énfasis en los ensayos de vibraciones dinámicas para obtener dichos daños.

Introducción

La madera es el material de construcción más antiguo utilizado por el hombre y es un material natural y renovable que requiere bajo consumo de energía durante la fase de producción. También es completamente biodegradable y de fácil limpieza, es ligero pero muy fuerte, tiene buena elasticidad, es un excelente aislante térmico, eléctrico y acústico. Gracias a estas propiedades, y por ser un material de fácil obtención en casi todas las geografías, prácticamente todas las culturas han utilizado la madera para la construcción de sus viviendas.

El uso de la madera en el sector de la construcción abarca infinidad de elementos. Pasa por constituir elementos estructurales como muros, soportes y forjados, hasta la elaboración de simples piezas decorativas, mobiliario, etc. En el presente trabajo hablaremos de la madera, desde un punto de vista enfocado a su uso como elemento estructural en forjados.

A pesar de las múltiples ventajas que proporciona la madera en la edificación, resulta ser un material bastante sensible a las agresiones y fácilmente destructible. Por causa de las degradaciones, es necesario realizar operaciones que aseguren la estabilidad y la conservación de las piezas.

Uno de los principales inconvenientes de este material es el desconocimiento existente en su comportamiento estructural y en la degradación que puede experimentar con el paso del tiempo. Esta degradación se traduce como una pérdida de rigidez y por tanto una variación del módulo de estabilidad (MOE). La madera es un material natural, lo que significa que el control sobre sus defectos es muy limitado, por ejemplo, la presencia de nudos, fisuras, entre otros, además es marcadamente anisótropo e higroscópico y, por ese motivo, no tiene unas

propiedades mecánicas tan definidas como ocurre en otros materiales. Estas diferencias no se producen solo entre especies, sino que se pueden encontrar dentro de una misma especie.

Por los motivos expuestos anteriormente se hace necesario el desarrollo de metodologías no destructivas que puedan ser aplicadas para la detección de daño estructural en este tipo de material. Varias técnicas de ensayo no destructivo han sido empleadas en madera aserrada, sin embargo, las más utilizadas hoy en día son de carácter cualitativo, no cuantitativo. Las técnicas cualitativas consisten fundamentalmente en la inspección visual de la madera. Las técnicas cuantitativas se basan en ultrasonidos, resistencia a la penetración y métodos dinámicos.

En este trabajo se presenta un estudio sobre el comportamiento dinámico de este tipo de material. Se ha desarrollado una metodología basada en la actualización por elementos finitos para la detección de daño o la variabilidad en las propiedades mecánicas basado en el comportamiento dinámico de los elementos estructurales.

1. Forjados

Con el paso del tiempo las viviendas han ido evolucionando, se ha pasado de construir simples casas de planta baja con una cubierta a construir viviendas tan complejas como son los rascacielos. La evolución de las viviendas ha sido muy grande, al igual que los forjados que se han realizado en ellas, partiendo de la utilización de troncos simplemente apoyados a lograr generar estructuras más complejas utilizando otros materiales.

La madera, como material, fue muy utilizada durante gran parte de la historia de la construcción, así nacerían los primeros forjados elaborados con este material. Pero el incesante avance en la manera de construir y la aparición de nuevos materiales como el acero y el hormigón, han dejado a un lado el uso tradicional del empleo de la madera para la construcción de viviendas.

La evolución de los propios materiales y de las técnicas constructivas, así como su disponibilidad temporal y/o geográfica han marcado el uso de diferentes tipologías de forjado.

1.1 Definición de forjado

Para elaborar la definición de forjado me he apoyado en el Dr. Ingeniero de Caminos José Calavera Ruiz, en cual lo describe como “un elemento estructural, generalmente horizontal, que recibe las cargas directamente y las transmite a los restantes elementos de la estructura. Adicionalmente, el forjado materializa la separación entre plantas consecutivas y desempeña otras funciones como aislamiento entre plantas y soporte de acabados e instalaciones”.

1.2 Funciones de los forjados

Distinguiremos dos funciones principales del forjado, definidas de esta misma manera por el profesor Luis Felipe Rodríguez Martín (1991):

1.2.1 Función resistente

Debido a su situación como elemento estructural, el forjado tiene que:

- Soportar las acciones gravitatorias que inciden directamente sobre él, transmitiéndolas a los elementos sustentantes sobre los cuales se apoya.

- Recoger y distribuir las fuerzas que actúan sobre él entre los soportes. Los forjados además de resistir las acciones gravitatorias deben soportar acciones como el sismo, el viento, el empuje de tierras y en estos casos, actúa ante ellos como una viga de gran canto capaz de transmitir adecuadamente sus efectos a los soportes.
- Arriostrar los diferentes pórticos, si no hubiera un enlace entre los pórticos paralelos de una estructura, se podría producir un posible abatimiento de los pórticos.
- Impedir el pandeo lateral de las vigas.
- Ayudar frente a torsiones de las vigas.

1.2.2 Función separadora

Los forjados dividen el edificio en plantas, separando y aislando unas de las otras. Atendiendo a esto, el forjado debe:

- Proporcionar aislamiento acústico suficiente entre plantas consecutivas, procurando limitar la transmisión de los sonidos entre ella y amortiguando los ruidos de los impactos que actúen sobre el forjado.
- Ser capaz de impedir la propagación del fuego a través de él, actuando como elemento compartimentador durante el tiempo establecido en la normativa vigente.
- Contribuir al aislamiento térmico entre espacios interiores con diferentes temperaturas, y entre éstos y el exterior.
- En ciertos casos es conveniente que el forjado sea lo más estanco posible en previsión de fallos de la impermeabilización.

1.3 Tipologías de forjados.

Los forjados se pueden realizar de múltiples maneras, atendiendo a muy diversos factores que condicionan su ejecución. Teniendo en cuenta esta variedad, establecemos las siguientes clasificaciones:

1.3.1 Según el sistema de transmisión de cargas

En forjados de madera la transmisión de cargas se realiza en la mayoría de los casos en una dirección, así se puede concretar que son forjados unidireccionales, flectan básicamente en una dirección y transmiten las cargas a las vigas, y éstas, a los soportes.

Con la aplicación de la madera laminada aparecen los primeros forjados bidireccionales elaborados con madera, estos flectan en dos direcciones y transmiten las cargas a las vigas, o bien directamente a los soportes, en dos direcciones.

1.3.2 Según el sistema de ejecución

Forjados prefabricados: están formados por elementos prefabricados autorresistentes, que aportarán una resistencia parcial que debe ser completada mediante la vinculación con el resto de los elementos portantes, dicha unión se realiza con fijaciones “in situ”, necesarias para que el forjado pueda soportar la totalidad de las cargas.

Estos forjados presentan una mayor rapidez en su puesta en obra, ya que se elaboran con un menor número de elementos. En la mayoría de las ocasiones, es un único elemento modular el que conformará el forjado, así se consiguen reducir las operaciones a realizar en la obra. La resistencia de los elementos viene garantizada por el fabricante.

Los elementos prefabricados, en dichos forjados, cumplen funciones distintas según la fase de construcción. Durante la fase de ejecución deben ser capaces de resistir por flexión su propio peso. Una vez adquirida la resistencia suficiente tras las fijaciones finales que completen la rigidez necesaria del forjado, los elementos prefabricados dejan de ser piezas individuales pasando a conformar un único elemento.

Forjados "in situ": se puede considerar como "in situ" a aquellos que son los realizados en obra con los elementos tradicionales de vigas y viguetas, ya que en este caso su construcción requiere mayor elaboración en obra que los prefabricados.

En la mayoría de las situaciones, el uso de la madera en la realización de forjados se orientaba a establecer sistemas biapoyados.

Con la posterior aparición de nuevos materiales de madera, que buscaban cubrir mayores luces, se obtuvieron elementos que permitían la elaboración de forjados continuos.

2. Patologías y daños

2.1 Tipos y causas de deterioro en estructuras de madera

Los principales problemas que plantea la conservación de las obras en maderas se pueden diferenciar en dos grupos según quien los origina.

De origen biótico:

- Pudrición.

Proviene de algunos tipos de hongos que se nutren de la madera y provocan el hundimiento de la estructura celular del material. Los síntomas son ablandamiento y la decoloración de la madera.

- Xilófagos marinos.

En zonas marítimas, la madera es atacada por una variada fauna marina, que es roída hasta anular su existencia. Entre los tipos de organismos se citan los moluscos, la bankia, el teredo corriente, la martesia y otros folos. Crutaseos, etc. Las formas de ataque son variadas y dependen del tipo de organismo que ataque la madera. También varía su zona de acción y velocidad de propagación.

- Insectos: Entre los insectos que atacan la madera están los coleópteros, hormigas y abejas carpinteras y las termitas.

- Retracción.

- Grietas.

- Juego de las uniones.

De origen abiótico:

Las causas de origen abiótico que pueden producir daños en las piezas de madera son los agentes atmosféricos (radiación solar y la lluvia) y el fuego.

- Agentes atmosféricos: La madera expuesta a la luz solar sufre un cambio de la coloración, que inicialmente toma un tono marrón y posteriormente color grisáceo, y la aparición de grietas superficiales, debido a la diferencia de contenidos de humedad en la zona superficial y zona interior. El agua de lluvia provoca el deslavado de los elementos degradados de la superficie y favorece el fenómeno de aparición de grietas. El deterioro de la madera expuesta a la intemperie es muy lento y la pérdida de madera es muy pequeña. Esta pérdida

varía en función del clima, la especie y la orientación. La degradación que produce es superficial y generalmente no afecta las propiedades mecánicas de manera significativa.

- Acción del fuego: Una estructura que haya sufrido un incendio puede ser recuperable o reutilizable si la pérdida de sección no es muy elevada.
- Efecto de la edad de la estructura

2.2 Evaluación de daño

La evaluación de daños es un proceso destinado a describir de manera objetiva el posible impacto que se ha producido sobre una estructura. Otra forma de definirlo podría ser “Identificación y registro cualitativo y cuantitativo de la extensión, gravedad y localización de los efectos de un hecho adverso.”

Esta valoración de las circunstancias que muestra las consecuencias de los posibles desperfectos encontrados sirve para definir las acciones prioritarias y hacer el análisis de las necesidades más urgentes. Los objetivos de la evaluación son, en líneas generales, estudiar los efectos directos y los colaterales que se producen.

La madera, en su condición de material perecedero, al ser colocada en servicio puede sufrir los daños de diversos agentes de deterioro, como hemos visto en el apartado anterior. Ante esto se realizan una serie de pasos para llegar a la elección del tratamiento más idóneo según el caso.

2.3 Técnicas de detección de defectos no destructivas

Los controles no destructivos son ensayos realizados utilizando métodos que no alteran el material ni requieren la destrucción o la retirada de muestras estructurales. Los controles no destructivos o los ensayos no destructivos se efectuarán con el fin de obtener la información necesaria para evaluar el estado de una estructura y su aptitud ante las sollicitaciones a las que está sometida.

Por defecto, se entiende que una anomalía en el material puede ser relevante para una posible rotura del elemento estructural. Los defectos pueden ser consecuencia de la elaboración del producto, o la fabricación del elemento estructural, pueden existir antes de la puesta en servicio del componente o ser consecuencia del esfuerzo al que está sometido el material. En el caso de edificios históricos, la acción reológica o las sucesivas intervenciones que el propio edificio ha sufrido condiciona en gran medida las propiedades actuales de la materialidad de los elementos, así como su integridad estructural.

Los ensayos no destructivos se realizarán para detectar la presencia de defectos en materiales o productos, identificar el tipo y, cuando sea posible, definir su tamaño.

Para la evaluación no destructiva hay varios tipos de pruebas. En primer lugar, el control visual es el tipo de control principal y el primero que debe efectuarse. Anteriormente hemos descrito una primera aproximación visual a la problemática existente.

Los ensayos no destructivos pueden clasificarse en los siguientes tipos:

- VT inspección visual
- PT Líquidos penetrantes

- RT Radiografía
- UT Ultrasonidos
- ET Corrientes de inducción
- MT Partículas magnéticas
- AT Emisiones acústicas
- TT Termografía

Los controles no destructivos por el método visual VT se utilizan como primer control del producto. La inspección visual es la primera y más importante comprobación que debe realizarse en cualquier elemento. Se llevará a cabo con las técnicas adecuadas, tanto con ayuda de sistemas ópticos como de forma directa mediante la observación de la superficie. El objetivo del examen visual es buscar los defectos presentes en la superficie, su caracterización y dimensionamiento.

De manera más general, la técnica consiste en observar bajo una iluminación apropiada los objetos a verificar, a la vista o con instrumentos apropiados. Las principales aplicaciones se encuentran en los sectores industriales, desde la fabricación de materias primas hasta el control de productos terminados e inspecciones durante el servicio. Es una técnica simple y económica, y requiere un entrenamiento básico; puede evaluar desde defectos estéticos a imperfecciones estructurales, corrosión superficial e incluso grietas de tamaño medio-grande.

Las principales limitaciones son la posibilidad de evaluar únicamente las condiciones superficiales en zonas accesibles y la necesidad de obtener una iluminación buena y uniforme, lo que no siempre es fácil de conseguir en las inspecciones de campo. Además, de todas las técnicas no destructivas, es la más susceptible al error humano y en la que las condiciones de ensayo deben evaluarse con mucho cuidado: no es raro encontrar una probabilidad de no detectar defectos superiores al 40% si las condiciones de trabajo no son propiamente favorables.

Los controles no destructivos por el método de líquidos penetrantes PT se utilizan para la búsqueda de grietas o cavidades. La superficie del elemento se rocía con un líquido que tiene alta capacidad de penetración. A continuación, se aplica una sustancia de contraste que hace visible el defecto. El empleo de los líquidos penetrantes requiere un modesto equipo y permite una fácil interpretación de la observación efectuada.

La técnica es aplicable a todos los materiales sólidos no absorbentes, con superficies no cubiertas y no contaminadas. Es relativamente fácil de aplicar y la materia prima es barata. Permite evaluar sólo las discontinuidades que afloran en superficies; además, la superficie requiere una larga preparación.

Los controles no destructivos por el método Radiográfico RT utiliza los rayos X producidos por el impacto de electrones acelerados contra átomos pesados, o rayos gamma emitidos espontáneamente por material radiactivo, con el fin de obtener una imagen por transparencia de la pieza, que es atravesado por los mismos rayos, los cuales impresionan una película sensible: los eventuales defectos son detectables a través del examen de la imagen así obtenida.

La radiografía es aplicable a todos los materiales, ya que sólo está limitada por los mayores espesores y absorciones. Constituye una de las técnicas de control no destructivo más fiables y, por lo tanto, se utiliza para el examen de piezas de gran importancia estructural.

La técnica permite analizar diferentes materiales (también polímeros y materiales compuestos) tanto durante la producción como durante el servicio. Es una de las técnicas no destructivas más peligrosas para la seguridad en lo que respecta a la exposición de los operarios.

Los controles no destructivos con el método Ultrasonido UT aprovecha la propagación y la reflexión, dentro de una pieza, de ondas de frecuencia superiores a las perceptibles por el oído. La presencia de defectos modifica la reflexión de estas ondas y permite la detección de la presencia de defectos y, en algunos casos, también de sus dimensiones.

La técnica ultrasonora se utiliza con frecuencia porque permite detectar tanto defectos superficiales como defectos más profundos.

Los ultrasonidos, a través de la medición de la velocidad de propagación de las ondas, nos dará información útil para la obtención de datos como la mineralogía del material, la textura, la densidad, la porosidad, el grado de humedad, así como la temperatura o presión a la que está sometido el elemento que estamos analizando.

Los controles no destructivos con el método Corrientes Inducidas ET. La técnica utiliza corrientes inducidas en una pieza de material magnético, de un campo electromagnético inducido por una o más bobinas excitadoras externas. Estas corrientes producen, a su vez, un campo magnético que contrasta el excitador y, por lo tanto, modifica la impedancia de las bobinas excitadoras. Dado que las líneas corrientes parásitas pueden verse alteradas por cualquier defecto presente en la pieza, dichos defectos inducen, indirectamente, una alteración de la impedancia de las bobinas excitadoras. Realizando una medida de la impedancia de las bobinas excitadoras, o de otras auxiliares, es posible calibrar el equipo con una pieza de muestra, seguramente exenta de defectos, y detectar por comparación los defectos de otras piezas.

La técnica puede detectar grietas muy pequeñas en la superficie o debajo de ella; la preparación del componente necesario es mínima y se pueden analizar superficies muy complejas. Los dispositivos de control son portátiles y proporcionan el resultado inmediatamente. Por el contrario, las variables en juego deben ser entendidas y controladas cuidadosamente, y la interpretación de las señales requiere cierta experiencia.

Los controles no destructivos por método Magnético o Magnetoscópico MT consiste en crear en la pieza un campo magnético y en hacer observables las alteraciones del mismo campo, que son localmente inducidas por defectos superficiales o subsuperficiales, pulverizando un polvo compuesto de partículas magnéticas.

Los controles no destructivos por método Termografía infrarroja o Termografía es un método óptico que permite la visualización en infrarrojo térmico de los objetos encuadrados. Se utiliza en muchos campos porque es una forma práctica de detectar la temperatura y de detectar defectos superficiales, subsuperficiales

y volumétricos. La técnica no es eficaz en la evaluación de los defectos en componentes gruesos, y requiere en general un alto nivel de competencia del operador y de quien interpreta los datos.

También es posible el cálculo de las propiedades elásticas de un cuerpo a partir de su frecuencia fundamental de vibración.

Actualmente estas técnicas se emplean en materiales anisótropos para determinar otras características como: la calidad de la madera sana a emplear en mangos de herramientas; la unión efectiva de tableros laminados; gradientes de humedad; etc. siendo más bien reciente su propuesta como sistema de evaluación del ataque de organismos xilófagos, concretamente hongos.

Todos los estudios consultados coinciden en señalar que esta técnica acústica es muy exacta y sencilla de aplicar, especialmente adecuada para la caracterización de materiales y para el desarrollo, diseño y control de calidad de objetos. Posiblemente es debido a esta alta fiabilidad que se han desarrollado varios equipos que emplean esta técnica en la determinación de las propiedades elásticas de materiales homogéneos e isotropos.

Como principales ventajas de este sistema se menciona su sensibilidad para detectar estados tempranos de deterioro causado por hongos xilófagos.

Es interesante el hecho de que tanto la energía cinética aplicada en el momento de dar el impulso a la madera, así como la energía acústica recibida por el equipo son completamente inocuas para la madera y para el operador, por lo cual no se precisan de equipos de protección específicos para su uso.

Una comparación muy interesante entre varios de los ensayos no destructivos aplicados en estructuras de maderas fue el realizado por Juan José Crespo en su trabajo final de la asignatura donde realizó una tabla que permite evaluar varias cualidades de cada método de forma individual, a la vez que facilitó la comparación entre métodos. Los aspectos que recoge son:

- A- Calidad de devolver información cuantitativa.
- B- Calidad de detectar estados tempranos de deterioro.
- C- Relación coste – beneficio expresado como economía de trabajo.
- D- Posibilidad de aplicación in situ.
- E- Seguro para el operario.
- F- Seguro para el objeto.

Cada apartado nivel se representa con uno de los siguientes gráficos: t, v, u.

Donde:

t: Indica una valoración positiva.

v: Expresa equidad en la valoración.

u: Quiere decir que el método no satisface el requerimiento.

Tabla 1 comparación entre los ensayos no destructivos aplicados en estructuras de maderas

MÉTODO	A	B	C	D	E	F
Visual	u	u	t	t	t	t
Emisión Acústica						u
Frecuencia Fundamental	t	t	v	t	t	t
Ultrasonidos	t		v	t	t	u
Radiaciones Ionizantes	u		u	v	u	t
Resonancia Magnética	u	t	u	u	v	t

En la tabla realizada por el autor se ve claramente como el ensayo de frecuencia fundamental es uno de los que mas ventajas presenta.

3. Analisis dinámico

3.1 Generalidades

Décadas atrás la principal preocupación de los ingenieros civiles fue el desarrollo y de nuevos y poderosos métodos numéricos para su aplicación al análisis dinámico y estático de grandes estructuras. El rápido desarrollo de las técnicas de elementos finitos acompañadas de un tremendo progreso tecnológico en el campo de las computadoras personales llevo a la creación de paquetes de software para una simulación exacta del comportamiento estructural.

Sin embargo, el diseño de estructuras más y más complejas como presas, puentes de grandes luces y otras estructuras especiales han llevado a los ingenieros a desarrollar nuevas herramientas experimentales para la correcta identificación de las propiedades más relevantes estáticas y dinámicas de las estructuras. Estas herramientas brindan información confiable para la calibración, actualización y validación del análisis numérico realizado en la etapa de diseño.

Dentro de estas herramientas la caracterización modal juega importante papel para la identificación de las propiedades modales de las estructuras, que influyen directamente en la seguridad de los usuarios y ayudan a prevenir grandes catástrofes.

El Análisis Modal consta de tres etapas: La obtención de datos producidos por la excitación de la estructura: autos, viento, personas, sismos o alguna excitación introducida de manera consciente y medible a partir de diferentes herramientas. La segunda es la Identificación del Sistema, tratándose esta de un método experimental que permite obtener el modelo de un sistema a partir de datos reales recogidos de la estructura. Entiéndase por sistema toda realidad en la que interactúan variables de diferentes tipos para producir señales observables y, por tanto, el Modelo de un Sistema es aquella herramienta que permite predecir el comportamiento de un sistema sin necesidad de experimentar sobre él. Una vez identificado el sistema es posible identificar los parámetros modales de la estructura. No obstante, en la elaboración del modelo del sistema existen diferencias sobre si se tiene o no control sobre las variables de entrada.

De no tenerse control sobre las variables de entrada se estaría en presencia del Análisis Modal Operacional (OMA) que toma las excitaciones arbitrarias como viento, tráfico y ruido producidas por el uso habitual de la estructura y mediante la toma de datos se puede medir la respuesta dinámica de la misma y extraer las características modales de esta. En este tipo de análisis los modelos matemáticos generados son del tipo estocástico ya que se posee cierta incertidumbre definiéndose mediante conceptos de probabilidad y estadística. Por otra parte, se tiene el Análisis Modal Experimental (EMA) en el que a partir de una señal de entrada (input) de excitación se mide una salida o respuesta esperada (output). Los modelos matemáticos generados por este tipo de análisis son del tipo determinístico ya que para las mismas entradas de datos se esperan las mismas salidas no tomándose en cuenta el azar o la incertidumbre.

En cualquiera de los dos casos se requiere un grupo de instrumentos de medición y procesamiento de las señales. Estos equipos se encargan de la generación de excitaciones, sensores para captar las respuestas del sistema, aparatos para el procesamiento de los datos y otros encargados de amplificar las señales. Cabe destacar los que se utilizan para la obtención de las respuestas: entre estos equipos se pueden mencionar los geo-radares (Geo-radar IBIS) que se basan en el principio de interferencia de las ondas y los acelerómetros. Un acelerómetro es un transductor destinado a medir las aceleraciones. Pueden medir las aceleraciones en un único eje (conocidos como acelerómetros uniaxiales) o en varios ejes a la vez (triaxiales)

3.2 Reconocimiento dinámico de las estructuras

El análisis de sistemas estructurales ha experimentado un gran avance en los últimos años, y aunque sigue en desarrollo, su empleo en algunos sectores industriales se ha extendido ampliamente. Son técnicas habituales en diseño mecánico y aeronáutico, y su uso se ha normalizado y simplificado de tal manera, que algunas de ellas son comunes incluso en talleres de reparación de automóviles.

Como primera aproximación, podemos distinguir tres tipos de ensayos dinámicos:

- a) Ensayos destinados a comprobar el comportamiento de la estructura ante unos niveles de vibración cercanos a los límites de diseño. Son ensayos del tipo pasa o no pasa.
- b) Ensayos destinados a determinar el nivel de vibración de respuesta que experimenta la estructura en condiciones reales de servicio. Posibilitan mejorar la calidad de la estimación de los datos de diseño.
- c) Ensayos que permiten obtener, además de los niveles máximos de respuesta, los parámetros principales que caracterizan el comportamiento dinámico: las formas modales, sus frecuencias, amortiguamientos modales, rigideces, etc. De esta forma puede construir un modelo matemático del comportamiento de la estructura. Dentro de este tipo, se incluyen los ensayos modales.

En adelante nos centraremos en los ensayos modales, cuyo proceso de ejecución podemos sistematizarlo de la siguiente manera:

- 1) Planificación de la campaña

- 2) Realización de ensayos
- 3) Análisis de los datos
- 4) Creación del modelo

Estas técnicas permiten comprobar el deterioro de una estructura mediante la comparación entre las propiedades dinámicas teóricas que debería tener la estructura, que pueden obtenerse con modelos numéricos mediante elementos finitos, y las determinaciones experimentales obtenidas mediante ensayos dinámicos. De la comparación de los resultados del modelo analítico y de la campaña experimental podemos extraer conclusiones acerca de las posibles lesiones de la estructura. El progreso en este campo ha venido de la mano de los avances en dos ámbitos diferenciados: la fabricación de dispositivos electrónicos, por un lado, y las teorías de tratamiento de señales y de identificación de sistemas dinámicos, por otro.

3.3 Realización de los ensayos

La correcta elección de los elementos de cada uno de los eslabones de la cadena es fundamental para la adecuada caracterización del parámetro que estamos buscando. Constituyen esta cadena:

- Dispositivos de excitación + amplificadores
- Transductores de entrada
- Transductores de respuesta
- Equipo para filtrado y amplificación analógica de la señal
- Conversor analógico digital
- Analizador

Si podemos controlar la acción de entrada estaremos realizando un análisis modal experimental (EMA) (imagen 1) o técnica de identificación modal Input-Output. Esta técnica es habitual en ingeniería mecánica y aeronáutica.

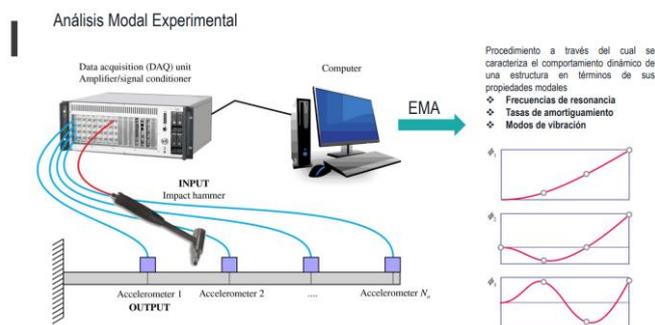


Imagen 1 Análisis modal experimental (EMA)

En estructuras de pequeño tamaño como las estudiadas en ingeniería mecánica, se utilizan martillos y excitadores electromecánicos. En estructuras de tipo medio, como edificios de tamaño pequeño, aún podemos inducir la señal mediante un martillo o un excitador (imagen 2), aunque debido al tamaño de estos elementos empieza a ser un proceso complejo.

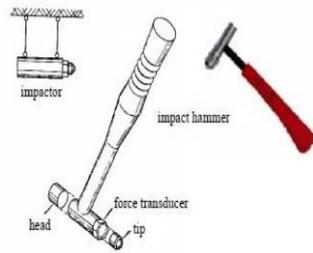


Imagen 2 Martillo de impacto (Bilošová, 2011)

En general, el ensayo dinámico más básico consiste en estimar la función de respuesta en rango de frecuencias (FRF) en varios puntos de la estructura. El FRF, relaciona la acción actuante sobre la estructura con la respuesta de la misma y se define como la transformada de Fourier de la acción actuante dividida por la transformada de Fourier de la respuesta.

La respuesta de la estructura se obtiene en la mayoría de los casos mediante transductores de aceleración o acelerómetros. Existen varios tipos y deberá escogerse el modelo según el rango de frecuencias y la intensidad de la vibración esperada. Pueden ser de varios tipos:

- Piezoeléctricos: Se trata sin duda del acelerómetro (imagen 3) más popular y el más empleado para la medida de las aceleraciones en los análisis modales. El principio físico básico de su funcionamiento consiste en el uso de un pequeño cristal piezoeléctrico (tanto natural como artificial) que genera una corriente eléctrica tras aplicársele una fuerza.

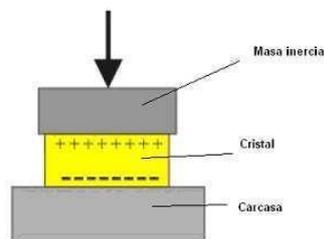


Imagen 3 Representación de un acelerómetro piezoeléctrico

- Piezoresistivos: Un acelerómetro piezo-resistivo (Imagen 4), a diferencia de uno piezoeléctrico, utiliza un sustrato en vez de un cristal piezoeléctrico. En este, los elementos flexibles del semiconductor que soportan la masa sísmica forman parte de lo que se conoce como puente de Wheatstone. Como estos elementos se deforman, el puente de Wheatstone se desequilibra, y la diferencia de potencial a la salida (proporcional a la deformación aplicada) es una medida de la aceleración. La ventaja de esta tecnología respecto a la piezoeléctrica es que pueden medir aceleraciones hasta cero Hz de frecuencia.

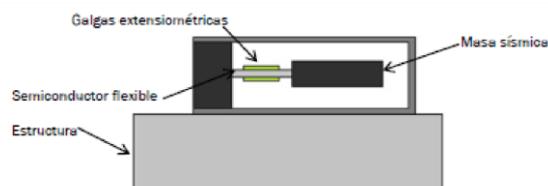


Imagen 4 Acelerómetro Piezo-resistivo uniaxial

- **Capacitivos:** En este tipo de acelerómetros el elemento que conecta la masa inercial con la carcasa es un condensador (imagen 5). Una de las paredes está fija, pegada a la carcasa y la otra a la masa. Cuando ocurre una aceleración la masa presiona el condensador variando el grosor entre pared y pared. Midiendo la capacitancia del condensador podemos calcular la aceleración. Este tipo de acelerómetros es extremadamente resistente, puede soportar aceleraciones de 30000g lo cual permite usarlo en mediciones de aceleración de proyectiles de cañón.

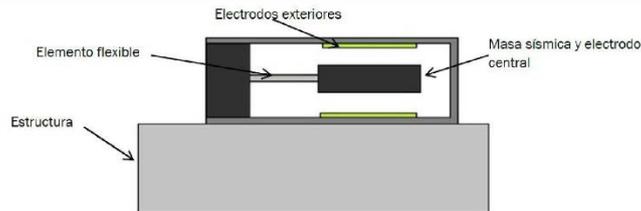


Imagen 5 Acelerómetro Capacitivo Uniaxial

- **Servoacelerómetros o de fuerza balanceada**

Además de los acelerómetros se están usando mediciones laser, velocimetría laser-doppler, interferometría de microondas, extensómetros, GPS...

Estos dispositivos al vibrar generan una corriente eléctrica que debe ser filtrada y amplificada para su posterior análisis. Se emplean para ello equipos de pretratamiento de la señal analógica. Algunos modelos de acelerómetros incluyen esta etapa en su electrónica, en otros se necesita un equipo externo.

3.4 Análisis de los datos

Posteriormente, la señal analógica deberá ser digitalizada para su tratamiento informático. Esto se realiza con conversor analógico-digital, que puede ser un equipo autónomo con memoria para grabar el registro de datos, o una tarjeta que se incorpora a un PC.

Por último, en el ordenador se analizan los datos con ayuda del software pertinente, para obtener los parámetros dinámicos de la estructura.

Como se ha comentado anteriormente, si la excitación es conocida y caracterizada en el tiempo, podremos realizar un análisis determinístico mediante una serie de técnicas matemáticas. Dichas técnicas pueden ser agrupadas de forma resumida en técnicas de análisis en el dominio de la frecuencia y en el dominio del tiempo.

Así, en el dominio de la frecuencia, podemos emplear métodos más o menos simples, como el método de selección de picos (peak piking)(Imagen 6), el de ajuste de curvas FRF, el de ajuste circular, o el método inverso; o métodos más avanzados, como el Rational Fraction Polynomial (RFP), el Complex Exponential Frequency Domain (CEFD) o el Polyreference Frequency Domain (PRFD).

Por otra parte, en el dominio del tiempo, podemos usar métodos indirectos como el Complex Exponential (CE), Least-Squares Complex Exponential (LSCE), Polyreference Complex Exponential (PRCE), Ibrahim Time Domain (ITD),

Eigensystem Realization Algorithm (ERA), o métodos directos como el Auto Regresive Moving Average (ARMA).

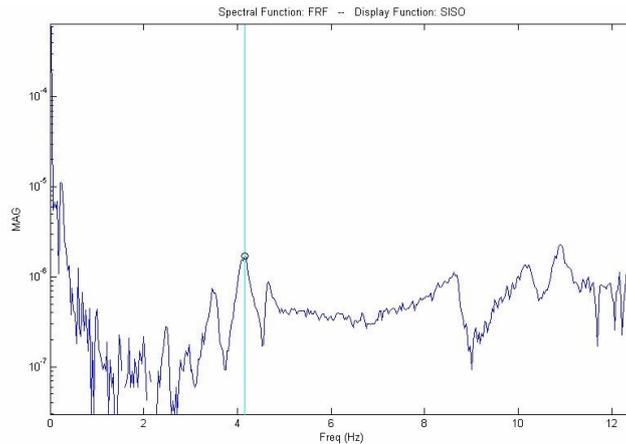


Imagen 6 FRF de un sistema mecánico. Los picos muestran las frecuencias de resonancia.

3.5 Aplicaciones

En el ámbito de la edificación y las obras públicas esta tecnología se está utilizando principalmente en los siguientes campos:

- a) Análisis del daño
- b) Monitorización de la integridad estructural o SHM (Structural Health Monitoring)
- c) Actualización dinámica (Model Updating)

En el caso del análisis del daño se emplean un conjunto de técnicas destinadas a localizar lesiones en la estructura mediante análisis de los cambios en las frecuencias naturales. Destacan entre las técnicas más utilizadas:

- El método coordinate modal assurance criterion (COMAC)
- Parameter Method (PM)
- Mode Shape Curvature Method (MSCM)
- Damage Index Method (DIM)
- Sum of all Curvature Errors method (SCE)
- FE Model Updating method (FEMU)

SHM o Structural Health Monitoring es una vía de estudio que se está ampliando en los últimos años. En ella, el equipo de captación dinámica se deja permanentemente en la estructura, monitorizando su funcionamiento y verificando que no se producen cambios inesperados. La actualización dinámica estudia la forma de reducir el error en los modelos de elementos finitos, mediante comparación entre los resultados dinámicos de estos modelos y los obtenidos en ensayos sobre estructuras reales. Actualmente, en el campo de la ingeniería civil, estos métodos se están empleando en puentes, presas y grandes edificios y monumentos.

3.6 Análisis Modal Experimental vs Análisis Modal Operacional

El análisis modal experimental (EMA) es empleado comúnmente en ingeniería civil, donde por la magnitud de las estructuras, no es conveniente someterlas a excitaciones, ya sea por la desproporcionada excitación necesario o por la posibilidad de infligir un daño inasumible en el mismo y, además esto se realiza normalmente con estructuras que se encuentran en servicio.

El análisis modal es además un amplio ámbito que no sólo se aborda en el sector de la construcción, también es muy utilizado en la ingeniería industrial como un método de optimización y de detección de defectos en sectores donde los defectos son inasumibles como es la industria aeronáutica o automovilística entre muchos otros.

El análisis modal experimental tradicional (EMA) utiliza mediciones de entrada (excitación) y de salida (respuesta) para estimar parámetros modales (imagen 7), que consisten en frecuencias modales, relaciones de amortiguación, formas modales y factores de participación modal.

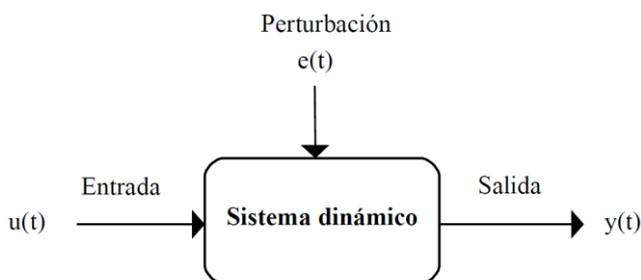


Imagen 7 Análisis modal experimental tradicional (EMA)

Este análisis requiere de la utilización de varios componentes para la toma de datos, que pueden enumerarse en tres bloques básicos: 1. Mecanismo de excitación; 2. Captación de vibraciones; 3. Adquisición de datos.

Este análisis presenta varias ventajas como el control de las señales de entrada y la aplicación de modelos determinísticos que no se basan en el azar y la probabilidad permitiendo en cierta medida la obtención de resultados más confiables, también presenta varias desventajas ya que el mecanismo de excitación debe estar permanentemente conectado a la estructura modificando factores vitales como la masa aunque existen otros mecanismos de excitación como el martillo de impulso que se pueden aplicar a la estructura.

El Análisis Modal Operacional por otra parte es el análisis modal donde solo se conoce la salida del esquema anterior, sustituyéndose los valores de entrada por ruido o perturbación y la excitación estructural es provocada por la llamada excitación ambiental o natural. Esta técnica ha ganado una amplia fama y uso en varias ramas de la ingeniería para obtener las características modales de estructuras complejas como son plataformas petrolíferas, edificios de alta complejidad, puentes, etc. Este procedimiento posee una serie de ventajas que lo hace deseable sobre el EMA bajo ciertas condiciones no queriendo decir que el método sea mejor ya que posee varias desventajas. Las excitaciones se producen de manera arbitraria por el uso habitual de la estructura (viento, tráfico, etc..) y, mediante la toma de datos de la respuesta dinámica, pueden extraerse las características modales de la estructura (formas modales, frecuencias a las

que se dan y factores de amortiguamiento). Al igual que en el EMA, se requiere de diversos aparatos para medir las respuestas de la estructura. Puesto que no es necesario inducir la excitación, se prescinde del shaker o mecanismo excitador, teniendo que emplear:

1. Sensores de Medidas
2. Aparatos de adquisición de datos

Al pasar de los años, OMA ha evolucionado como una disciplina autónoma. Sin embargo, la mayoría de los métodos del OMA se derivan de los procedimientos del EMA, por lo que comparten una base teórica común con procedimientos de entrada-salida. La principal diferencia reside en la formulación de la entrada, la cual es conocida en el EMA y aleatoria y no medida en el OMA. Además, mientras que los procedimientos EMA se desarrollan en una estructura determinística, los métodos del OMA pueden ser vistos como su contraparte estocástica.

Conclusiones

Finalmente, debemos reseñar el valor histórico, cultural e identitario que tienen los forjados de madera en la construcción, por lo que cualquier intervención en este tipo de estructura debe hacerse con sumo cuidado. Por ello, el uso de ensayos no destructivos vela por la integridad del bien y permiten poder evaluarlo con precisión y fiabilidad.

Durante el desarrollo de este proyecto se proporciona un conocimiento profundo de algunas de las técnicas más empleadas actualmente en la detección de daños en estructuras, este conocimiento ayudará a la aplicación de las mencionadas técnicas a estructuras reales.

Se hace necesario el conocimiento previo de la teoría y evolución del análisis modal para realizar una correcta implementación e interpretación de los datos brindados por los softwares de procesamiento de señales y obtención de parámetros modales.

.

Recomendaciones:

- Profundizar en la teoría y aplicación del Análisis Modal, sobre todo, en la preparación del experimento y el mejoramiento de los procedimientos de obtención de las señales, para lograr una mejor identificación del sistema y obtención de parámetros modales.
- Se recomienda una preparación previa en el uso del software de identificación que se use, tanto para la identificación como para la toma de datos de la estructura.
- Difundir el uso del Análisis Modal entre los profesionales para así lograr una mayor versatilidad en la obtención e interpretación de las propiedades de las estructuras.

Referencias bibliográficas

Bilošová, A. (2011). Modal Testing. Ostrava, República Checa

Claro Duménigo, A. (2015). Métodos para la modelación y el análisis experimental de puentes frente a cargas dinámicas. Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

Companioni, F. D. (2016). Análisis Modal Operacional mediante el empleo de acelerómetros. Santa Clara: UCLV.

Crespo Cascales, JJ. (2013). Aplicación de la END a la Restauración y Conservación del Patrimonio Arquitectónico: La Madera. España.

García Fernández, JR. (2018). Análisis Modal Experimental de Estructuras. Aplicación en caso de estudio. Cuba.

García O´Rally, I. B. (2016). Métodos para la detección, localización y evaluación de daños en estructuras de puentes a partir de parámetros modales. Santa Clara.

Gayo Calo, L. (2015) Estudio comparativo de sistemas de rehabilitación en forjados de madera. Universidad da Coruña.

Losa Miranda, G. (2015). Tecnologías de sensorización e identificación modal. Aplicación a la determinación del amortiguamiento estructural. Valladolid, España.

Rojas Díaz, R. (2006) Detección de fallos en estructuras mediante la medida de la variación de sus propiedades dinámicas. Universidad de Sevilla.