



Por una cultura común del riesgo sísmico
Pour une culture commune du risque sismique

Recomendaciones para la Instrumentación de edificios

E4.1.2 - Acción 4



Autores

Pujades³ LG, González-Drigo³ R, Lantada³ N, Blázquez¹⁰ A.

Palabras clave

Instrumentación de edificios. Análisis modal observacional (OMA. *Operational modal analysis*). Monitorización de la seguridad estructural (SHM. *Structural health monitoring*). Series temporales de aceleración, velocidad y desplazamiento. Ruido ambiental. Radar de apertura real (RAR). Modelado estructural. Aplicaciones a detección del daño.

Socios del proyecto

1. ICGC: Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya
2. BRGM: Bureau de Recherches Géologiques et Minières
3. UPC: Universitat Politècnica de Catalunya
4. DIGC: Secretaria General. Departament d'Interior. Generalitat de Catalunya
5. IEA: Institut d'Estudis Andorrans
6. ENIT: Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes
7. CNRS : Centre National de la Recherche Scientifique - Délégation Alsace
8. EPLFM : Entente pour la Forêt Méditerranéenne
9. DW: Deveryware
10. ACE: Associació de Consultors d'Estructures

Otras instituciones

11. ARI: Andorra Recerca + Innovació.
12. PCA: Protecció Civil Andorra
13. CTTC: Centre tecnològic de telecomunicacions de Catalunya.
14. ISE: Institut Santa Eugènia (Girona)
15. CHB: Centre Hospitalier de Bagnères

© 23/12/2021, proyecto POCRISC

Agradecimientos

La instrumentación y análisis de los edificios esenciales, sobre los que trata este informe, no habrían sido posibles sin la colaboración de entidades, instituciones y personas que han hecho posible, por una parte, el acceso físico a los edificios y por otra, la disponibilidad de información, de primer nivel, sobre sus características arquitectónicas y estructurales, imprescindibles para su modelado. En particular se agradece la implicación en los trabajos de instrumentación de edificios de: Natàlia Gallego, Meritxell Nicolau, Josep Soler, Antoni Blázquez, Claude Pécastaign y Silvia Hermosilla

La profesionalidad, dedicación y saber hacer del personal gestor y administrativo de las instituciones participantes en el proyecto ha permitido gestionar los siempre tediosos y delicados temas burocráticos y administrativos que comportan el normal seguimiento del proyecto, permitiendo, al personal investigador, centrarse en los aspectos y desarrollos científico-técnicos. Especiales gracias a Agnès Lladós, Silvia Garceso, Malcolm Campbell Burns, Beatriu Torres y Francesc Vendrell.

Un agradecimiento especial a Xavier Goula, que fue impulsor del proyecto y que, incluso después de su jubilación, lo ha dinamizado, implicándose en prácticamente todas las acciones. Su carisma personal y su entusiasmo investigador han contribuido, de forma importante, al desarrollo y resultados del proyecto.

Síntesis

El objetivo de este documento es proveer recomendaciones para la instrumentación de edificios esenciales, si bien éstas también pueden ser útiles para otros tipos de edificios y estructuras civiles. Para contextualizar estas recomendaciones se aportan elementos sobre la instrumentación en zonas donde el peligro sísmico es alto y donde la instrumentación de determinados edificios se prescribe en los correspondientes códigos sísmicos. Las recomendaciones específicas se refieren al análisis modal operacional, incluyendo el análisis modal computacional, que debe ser un compañero de viaje del operacional. Se resumen las diferentes etapas de un proyecto de estudio de vibraciones ambientales, se describen brevemente las lecciones aprendidas en las instrumentaciones realizadas en POCRISC y, en base a éstas, se dan unas recomendaciones específicas, en referencia a la instrumentación propiamente dicha y al análisis y tratamiento de la señal, en los dominios del tiempo y de la frecuencia. Se concluye resaltando cómo, a pesar de las limitaciones y dificultades de las aplicaciones a detección y cuantificación de daño, la monitorización modal de edificios tiene un importante potencial futuro en la monitorización de la salud estructural, que va más allá del daño estrictamente sísmico.

Índice

Agradecimientos.....	i
Síntesis.....	iii
Índice	v
Lista de figuras.....	vii
1 Introducción.....	1
El espectro sísmico	1
Todo vibra.....	1
Estructuras y modos de vibración.....	1
El análisis modal.....	2
Clases de análisis modal.....	3
El OMA y la monitorización de la salud estructural	4
Determinación de periodos modales.....	4
Relación periodo – daño global	5
Contenido	5
2 Alcance	5
3 Instrumentación en zonas sísmicas	6
Objetivos de la instrumentación	6
Instrumentación-de-código – instrumentación-exhaustiva.....	6
4 Instrumentación OMA	8
Objetivos.....	8
Etapas.....	9
ETAPA 1. Preparación, programación y presupuesto.....	9
ETAPA 2. Documentación y CMA.....	9
ETAPA 3: Instrumentación y trabajo de campo.....	10
ETAPA 4: Análisis de datos y resultados.....	10
ETAPA 5: Informes finales	11
5 Lecciones aprendidas.....	11
Edificio de Andorra: edificio Prat del Rull.....	11
Instrumentación y modelado	11
Análisis y resultados.....	12
Edificio de España: Instituto-Escuela <i>Santa Eugènia</i>	13
Instrumentación y modelado	13

Análisis y resultados.....	13
Edificio de Francia. Hospital de Bagnères de Bigorre	14
Instrumentación y modelado	14
Análisis y resultados.....	15
6 Recomendaciones para la instrumentación	16
Antes de instrumentar	16
Durante la instrumentación	17
Después de la instrumentación.....	17
7 Recomendaciones para el análisis de las señales.....	17
Dominio del tiempo.....	17
Intensidad de la excitación	17
Movimiento de partícula	18
Dominio de la frecuencia.....	18
Razones espectrales.....	18
La densidad espectral de Potencia (PSD).....	19
Los espectrogramas	19
8 Conclusiones	20
Conclusiones de Murià-Vila y González-Alcorta (1995).....	22
Conclusiones de Espinoza-Barreras (1999)	22
Reflexión final	23
Referencias	25
Anexo I. Análisis de series temporales	27
Anexo II. Ondas y tipos de instrumentos sísmicos	29

Lista de figuras

Figura 1.	Ejemplo de descomposición modal. (Ondrej 2019).....	3
Figura 2.	Esquemas típicos de instrumentación. (Fuente: Çelebi 2002).....	7
Figura 3.	Esquema de instrumentación propuesto en Skolnik (2013).....	8
Figura 4.	Variación de los niveles de ruido a lo largo del día. a) un lunes, día lectivo y, b) un domingo día festivo. Los tiempos corresponden a la hora local.....	18
Figura 5.	Movimiento de partícula, durante un segundo, para un periodo de 0.23 s. Se observa cómo se trata de un modo de traslación en la dirección longitudinal (HN1). La señal se ha obtenido mediante un filtrado en la banda 4.17-4.61 Hz.	19
Figura 6.	Ejemplo de PSD's medias y síntesis de las frecuencias modales detectadas, en el rango de periodos entre 0.2 y 1 s.....	20
Figura 7.	a) Ejemplo de espectrograma. b) Focalización en los periodos entre 0.2 y 0.3 s	21
Figura 8.	Principales ondas sísmicas y tipos de instrumentos. (Modificado de Roca, 1996).....	29

1 Introducción

El espectro sísmico

El análisis espectral ha permitido observar el contenido frecuencial de las señales sísmicas. Éstas abarcan un amplio rango, comprendido entre los 100.000 Hz (periodos de 10^{-5} s) de las emisiones acústicas y los cercanos a 10^{-5} Hz; períodos que, como las 12 horas de las mareas terrestres, se sitúan entre los 10.000 y 100.000 s. Dentro de este amplio rango de vibraciones, el contenido frecuencial de las ondas internas de sismos próximos se halla en unos pocos Hz, períodos entre 0.05 y 10 s, mientras que el rango de períodos de las ondas superficiales de sismos lejanos se halla en unas decenas de segundos, frecuencias entre 0.01 y 0.05 Hz. A frecuencias más altas que las contenidas en las ondas internas, se hallan las ondas producidas por explosiones, mientras que a períodos mayores que los contenidos en las ondas superficiales, observamos las oscilaciones libres de la Tierra (con períodos cercanos a una hora).

Todo vibra

Además, los objetos, las cosas, los edificios, los suelos e, incluso, el cuerpo de los animales, tienen unas frecuencias propias de vibración. Así el suelo rocoso alejado de ruido cultural, presenta una vibración remanente con una frecuencia centrada entre 0.1 y 0.3 Hz, períodos entre 3 y 10 segundos. Los suelos blandos pueden amplificar un rango más amplio de frecuencias. Los edificios vibran con períodos entre 0.1 y 10 s, los edificios más altos presentan los períodos más largos. Incluso en los hombres y mujeres, por ejemplo, cada miembro tiene una frecuencia propia, cuya resonancia, por ejemplo, con una vibración mecánica, puede producir una sensación de malestar. Así, por ejemplo, la masa abdominal vibra a frecuencias de entre 4 y 8 Hz (períodos de entre 0.12 y 0.25 s), por lo que la persona notará una sensación desagradable cuando se halle sometida a vibraciones de este tipo. Estos y otros detalles sobre instrumentación sísmica pueden hallarse en Pujades (2020). En el Anexo II se muestran las ondas y tipos de instrumentos frecuentes en sismología y en ingeniería sísmica.

Estructuras y modos de vibración

Así pues, las estructuras también vibran, y el análisis modal es la técnica usada para caracterizar su respuesta y comportamiento dinámicos. El análisis modal (Ondrej 2019) permite observar las principales características dinámicas de aparatos, dispositivos, estructuras e infraestructuras, habiéndose convertido en una excelente herramienta de caracterización, seguimiento y control, de las principales propiedades de vibración de los edificios. Estas propiedades y observables tienen una alta sensibilidad a modificaciones, entre otras, en elementos estructurales y no estructurales y en las condiciones de carga del edificio.

En ingeniería civil y en arquitectura, en general y, más concretamente en ingeniería sísmica y dinámica estructural, desde la segunda mitad del siglo XX, día a día, ha ido cobrando interés y relevancia el conocimiento del estado de conservación, seguridad y funcionalidad de infraestructuras y edificios. El catastrófico terremoto de México de 1985 supuso un antes y un después, y produjo un importante impulso a este tipo de investigaciones.

Por otra parte, en este siglo XXI y, por ejemplo, en referencia a puentes, se han producido numerosos colapsos en el mundo. En muchos casos, estos derrumbes, se producen en condiciones operativas normales. El colapso del viaducto de Polcevera, en Génova, Italia, el

14 de agosto de 2018, que se produjo de forma súbita y sin dar señales precursoras, puso de manifiesto la importancia de disponer de herramientas para monitorizar la salud estructural. Así, es conveniente disponer de técnicas y métodos que, en tiempo real o cuasi real, permitan detectar cambios en las condiciones resistentes de edificaciones. Esto es de particular interés en edificios, estructuras e infraestructuras esenciales y/o de importancia especial. La detección de deterioros, daños, o incluso, de modificaciones en edificios y estructuras, es un recurso sustancial para su mantenimiento, puede comportar ahorro de recursos económicos y, en casos extremos, puede evitar catástrofes y salvar vidas.

El análisis modal

A pesar de la complejidad de las construcciones y edificios, en muchos casos, sobre todo cuando los edificios son regulares en geometría y en distribución de masas y rigideces, su respuesta dinámica puede modelarse de forma matricial, como un sistema lineal de N grados de libertad, mediante la siguiente ecuación:

$$M \ddot{X}(t) + C \dot{X}(t) + K X(t) = -M J a(t) = F(t) \quad (1)$$

M , C y K son, respectivamente, las matrices de masa, amortiguamiento y rigidez. Estas matrices son de dimensión $N \times N$, J es un vector columna unitario de dimensión N , y $X(t)$ es también un vector columna de dimensión N , que tiene, como componentes, los desplazamientos de cada grado de libertad, o, en este caso, los desplazamientos de cada planta. $a(t)$ es la aceleración en la base del edificio y, así, $F(t)$ es también un vector columna de dimensión N . Explicaciones más detalladas sobre las definiciones y construcción de estas matrices, pueden hallarse en muchas publicaciones y textos de dinámica de estructuras como, por ejemplo, Chopra (2019) y ACHE (2020).

Las características propias de la estructura se obtienen, considerando oscilaciones libres no amortiguadas. En este caso, la ecuación (1) queda:

$$M \ddot{X}(t) + K X(t) = 0 \quad (2)$$

Si suponemos una solución armónica de la forma: $X(t) = X e^{i(\omega t + \varphi)}$, donde X es un vector con las amplitudes de los movimientos en cada planta, la ecuación (2) queda:

$$(K - \omega^2 M) X = 0 \quad (3)$$

que constituye un problema de autovalores y autovectores. De esta forma, se obtienen N autovalores ω_i^2 ($i = 1 \dots N$), que representan las frecuencias propias de vibración de la estructura. La frecuencia más baja, ω_1 , se llama frecuencia fundamental. Además, cada autovalor, lleva asociado un autovector, X_i , que se denomina modo, o forma modal i , de vibración. Otros parámetros importantes cuando se aborda la respuesta dinámica de edificios con muchos grados de libertad, mediante técnicas simplificadas, son los factores de participación modal PF_i y los coeficientes modales de masa α_i . Estos factores y coeficientes dan una idea de las contribuciones de cada modo a la respuesta dinámica global del edificio. A veces se suele referir a estos modelos simplificados como modelos de masa concentrada

(Çelebi 2000). La Figura 1 muestra un ejemplo de descomposición modal. La vibración global del edificio resulta de la superposición de los movimientos de sus formas modales.

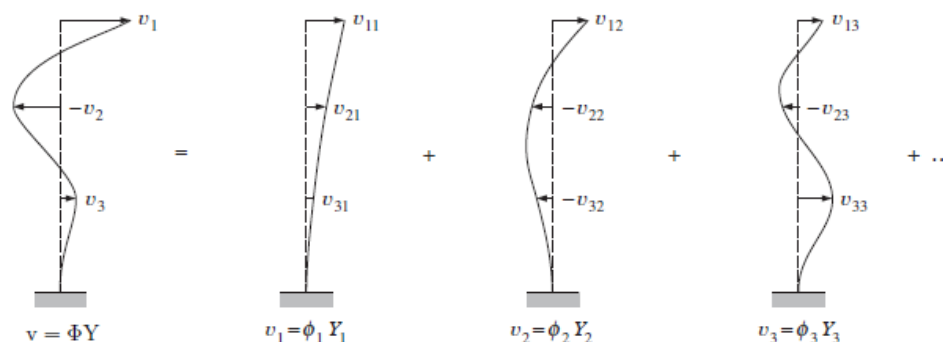


Figura 1. Ejemplo de descomposición modal. (Ondrej 2019)

Clases de análisis modal

En la literatura suelen considerarse tres tipos de análisis modal: i) análisis modal computacional (CMA, *Computational modal analysis*), ii) análisis modal experimental (EMA, *Experimental modal analysis*) y iii) análisis modal operacional (OMA, *Operational Modal Analysis*).

El CMA se basa en el análisis estructural numérico, en el que, a partir de un modelo simplificado del edificio, caracterizado mediante matrices de masa, rigidez y amortiguamiento, se hallan sus formas y frecuencias modales; cada una de ellas, definida mediante un sencillo sistema lineal, determinado completamente por su masa, rigidez y amortiguamiento, o de forma equivalente, mediante su periodo propio y amortiguamiento. En edificios regulares dominan los modos fundamentales, que involucran un porcentaje alto de la masa del edificio; en general hay un modo en la dirección longitudinal, uno en la transversal y, cuando los centros de masa y rigidez no coinciden, aparece también un modo de torsión. En edificios altos, y/o irregulares, los modos superiores también tienen contribuciones importantes a la respuesta estructural. Así, el análisis modal computacional (Figura 1) nos da una imagen clara de las formas y frecuencias de vibrar que son propias del edificio.

El EMA consiste en medir las vibraciones inducidas en objetos por acciones controladas; desde hace décadas el EMA ha sido usado, con éxito, para estimar los modos de vibración de pequeñas estructuras, o maquinaria, las cuales pueden trasladarse a un laboratorio y montarse en un banco de pruebas que permite aplicar una excitación artificial; tanto la excitación como la vibración que la excitación induce en la estructura ensayada pueden ser medidas y analizadas.

Pueden usarse distintas fuentes de excitación, incluyendo martillos de impacto, excitadores controlados o pequeñas mesas vibrantes. El tipo y el número de excitadores, así como el número y distribución de los acelerómetros, dependen de los modos que se pretende estudiar. Las mesas vibrantes, con diferentes características y tamaños se usan también en ingeniería sísmica. Muchas de estas mesas vibrantes, incorporan sofisticados sistemas de excitación, y tienen la ventaja de que pueden reproducir las aceleraciones de terremotos reales y permiten estudiar edificios a escala. También hay mesas vibrantes de grandes dimensiones en las que es posible realizar el EMA en edificios que son modelos a escala 1:1 de edificios reales. Severn (2010) publica una nota histórica sobre el desarrollo de mesas vibrantes en ingeniería sísmica. La instrumentación clásica de edificios en zonas sísmicas está orientada al seguimiento y análisis del impacto de los sismos en edificios. Determina-

dos códigos sísmicos, establecen recomendaciones para la instrumentación de edificios, generalmente de gran altura. Estos estudios pueden considerarse casos de EMA, donde la señal excitadora es el sismo. Incluso, frecuentemente, estos instrumentos no registran de forma continua, sino que tienen un buffer de una duración predefinida que permite detectar cuándo llega una señal intensa, por encima de un umbral, también predefinido, y activar el registro continuo que, eventualmente, vuelve a cesar un tiempo predefinido, posterior a aquel para el que el umbral de intensidad deja de ser excedido. Con esto se consiguen registros de la respuesta del edificio a los sismos.

El OMA y la monitorización de la salud estructural

Pero lo que aquí nos ocupa es el OMA. El OMA y la monitorización de la salud estructural (SHM, *Structural Health monitoring*) son dos disciplinas con creciente actividad, conocimiento y recursos. El OMA persigue realizar el análisis modal en las condiciones operativas del edificio; es decir, sin interrumpir ni alterar su función y actividad normal. Los datos para el OMA son registros de la respuesta del edificio a la *vibración ambiental*, conocido también como ruido cultural. Borman y Wielandt (2013) describen las fuentes y características del ruido sísmico, incluyendo el ruido sísmico en entornos urbanos. Suele suponerse que la señal excitadora es un ruido blanco estacionario, en el dominio de las frecuencias de interés; es decir se trata de una señal cuya densidad espectral de potencia es plana en todo el rango de frecuencias de interés. Andersen (1997) analiza la identificación de estructuras de ingeniería civil usando modelos vectoriales autorregresivos, con promediados en ventanas móviles, (ARMA, Auto-Regressive-Moving-Average). En un proceso autorregresivo, la variable de interés o de salida, depende linealmente de sus valores anteriores y el uso de ventanas móviles es útil para el análisis de series temporales estacionarias. Ghalishooyan y Shooshtari (2015) y Brincker y Ventura (2015) son dos buenas referencias sobre el OMA.

Una aplicación creciente del OMA es el SHM. En Farrar y Worden (2007) y Entezami (2021) se exponen buenas introducciones al SHM. La monitorización de la resistencia de estructuras y edificios, implica su observación y análisis, de forma periódica o continua, para detectar cambios, por ejemplo, en sus propiedades materiales o geométricas que tengan relación con su deterioro o daño. En ingeniería sísmica se ha observado cómo los periodos propios de los edificios aumentan con el daño; ver, por ejemplo, Vidal et al. (2014). Así, uno de los retos de POCRISC ha sido usar los periodos modales como indicadores de daño. El mayor o menor éxito de este reto depende de: a) la capacidad del OMA para determinar periodos modales, b) la relación del periodo con el daño global y c) la relación de las variaciones de los periodos con la localización del daño.

Determinación de periodos modales

La aplicación del OMA a diferentes tipos de edificios de mampostería, hormigón armado y de diferentes alturas, ha puesto de manifiesto su capacidad para determinar las frecuencias naturales con suficiente estabilidad, fiabilidad y precisión. Así, por ejemplo, su aplicación al edificio del *Institut Santa Eugènia* de Girona, España, y al de la sede de Protección Civil, en Andorra, donde se tomaron medidas continuas durante 8 días, permitió observar una suficiente estabilidad y capacidad del OMA, para distinguir pequeñas variaciones. En los periodos de ocupación del edificio, los periodos aumentan, debido a aumentos de masa; en horas tardías de la noche y temprano de madrugada, las frecuencias crecen, lo que se asocia a un aumento de la rigidez, causado por una disminución de la temperatura global del edificio.

Relación periodo – daño global

Medidas empíricas en edificios de hormigón armado, antes y después del terremoto de Lorca (Vidal et al. 2014), han permitido observar aumentos en los periodos con el daño. Simulaciones numéricas en el edificio del Hospital de Bagnères de Bigorre, en Francia, han puesto manifiesto, cómo el inicio del daño puede comportar variaciones, de hasta el 5%, en los periodos propios del edificio. Los espectros de capacidad, en su formato, por ejemplo, periodo-desplazamiento espectral, $T(Sd)$, permiten observar cómo la incursión de la deformación en el rango no lineal comporta una variación del periodo estructural, correspondiente a la dirección en la que se empuja el edificio. Estas variaciones son más intensas para curvas que muestran ablandamiento que para las que muestran endurecimiento. También es cierto que la variación en el periodo con el daño depende fuertemente del tipo de edificio, básicamente de su rigidez inicial y de su ductilidad. En edificios muy rígidos y poco dúctiles, pequeñas variaciones en el periodo pueden darse ya en el punto de colapso, mientras que, en edificios flexibles y dúctiles, variaciones significativas pueden darse para daños leves.

Contenido

Después de esta introducción, Sección 1, donde se centra el marco conceptual del análisis modal como una forma simplificada de entender el comportamiento dinámico de los edificios, se expone, en la Sección 2, el alcance de este documento. La Sección 3 se dedica a la instrumentación de edificios en zonas de alta sismicidad y la Sección 4 a la instrumentación orientada al OMA. La sección 5 es central, pues en ella se resumen las lecciones aprendidas en la instrumentación a lo largo del proyecto POCRISC. Las secciones 6 y 7 recogen las recomendaciones para la instrumentación y para el análisis de las señales registradas, respectivamente. En la sección 8 se muestran algunas conclusiones y unas reflexiones finales, sobre la complejidad del problema abordado, pero, también sobre la convicción de la utilidad de este tipo de estudios y sobre la confianza en su potencial. Las referencias y dos anexos complementan y completan este documento.

2 Alcance

Las aplicaciones del OMA en el marco de la Acción 4 de POCRISC, perseguían ensayar esta técnica en edificios esenciales y evaluar la viabilidad, ventajas y limitaciones, de efectuar el OMA mediante un dispositivo, el radar de apertura real (RAR), que permitiera medir los periodos fundamentales, a distancia, sin necesidad de entrar en el edificio. La intención iba directamente dirigida también a la capacidad del OMA para evaluar el daño es decir del OMA orientado al SHM.

El propósito de este documento, es sencillo; se trata de exponer las lecciones aprendidas en la instrumentación de los 3 edificios esenciales escogidos, y de sugerir unas pocas recomendaciones que puedan ser de utilidad a personas o grupos interesados en este tipo de investigaciones. Así, en cierto modo, este breve documento que constituye el Entregable E4.1.2, complementa el informe sobre los edificios instrumentados identificado como Entregable E4.1.1. (Pujades et al. 2021)

El documento se aprovecha también, para aportar elementos y referencias básicas que permitan al lector situarse en el marco teórico y aplicado de este tipo de estudios.

3 Instrumentación en zonas sísmicas

La instrumentación de edificios en zonas sísmicas puede englobarse dentro del EMA; en este caso, la excitación es el sismo. Çelebi (2000) y otros muchos trabajos del mismo autor y colaboradores, como, por ejemplo, Çelebi (2002, 2006) y Çelebi et al. (1987, 2016), son referencias básicas referentes a este tipo de vigilancia o control de edificios frente a terremotos: terremotos que se supone son frecuentes. Normalmente se trata de edificios aislados de gran altura. Se presenta a continuación un resumen de diferentes aspectos de interés tratados en Çelebi (2002) y en Skolnik (2013).

Objetivos de la instrumentación

Siguiendo a Çelebi (2000), el objetivo principal de un programa de instrumentación sísmica para sistemas estructurales es mejorar nuestra comprensión de su comportamiento y potencial de daño bajo las cargas dinámicas de los terremotos. Como resultado de esta comprensión, las prácticas de diseño y construcción pueden modificarse de manera que se minimicen los daños por terremotos futuros.

Un programa de instrumentación debe proporcionar suficiente información para reconstruir la respuesta de la estructura, con suficiente detalle, para compararla con la respuesta predicha por métodos y modelos matemáticos, así como con los observados en laboratorios. Además, los datos registrados deben permitir explicar las razones de cualquier daño a la estructura.

Es importante conocer las historias temporales del movimiento del suelo y de campo libre cercano, para cuantificar la interacción del suelo y la estructura. Más específicamente, una estructura bien instrumentada, para la cual se haya obtenido un conjunto completo de grabaciones, debería proporcionar información útil para:

- Verificar la idoneidad de los modelos dinámicos, tanto de masa concentrada como de elementos finitos, en el rango elástico.
- Determinar la importancia del comportamiento no lineal en la respuesta general y local de la estructura.
- Seguir el comportamiento no lineal que se propaga por toda la estructura a medida que aumenta la respuesta y determinar el efecto de este comportamiento no lineal en la frecuencia y el amortiguamiento.
- Correlacionar el daño con el comportamiento inelástico.
- Determinar los parámetros de movimiento del suelo que se correlacionan bien con el daño de respuesta del edificio y, eventualmente, hacer recomendaciones para mejorar los códigos sísmicos (Çelebi et al. 1987).
- Facilitar las decisiones para modernizar/fortalecer el sistema estructural, así como asegurar los contenidos dentro de las estructuras.

Instrumentación-de-código – instrumentación-exhaustiva

Se transcriben a continuación las recomendaciones del trabajo de Çelebi (2002) para la instrumentación de edificios en zonas sísmicas. Para zonas con sismicidad alta en Estados

Unidos, el código UBC (1997) y anteriores ediciones¹, aconsejan un mínimo de 3 acelerógrafos en edificios de más de 6 pisos y una superficie total de piso superior a 60000 pies² (~5574 m²), y en edificios de más de 10 pisos, sin importar el área. Esta instrumentación tipo UBC, se muestra en la Figura 1 a). Con todo, en base a la experiencia de sismos ocurridos, esta disposición de sensores proporciona datos suficientes para verificaciones del modelo estructural. Rojahn y Matthiessen (1977) concluyeron que la respuesta predominante de un edificio de gran altura puede describirse mediante la participación de los primeros cuatro modos de cada uno de los tres conjuntos de modos (dos traslaciones y una torsión); por lo tanto, sería necesario un mínimo de 12 acelerómetros para registrar estos modos. Además, si se espera que el movimiento vertical y el balanceo sean significativos y es necesario registrarlos, se requieren al menos tres acelerómetros verticales adicionales en el nivel del sótano. Este tipo de esquema de instrumentación se denomina esquema de instrumentación exhaustiva ideal y se ilustra en la Figura 1 b).

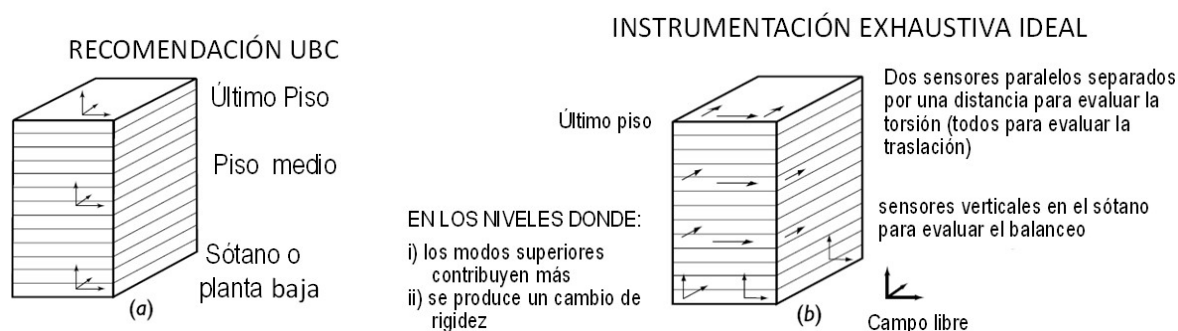


Figura 2. Esquemas típicos de instrumentación. (Fuente: Çelebi 2002).

Skolnik (2013) coincide con Çelebi (2002) en que el objetivo principal de la monitorización estructural es mejorar la seguridad y la confiabilidad de los sistemas de construcción y permitir la detección de daños para la evaluación de la condición posterior al sismo. Skolnik (2013), efectúa la propuesta de instrumentación de acuerdo a los requisitos de diversos códigos de construcción y en base a la experiencia en ingeniería y en diseño estructural. Skolnik (2013) también describe el número mínimo de canales que se requieren y que debe ser proporcional a la altura del edificio. La Figura 3 muestra el esquema de instrumentación propuesto. Tanto Çelebi (2002) como Skolnik (2013) analizan casos especiales de instrumentación, como son las cimentaciones, los diafragmas flexibles y los edificios con aislamiento de base. Finalmente, Çelebi (2000) indica que, cuando es posible, es recomendable incluir en el esquema de instrumentación, una estación de campo libre específica del edificio. La estación se despliega a una distancia mayor que 1,5-2 veces la altura del edificio más cercano/más alto para que los registros no se vean influenciados por la vibración de los edificios. En áreas urbanas, esto suele ser un problema, debido a la complejidad y densidad del tejido urbano. La instrumentación de edificios también está regulada en otras muchas nor-

¹ Códigos de referencia en Estados Unidos

Un referente de los códigos es el *Uniform Building Code* (UBC), que fue publicado por primera vez en 1927 y se fue actualizando, aproximadamente cada 3 años, hasta el año 1997, año de su última versión. A partir del año 2000, el UBC fue substituido por el *International Building Code* (ICC 2018). El *International Code Council* (ICC) sigue publicando actualizaciones de los códigos (ICC 2021). Las ventajas y beneficios de adoptar las normas sísmicas en Estados Unidos, se documentan en FEMA (2020).

mas. Por citar un ejemplo, ROPH (2015) publica las “directrices y normas de aplicación sobre instrumentación de registro de terremotos para edificios en la república de Filipinas, con configuraciones compatibles y comparables a las de las figuras 2 y 3 (Figura 2 y Figura 3).

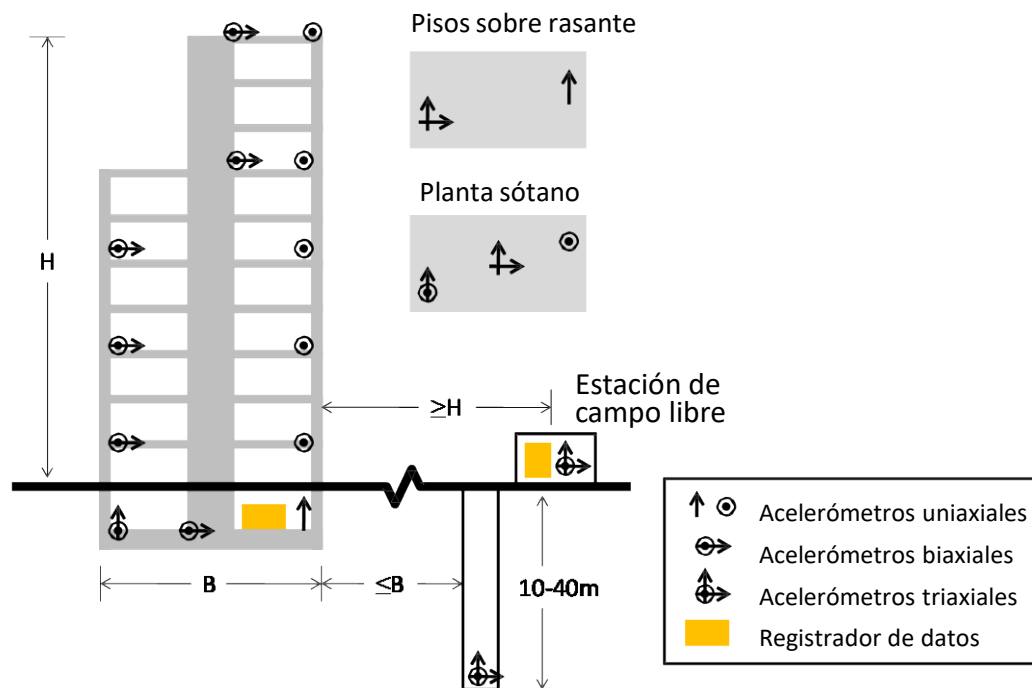


Figura 3. Esquema de instrumentación propuesto en Skolnik (2013)

Çelebi (2002) también hace referencia a los avances en las técnicas de identificación de sistemas, que permiten identificar las características estructurales (frecuencias y amortiguamientos modales), usando respuestas registradas de las estructuras (Ljung, 1987), destacando cómo estos métodos han evolucionado hacia versiones de una-sola-entrada – una-sola-salida y versiones múltiples-entradas – múltiples-salidas, que permiten la construcción de formas modales. La siguiente sección se dedica a la instrumentación de edificios que tiene, como principal objetivo, el OMA.

4 Instrumentación OMA

De acuerdo al formulario del proyecto POCRISC, y en el marco de la acción 4, se han instrumentado 3 edificios esenciales, uno por cada país participante. El propósito ha sido el análisis de la viabilidad de técnicas OMA para análisis expedito de daño. En forma resumida: aplicabilidad del OMA para SHM.

Objetivos

Espinoza-Barreras (1999) destaca los siguientes objetivos del SHM:

- *Control de calidad*
OMA a edificios recién construidos para verificar el diseño.
Esto es relevante ya que permite disponer de las condiciones iniciales, edificio sano.
- *Control de daños causados por un sismo.*
Medición en edificios después de un evento sísmico.
Con el propósito de conocer la relación entre cambios modales y daño.

- *Verificación de reparaciones o modificaciones.*
Medición en edificios reparados, reforzados o reformados.
Una vez más se trata de verificar si las actuaciones han sido correctas.
- *Control de una estructura durante su vida útil.*
Medición periódica y seguimiento de desviaciones.
El propósito es prever, prevenir y, en su caso, corregir, la degradación estructural y resistencia del edificio.

El propósito en POCRISC se centra en dos puntos básicos: a) inspección de daños por un sismo y b) vigilancia de la eventual degradación estructural. Dados los niveles de peligrosidad sísmica de la región POCTEFA el seguimiento de la degradación estructural cobra mayor relevancia y, en cierta manera, engloba el objetivo a).

En base a las experiencias y trabajos realizados durante el proyecto se sugieren a continuación las diferentes etapas aconsejables para un proyecto de instrumentación de edificios.

Etapas

Antes de proceder a instrumentar un edificio es importante delimitar el alcance del trabajo. Es aconsejable abordar el trabajo como un proyecto profesional o de investigación, según proceda, con las siguientes etapas:

1. Preparación y programación general
2. Documentación y CMA
3. Trabajos de campo
4. Análisis de datos y resultados
5. Informes finales

ETAPA 1. Preparación, programación y presupuesto

En esta etapa es importante responder a las siguientes cuestiones:

- Objetivo de la instrumentación.
- Información/documentación disponible/necesaria.
- Necesidades de personal y equipos, incluyendo programas y equipos informáticos
- Calendario y lugar de la instrumentación.
- Duración estimada de los trabajos de postproceso.
- Cuantificación de un presupuesto.

ETAPA 2. Documentación y CMA

En general es deseable disponer de la máxima documentación sobre el edificio a instrumentar. Es aconsejable disponer, al menos, de la ubicación, año de construcción, fechas y tipos de eventuales reformas, función, usos y nivel de ocupación del edificio, y, en la medida de lo posible, planos estructurales detallados. En esta fase, sobre todo en edificios esenciales, es fundamental contar con el apoyo de la gerencia, dirección o administración del centro y con la ayuda de los servicios de mantenimiento; en edificios residenciales puede ser de ayuda contar con la colaboración de la administración de la finca y con la junta de la comunidad de propietarios. También, en esta fase, que debe implicar una o varias visitas e inspecciones visuales del edificio, puede ser aconsejable efectuar un análisis expedito de la vulnerabilidad del edificio mediante una metodología de primer nivel.

Una vez disponible toda la información, la realización de un modelo y análisis modal computacional permitirá orientarse sobre las principales características y formas modales del edifi-

cio. También puede ser aconsejable efectuar un análisis estático no lineal (*pushover* análisis), lo que puede permitir disponer de curvas y espectros de capacidad y curvas de fragilidad. Se procurará dimensionar un presupuesto en horas de trabajo, programas y equipos, desagregando las diferentes tareas.

ETAPA 3: Instrumentación y trabajo de campo

Esta etapa es la más importante. Debe comprender al menos tres fases: a) programación detallada, b) Instalación de los sensores y c) recogida y archivo de los datos.

La fase a) requiere una o varias visitas al edificio, para localizar los sitios concretos para situar los sensores, así como las necesidades logísticas para su sincronización y transmisión en tiempo real, si procede y es posible. Estas operaciones, pueden requerir la instalación de antenas con visión directa GPS y conexión a redes de datos para su transmisión vía web. Más abajo, en un apartado específico, se dan recomendaciones más específicas y concretas sobre los detalles prácticos de la instrumentación.

La fase b) debe ser relativamente sencilla, si se ha realizado cuidadosamente la fase a). Sí que es cierto que conviene comprobar in situ que los datos se gravan correctamente y que estos corresponden al edificio y no a elementos individuales o incluso a zonas, como, por ejemplo, suelos, tipo parquet de madera, laminados o similares.

La fase c) es delicada, pues de ella depende el mayor o menor éxito de la campaña. Si se dispone de una unidad central de control con almacenamiento masivo en disco duro, habrá que codificar, controlar, verificar y salvar todos los datos recogidos, si los datos se han transmitido a un servidor central, habrá que verificar la correcta llegada y almacenamiento de datos. Es aconsejable replicar los datos y realizar copias de seguridad. En el proyecto POCRISC, los datos recogidos en el Hospital de Bagnères de Bigorre, se almacenaron en una unidad central de control, en los edificios de Andorra y Girona, el ICGC veló por los datos, que además están disponibles en un dominio público.

ETAPA 4: Análisis de datos y resultados

En esta etapa hay que lidiar con el análisis preliminar de los datos y con su depurado. Un primer análisis en el dominio del tiempo permitirá disponer de archivos en formatos adecuados al software del tratamiento de señales. Las tareas a realizar se centran en el CMA, en el OMA y en el análisis y discusión.

En referencia al CMA pueden usarse programas comerciales de análisis estructural. véase también el informe sobre los edificios instrumentados (Pujades et al. 2021).

En referencia al OMA existen también buenos programas comerciales, pero frecuentemente puede ser preferible usar software propio o mixto. Los recursos utilizados en POCRISC pueden consultarse en Pujades et al. (2021)

En referencia al análisis y discusión, ésta es la parte que cierra un proyecto CMA-OMA. Es una ocasión para la reflexión, síntesis y comunicación. Si se trata de un trabajo técnico puede ser suficiente reflejar los resultados obtenidos, de acuerdo con las especificaciones técnicas del encargo; si se trata de un trabajo de investigación es aconsejable ir más allá, discutiendo no solo sobre los resultados obtenidos sino también sobre su alcance y limitaciones, aportando ideas o sugerencias que permitan mejorar futuros trabajos. Todo ello se reflejará, oportunamente en el correspondiente informe final.

ETAPA 5: Informes finales

La redacción de los informes finales es una buena oportunidad para documentar, recoger y archivar datos y cualquier otra información utilizada o recogida. Unos buenos informes, bien documentados con un buen acompañamiento de archivos de datos y referencias son una buena inversión de futuro.

5 Lecciones aprendidas

Los trabajos de instrumentación en los tres edificios instrumentados en POCRISC, han comportado la realización de campañas temporales. En este apartado se revisan los principales trabajos efectuados y resultados obtenidos que están en relación directa con las lecciones aprendidas. A partir de aquí y, teniendo en cuenta los aspectos tratados en las secciones anteriores, se propondrán, en la sección siguiente, unas pocas recomendaciones que puedan servir de ayuda en trabajos de instrumentación de edificios.

En todos los edificios se siguieron diversos aspectos de las etapas descritas en la sección anterior. En los edificios Instrumentados en Andorra y en España se siguieron protocolos de instrumentación y se adoptaron configuraciones compatibles con las descritas más arriba en la sección 3. Básicamente se siguió un criterio en base al conocimiento experto y a la experiencia del ICGC, en la instalación y mantenimiento de redes de acelerómetros para la vigilancia sísmica en Cataluña. En el edificio instrumentado en Francia, también en base a criterio experto, se siguió un esquema de instrumentación distinto, con registros de duración más corta y con varias configuraciones geométricas, para capturar mejor los modos de vibración y la vibración de elementos masivos rígidos, como, por ejemplo, la sección de escaleras. Se resumen a continuación las características de los tres edificios, de las instrumentaciones realizadas, y de los resultados obtenidos.

Edificio de Andorra: edificio Prat del Rull

Construido el año 2013, el edificio tiene dos pisos subterráneos y 6 sobre rasante. Los pisos subterráneos tienen muros de hormigón, pilares y vigas; los pisos sobre rasante tienen vigas y columnas de metal. El edificio es de una complejidad alta, con irregularidad en planta y edificios contiguos. Para más detalles véase también el Capítulo 3 y el Anexo I del informe sobre los edificios instrumentados (Pujades et al. 2021).

Instrumentación y modelado

- Se dispuso de documentación muy detallada, de acceso al edificio, en su totalidad, y de ayuda en las visitas y actividades de instrumentación.
- ICGC se responsabilizó de la instalación de los acelerógrafos y del control y registro de los datos.
- Se instalaron 7 acelerómetros triaxiales. 3 en la planta superior, la planta sexta, dos en la planta 4 y uno en las plantas segunda y baja.
- Los sensores se situaron en esquinas, cerca de los muros y pilares exteriores.
- Los sensores de las plantas 2 y 4 se alinearon, verticalmente con uno de los sensores de la planta superior.
- Los sensores horizontales se orientaron en las direcciones larga, longitudinal HN1 y corta, transversal HN2, del edificio. HNZ corresponde a la componente vertical.
- Se efectuaron, medidas sincronizadas, registrando señal de tiempo universal.
- Los sensores disponen también de conexión a la red.

- Una vez finalizados los trabajos, los datos se pusieron a disposición de los socios del proyecto y se alojaron también en un repositorio de libre acceso.
- ENIT realizó un modelado detallado del edificio. Aunque el modelo del edificio se realizó con posterioridad a la instrumentación.
- UPC y ENIT realizaron análisis detallados de las series temporales.

Análisis y resultados

Se realizaron análisis y tratamiento de las largas series temporales registradas, tanto en el dominio del tiempo como el de la frecuencia. Los resultados en el dominio de la frecuencia se contrastaron con los modelos numéricos. Se presenta a continuación los principales resultados obtenidos.

En referencia a los análisis en el dominio del tiempo:

- Se aplicaron técnicas estándar de análisis y tratamiento de señales para eliminar distorsiones de la línea base, eliminar puntos atípicos (outliers) y se filtró la señal con filtros paso-banda, entre 1 y 10 Hz, rango frecuencial en el que se hallan las frecuencias propias del edificio.
- El análisis de la variación de la amplitud cuadrática media, permitió observar variaciones de la intensidad del ruido en función de la actividad/actividades en el interior del edificio y también los incrementos de la actividad exterior, cercana al edificio.
- La doble integración de las acelerogramas permitió cuantificar la magnitud de los desplazamientos que son extraordinariamente pequeños.
- El filtrado, de banda muy estrecha, de los desplazigramas permitió observar cómo los desplazamientos modales son del orden de décimas de micra.
- El estudio del movimiento de partícula, odogramas², permitió evaluar y confirmar el carácter de translación o torsión de los modos identificados.

En referencia a los análisis en el dominio de la frecuencia,

- El análisis frecuencial se realizó mediante la densidad espectral de potencia, PSD, que fue suficiente para identificar los principales modos de vibración del edificio.
- Fue muy importante el análisis comparativo de las PSD's en las tres componentes para identificar los modos de translación y de torsión.
- El análisis de la variación temporal de las densidades espectrales de potencia, espectrogramas fue revelador, en el sentido que permitió, por una parte, observar una muy buena estabilidad de los periodos, independientemente de los niveles de excitación, y, por otra, observar pequeñas oscilaciones diurnas y nocturnas, que se atribuyen a variaciones en la carga y en la temperatura.

En referencia al modelado estructural,

- El modelado permite tener una idea de los modos, pero las frecuencias modales suelen diferir de las experimentales.
- Los resultados de la identificación modal experimental son fundamentales para la calibración del modelo numérico de forma que haya acuerdo CMA-OMA.

² Véase significado de odograma en el [Glosario sísmico](#).

- Un ejercicio de análisis dinámico no lineal ha permitido estimar la variación del período con el daño. Se ha observado que, para este edificio, cambios del 5% o superiores en el periodo, son indicadores de daño significativo.

Edificio de España: Instituto-Escuela *Santa Eugènia*

El grupo escolar del Instituto Santa Eugènia está constituido por un conjunto de edificios de diferentes alturas y configuraciones arquitectónicas. El edificio analizado es de hormigón armado con muros y pórticos. El edificio tiene una planta baja, tres pisos y una cubierta accesible. Para más detalles véase también el Capítulo 4 y Anexo II del informe sobre los edificios instrumentados (Pujades et al. 2021).

Instrumentación y modelado

- El arquitecto Antoni Blázquez proporcionó documentación arquitectónica y constructiva muy detallada del edificio.
- La administración del centro facilitó el acceso al edificio y ayudó en las actividades de instrumentación.
- ICGC se responsabilizó de la instalación de los acelerógrafos y del control y registro de los datos.
- Se instalaron 7 acelerómetros triaxiales. Uno en la planta baja, uno en cada piso, y uno, a nivel de suelo, en un edificio cercano que alberga el taller de prácticas de obra civil. Estos cinco instrumentos estuvieron registrando 8 días. El último día se efectuaron medidas en la cubierta del edificio instrumentado con dos acelerómetros. También se hicieron medidas de soporte a las medidas RAR.
- Los sensores del edificio se situaron en los departamentos de Idiomas, Castellano, Matemáticas y Obra civil, respectivamente en las plantas baja, 1, 2 y 3. Siempre buscando esquinas, cerca de pilares y ventanas para instalar las antenas GNSS.
- Los sensores horizontales se orientaron en las direcciones larga, longitudinal HN1 y corta, transversal HN2, del edificio. HNZ corresponde a la componente vertical.
- Se efectuaron, medidas sincronizadas, registrando señal de tiempo universal.
- Los sensores disponen también de conexión a la red.
- Una vez finalizados los trabajos, los datos se pusieron a disposición de los socios del proyecto y se alojaron también en un repositorio de libre acceso.
- UPC realizó un modelado detallado del edificio. Aunque el modelado del edificio se realizó con posterioridad a la instrumentación.
- UPC realizó análisis detallados de las series temporales.

Análisis y resultados

Se realizaron análisis y tratamiento de las largas series temporales registradas, tanto en el dominio del tiempo, como el de la frecuencia. Los resultados en el dominio de la frecuencia se contrastaron con los modelos numéricos. Se resumen a continuación los principales resultados obtenidos.

En referencia a los análisis en el dominio del tiempo y de la frecuencia, se aplicaron los mismos procedimientos descritos más arriba para el edificio de Andorra.

En referencia al modelado estructural,

- Se usó un modelo de macroelementos para el análisis estructural computacional
- Se confirmó, que el modelado permite tener una idea de los modos, pero las frecuencias modales suelen diferir de las experimentales.
- Se constató la importancia que tiene considerar los elementos no estructurales. Modelos simplificados, que consideran sólo pilares y forjados, se alejan mucho de los resultados del OMA.
- Los resultados de la identificación modal experimental son fundamentales para la calibración del modelo numérico, de forma que haya acuerdo CMA-OMA
- Se aplicó el análisis estático no lineal, *pushover analysis*. Las curvas de capacidad en las direcciones HN1 y HN2, muestran un buen acuerdo con las frecuencias modales identificadas. Además, permiten hacerse una idea de cómo va a variar el periodo con el daño.

En referencia a medidas con radar de apertura real, el último día de la campaña de medidas, se efectuaron medidas radar de apertura real (RAR) desde diferentes posiciones. El análisis de los registros puso de manifiesto las limitaciones del radar para medidas dinámicas de desplazamientos de edificios rígidos. Las amplitudes de vibración bajo ruido ambiental de edificios rígidos, con altas frecuencias modales, quedan por debajo de la capacidad de resolución del equipo. No así para edificios altos y dúctiles y para otras estructuras civiles, con periodos largos.

Edificio de Francia. Hospital de Bagnères de Bigorre

El edificio es el bloque número 6, del complejo hospitalario de Bagnères de Bigorre. El edificio, construido en 1967, es de pórticos de hormigón armado con planta baja y 4 pisos. En el bloque central hay muros verticales de hormigón armado y hay también un subterráneo con una planta más reducida. Para más detalles véase también el Capítulo 5 y Anexos III y IV del informe sobre los edificios instrumentados (Pujades et al. 2021).

Instrumentación y modelado

- Personal de la administración del hospital, J-P. Andry, y C. Pécastaign, facilitaron el acceso al edificio y las actividades de instrumentación.
- BRGM y ENIT se responsabilizaron de la instrumentación registro y análisis de los datos.
- Se usaron velocímetros Güralp (BRGM) y acelerómetros PCB (ENIT) que, mayoritariamente, se instalaron en el interior del edificio en diferentes configuraciones. Otros sensores se instalaron en el exterior, para poder resaltar la respuesta estructural mediante razones espectrales.
- También se efectuaron medidas con radar interferométrico, con tres configuraciones, para capturar los principales modos de vibración.
- Para las medidas con velocímetros se usaron 3 configuraciones.
 - En la primera se instalaron 8 sensores en la cuarta planta, uno en la planta baja, a nivel del suelo, uno en el piso subterráneo y uno, en el exterior del edificio, pero cercano y a nivel de suelo.

- En la segunda configuración se instalaron 13 sensores. 5 en el bloque izquierdo, uno en cada planta, 5 en el bloque central, también uno en cada planta, dos en la zona irregular del bloque central, uno arriba y uno abajo y uno en el suelo en el exterior del edificio.
 - En la tercera configuración, en el cuarto piso, se instalaron 5 sensores en el bloque de la derecha y 3 en el bloque central y en la irregularidad. En el primer piso se instalaron 2 sensores, y dos sensores más se instalaron en la planta baja, a nivel del suelo, dentro del edificio, y uno en el suelo en el exterior del edificio.
 - Para cada configuración los datos se registraban en una unidad central de control y los registros tuvieron duraciones de entre una y 2 horas, aproximadamente.
 - Los sensores horizontales se orientaron en las direcciones longitudinal y transversal, del edificio.
- Los acelerómetros, se colocaron en el hueco de la escalera central del edificio, en varios pisos (1°, 2°, 3° y 4° piso). Esta configuración permite estudiar el comportamiento dinámico de la parte central del edificio.
 - Una vez finalizados los trabajos, los datos se pusieron a disposición de los socios.
 - BRGM y ENIT realizaron los análisis de las series temporales.

Análisis y resultados

Se realizaron análisis y tratamiento de las series temporales registradas, en el dominio de la frecuencia. ENIT y BRGM hicieron modelos numéricos y los resultados, se contrastaron con los resultados del OMA. Se resumen a continuación los principales resultados obtenidos.

En referencia a los análisis en el dominio de la frecuencia,

- El análisis frecuencial se realizó mediante la transformada de Fourier, y espectros de respuesta, separando las componentes longitudinal y transversal.
- Se usaron también las razones espectrales
- Los sensores de velocidad aportan una buena información sobre los principales modos y se obtiene buena consistencia entre los resultados de las mediciones de velocidad y los obtenidos a partir de los datos de aceleración.
- Se observa una buena consistencia entre las frecuencias identificadas con espectros de Fourier y las identificadas a partir de las razones espectrales arriba/abajo.
- En los cocientes espectrales entre espectros de respuesta, aparecen picos en altas frecuencias que no aparecen ni en los espectros de Fourier, ni en los cocientes espectrales entre espectros de Fourier.

En referencia al modelado estructural,

- Es importante incorporar al modelado estructural todos los elementos del edificio. Hay que perseguir la máxima semejanza entre el modelo y el edificio.
- Con todo, los resultados de la identificación modal experimental son fundamentales para la calibración de los modelos numéricos de forma que haya acuerdo CMA-OMA

- Al igual que con el edificio de Andorra, ejercicios de análisis dinámico no lineal han permitido estimar la variación del período con el daño. Se han podido observar cambios significativos en el periodo con la aparición y progreso del daño.

En referencia a las medidas a distancia, de nuevo las extraordinariamente bajas amplitudes de vibración no permitieron explotar los datos RAR.

6 Recomendaciones para la instrumentación

En base a la experiencia de los trabajos realizados, se proponen aquí, recomendaciones, con la intención de que puedan ser de utilidad en futuros trabajos de instrumentación de edificios. Se supone que no se trata de una instrumentación permanente, sino que, como las efectuadas en POCRISC, tiene un horizonte temporal breve. Nos ha parecido interesante agrupar estas recomendaciones en tres aparados: 1) Antes, 2) Durante y 3) Después de la instrumentación

Antes de instrumentar

- Defina con claridad el objetivo de la instrumentación.
- Visite el edificio y genere la complicidad y e interés de los propietarios, gestores y administradores del edificio. Los responsables del mantenimiento pueden aportar valiosa información sobre los lugares y puntos óptimos donde instalar los sensores. También suelen ser conocedores de los puntos débiles del edificio.
- Recopile toda la información relativa al edificio, incluyendo la información constructiva y sobre su función.
- En base a los objetivos, considere si necesita instrumentar con uno o varios sensores.
- Es aconsejable realizar el CMD, antes de instrumentar el edificio.
- En su caso, adoptar una configuración de sensores en base a los resultados del CMA. Unas geometrías horizontal y vertical adecuadas, facilitarán la interpretación del OMA.
- El criterio experto puede suplir cuando no se dispone de información estructural del edificio.
- Elija la instrumentación y elabore un protocolo de actuación, lo más detallado posible y prepare, cuidadosamente, los materiales necesarios.
- Es importante controlar el intervalo de muestreo, el ancho de banda, el rango dinámico y la sensibilidad de los instrumentos. Frecuencias de muestreo excesivamente altas repercuten negativamente, y de forma innecesaria y engorrosa, en las necesidades de almacenamiento y en la duración de los análisis. Una frecuencia de 100 Hz puede ser suficiente.
- Preferentemente, elija puntos en zonas con poca o nula actividad. Frecuentemente hay habitáculos pequeños, cuyo uso es escaso o nulo y que pueden ser de utilidad.
- Busque siempre puntos en los que el sensor capture bien la vibración estructural. Suele aconsejarse situarse en puntos cercanos pilares, o, en su caso, cercanos a muros de carga. Otro aspecto frecuente cuando se instrumenta con varios equipos, conectados a una unidad central, es el cableado.

- Comunique y discuta con los gestores del edificio la planificación y decida, cuidadosamente los puntos físicos concretos para su instalación, teniendo en cuenta, las necesidades de conexiones a las redes eléctrica y de datos y, cuando sea el caso, de las antenas u otros dispositivos que permitan la sincronización.
- Procure que el personal de servicio del edificio y, en su caso los usuarios, estén informados de la instrumentación y de las medidas.
- En cualquier caso, prepare carteles indicadores de los equipos con señales de advertencia sobre la necesidad de no transitar cerca de ellos.

Durante la instrumentación

- Instale cada instrumento, eligiendo la orientación más adecuada de los sensores. Normalmente se aconseja orientar las componentes horizontales en las direcciones larga, longitudinal, y corta, transversal.
- Antes de proceder al registro definitivo, verifique el correcto funcionamiento del equipo y controle que se está registrando la vibración estructural.
- En mediciones de larga duración, y en la medida de lo posible:
 - Efectúe un OMA expedito usando los primeros minutos de registro.
 - Establezca mecanismos de aviso o alarma en caso de un malfuncionamiento del equipo.

Después de la instrumentación

- Recoja cuidadosamente los equipos y anote cualquier incidencia, interrupción o incidencia que haya podido ocurrir durante la instrumentación.
- Verifique la completitud y la integridad de los registros.
- Antes de proceder a los análisis, archive los datos y haga copias de seguridad.

7 Recomendaciones para el análisis de las señales

Aunque existe un importante abanico de recursos de análisis y tratamiento de señales, apuntamos aquí algunas que nos han resultado particularmente útiles para los objetivos de POCRISC, en los análisis en los dominios del tiempo y de la frecuencia.

Dominio del tiempo

Se destacan aquí dos aspectos que consideramos de interés, referente al análisis en el dominio del tiempo: la intensidad de la excitación y el movimiento de partícula.

Intensidad de la excitación

En medidas de larga duración, como las que se han realizado en los edificios de Andorra y España, ha resultado interesante y útil el análisis de la variación temporal de la amplitud cuadrática media. Ello permite observar los niveles de excitación del edificio en función de la actividad en el edificio, identificar horas críticas como pueden ser el inicio y final de actividades e, incluso, cambios puntuales de actividad. Obviamente, también permite observar las variaciones en jornadas festivas y laborales y entre periodos diurnos y nocturnos. La Figura 4. muestra ejemplos de la variación temporal de la intensidad de vibración.

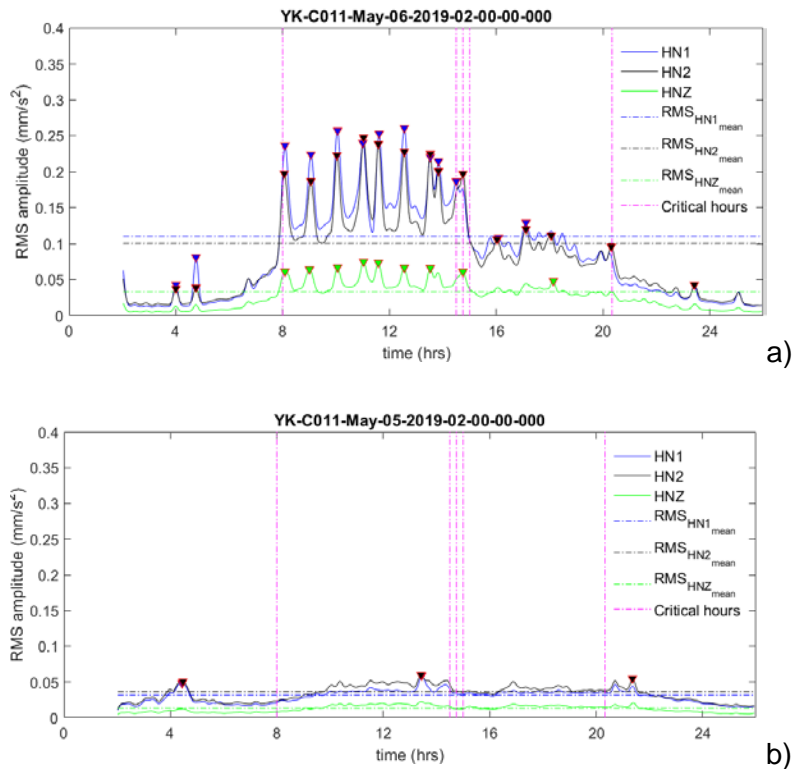


Figura 4. Variación de los niveles de ruido a lo largo del día. a) un lunes, día lectivo y, b) un domingo día festivo. Los tiempos corresponden a la hora local.

Lo picos de la Figura 4.a corresponden los cambios de aula de los estudiantes del centro, aproximadamente cada hora. Otro beneficio de este análisis es observar la sensibilidad del OMA a la intensidad de la excitación.

Movimiento de partícula

Otro aspecto interesante y recomendable, dadas las capacidades de los programas de análisis y tratamiento de señales temporales, es el análisis del movimiento de partícula. La Figura 5 muestra un ejemplo de este tipo de análisis.

Dominio de la frecuencia

Tres aspectos se analizan aquí, relacionados con: i) los cocientes espectrales, ii) la densidad espectral de potencia y iii) los espectrogramas.

Razones espectrales

Las razones espectrales, han demostrado ser útiles en la caracterización de suelos en campo libre. Sin embargo, en entornos urbanos, los fenómenos de interacción suelo-estructura-suelo e, incluso, los de interacción suelo-ciudad, complican la interpretación de los cocientes espectrales. Estos fenómenos de interacción pueden fortalecer frecuencias propias de edificios cercanos o debilitar frecuencias propias del edificio. También es cierto que estos cocientes espectrales pueden filtrar correctamente señales procedentes de excitaciones debidas, por ejemplo, a maquinarias o equipos mecánicos operando dentro o cerca del edificio, pues éstas predominan en la componente vertical y, claramente, no son del edificio. Otro aspecto que puede complicar la interpretación de los cocientes espectrales es la interacción entre edificios contiguos acoplados. Hemos visto casos en los que la vibración horizontal de

un edificio relativamente bajo se transmitía a la componente vertical del edificio contiguo más alto, y viceversa. Los cocientes espectrales, pueden interferir negativamente en la interpretación de estos fenómenos de interacción estructura-estructura. En cualquier caso, si se usan razones espectrales, es recomendable y conveniente tomar precauciones en su interpretación.

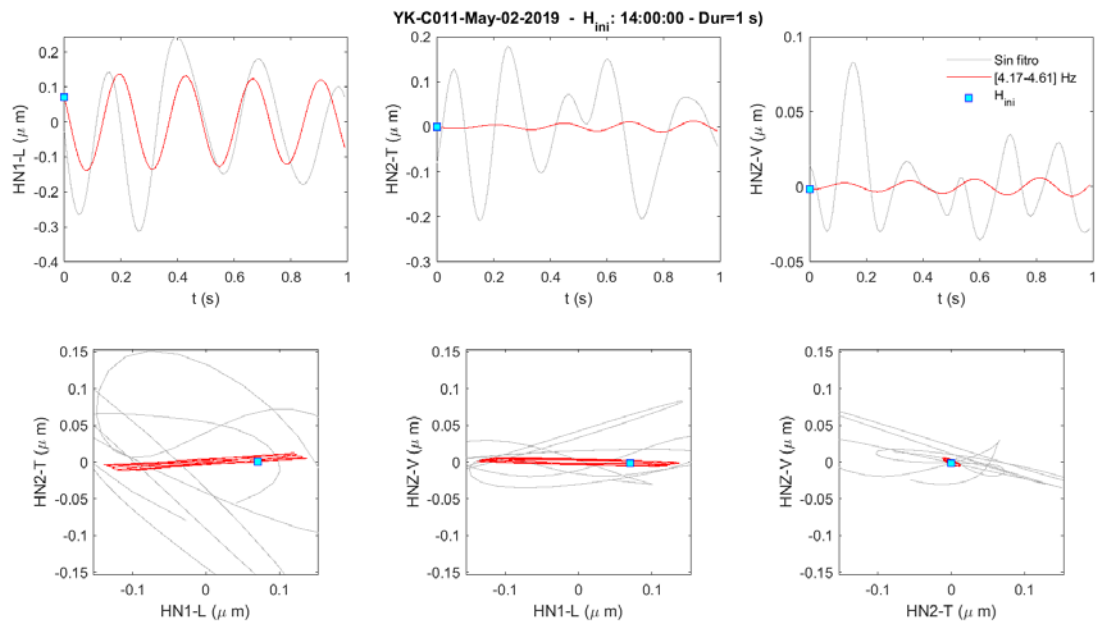


Figura 5. Movimiento de partícula, durante un segundo, para un periodo de 0.23 s. Se observa cómo se trata de un modo de traslación en la dirección longitudinal (HN1). La señal se ha obtenido mediante un filtrado en la banda 4.17-4.61 Hz.

La densidad espectral de Potencia (PSD)

A pesar de que el ruido ambiental puede considerarse una señal estacionaria de energía infinita, para las que parece preferible analizar la densidad espectral de potencia, también es cierto que la transformada de Fourier produce buenos resultados para identificar las frecuencias modales. Menos usados en la literatura referente al OMA, son los espectros de respuesta. De nuestra experiencia en el proyecto, nuestra recomendación es usar la PSD. Si además se usan algoritmos de promedios de resultados en ventanas móviles, la técnica se robustece al aportar promedios ponderados de resultados. En los casos de los edificios de Andorra y Gerona se dispuso de señales de duración de más de 7 días. La Figura 6 muestra un ejemplo de resultados obtenidos en el edificio de Prat de Rull en Andorra.

Existen muchas herramientas para el OMA, incluyendo programas comerciales y técnicas de análisis y tratamiento de señales. El apilamiento de señales, el análisis de correlación cruzada y de coherencia, entre otros, son recursos para el OMA. Frecuentemente puede ser recomendable su uso, para aumentar la fiabilidad y robustez de los resultados obtenidos.

Los espectrogramas

Los espectrogramas son una representación visual de la evolución temporal del espectro de frecuencias o, en su caso, de la densidad espectral de potencia, PSD. Son gráficos tridimensionales cuyos ejes de referencia son, la frecuencia, el tiempo y la amplitud espectral.

Para cada instante de tiempo, t_0 , se plotea la PSD media de una ventana temporal centrada en este instante.

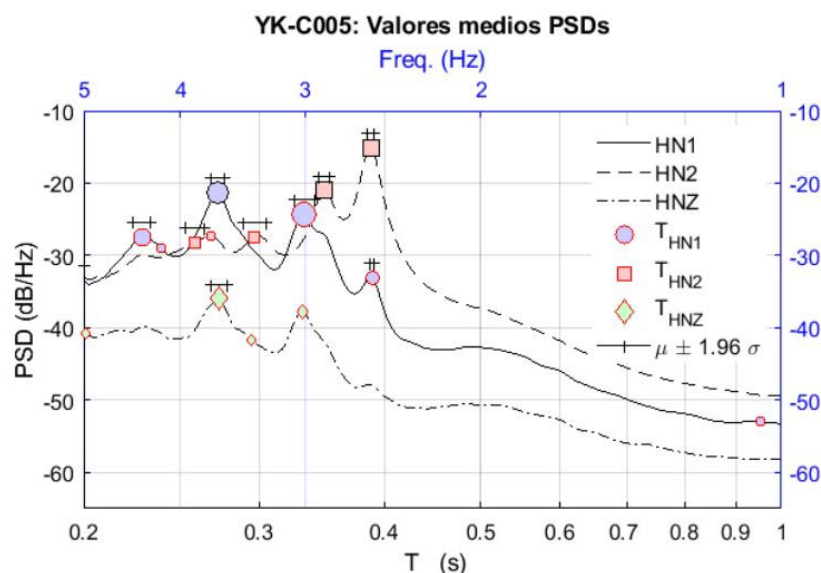


Figura 6. Ejemplo de PSD's medias y síntesis de las frecuencias modales detectadas, en el rango de periodos entre 0.2 y 1 s.

Así, el espectrograma permite observar variaciones temporales del contenido frecuencial de señales temporales y, del mismo modo, también permite verificar su estabilidad. En los edificios de Andorra y España, los espectrogramas para periodos de 24 horas han permitido observar, por una parte, una buena estabilidad de las frecuencias modales y, por otra, también, pequeñas variaciones que se ha atribuido a cambios en la carga del edificio, durante los momentos de máxima ocupación, y a disminuciones significativas de la temperatura ambiente, en periodos nocturnos. La Figura 7 a) muestra un ejemplo de espectrograma en el Instituto Santa Eugènia. La Figura 7 b) muestra una ampliación en el rango de periodos entre 0.2 y 0.3 s.

De nuestra experiencia es recomendable hallar y analizar los espectrogramas. Además, por ejemplo, en casos de programas de monitorización continua de edificios, se pueden establecer umbrales de variación de los periodos y disponer algoritmos comparativos que permitan detectar cuándo éstos se alcanzan y, en su caso, establecer avisos o alarmas.

8 Conclusiones

La instrumentación de edificios en zonas sísmicas, en general, y del OMA, en particular aporta información valiosa sobre las formas de vibrar de los edificios. Las medidas de los periodos propios son robustas, estables y fiables. También son de una sensibilidad extraordinaria, y, por ende, tienen capacidad para detectar variaciones en las formas y frecuencias modales. Con todo, la relación directa o indirecta con el daño, es de una importante complejidad. Parece claro que el daño comporta un incremento en el periodo modal, pero es incierto establecer la relación inversa entre la variación del periodo y el daño.

Murià-Vila y González-Alcorta (1995) presentan un interesante trabajo sobre las propiedades dinámicas de 60 edificios instrumentados en la ciudad de México, medidas entre 1986 y 1994.

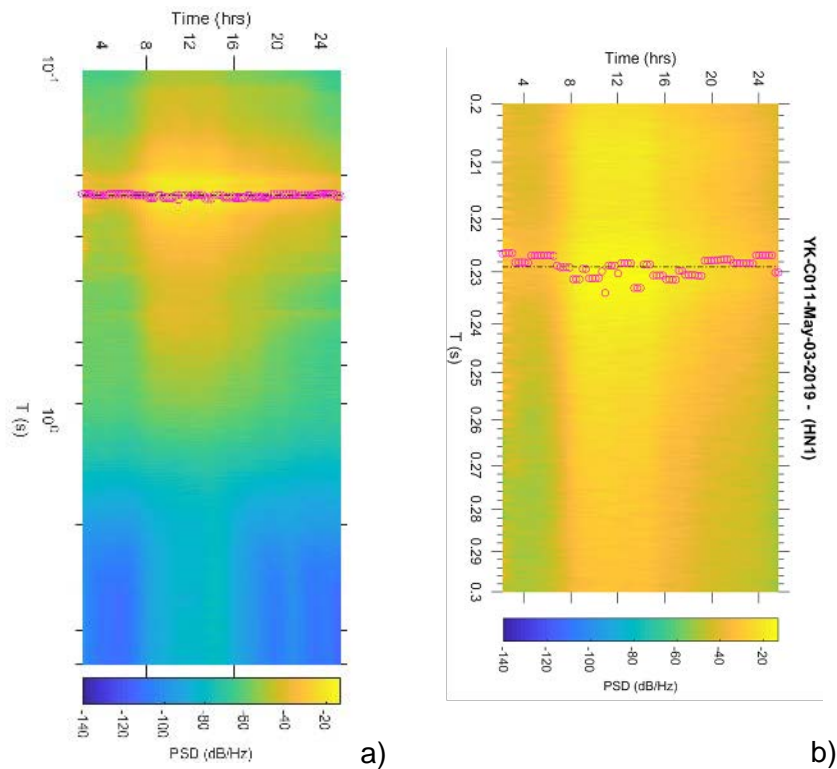


Figura 7. a) Ejemplo de espectrograma. b) Focalización en los periodos entre 0.2 y 0.3 s

Los resultados muestran cómo los periodos naturales de vibración, dependen, no solo de los sistemas estructurales, sino que son sensibles también a las características de los suelos. Por otra parte, Espinoza-Barreras (1999) realiza un estudio de la viabilidad del uso de ruido ambiental para la determinación de las características dinámicas de estructuras existentes, con especial énfasis en zonas urbanas y en áreas de peligrosidad sísmica entre moderada y baja.

Aunque el trabajo de Espinoza-Barreras se orienta hacia la calibración y propuesta de formulas empíricas para la estimación expedita del periodo fundamental de edificios, contiene un estudio experimental, de la variación del periodo fundamental de un edificio de 8 niveles, 4 de ellos bajo rasante, con estructura de columnas y losas de hormigón armado. En este trabajo, estudia las diferencias entre los periodos propios de la estructura desnuda, columnas y forjados, y los del edificio finalizado, incorporando los elementos no estrictamente estructurales, como, por ejemplo, cerramientos exteriores, geometría y tabiquería de las distribuciones interiores. Estas variaciones llegan a ser del 33% en la dirección transversal y del 40% en la longitudinal, poniendo de manifiesto la importancia y la necesidad de incorporar estos detalles constructivos en los modelos numéricos estructurales. Ello le lleva también a atribuir las dispersiones importantes existentes en las fórmulas empíricas, a la incertidumbre epistémica que conlleva la no inclusión de esta información en los datos experimentales; edificios estructuralmente idénticos pueden tener periodos muy distintos para diferentes distribuciones de sus elementos no estructurales.

Por su fuerte acuerdo con las conclusiones de los trabajos de instrumentación realizados, reproducimos aquí, casi textualmente, las principales conclusiones de los trabajos de Murià-Vila y González-Alcorta (1995) y las de Espinoza-Barreras (1999).

Conclusiones de Murià-Vila y González-Alcorta (1995)

- El análisis espectral de datos de vibración ambiental, permiten determinar las frecuencias naturales y formas modales. Con todo, conviene no limitarse a las densidades espectrales y usar también, funciones de transferencia y de coherencia. Cuando se trata con oscilaciones forzadas, los picos de las densidades espectrales pueden no corresponder a modos propios de la estructura.
- En edificios rígidos desplantados en suelos blandos el análisis de vibración ambiental se mostró insuficiente para determinar las frecuencias modales.
- El OMA puede proporcionar información valiosa para edificios donde existan mediciones antes y después de un sismo severo o de una reestructuración, para calibrar modelos matemáticos y para analizar la influencia de la interacción suelo-estructura en las propiedades dinámicas de un edificio.
- Las variaciones en las frecuencias naturales, debidas a un sismo, dependen, de forma significativa, del tipo de estructuración, por lo que, para establecer un criterio entre el daño estructural y el porcentaje de reducción de las frecuencias naturales, éste debe hacerse en función de las características estructurales.
- Las correlaciones entre las propiedades dinámicas obtenidas de los modelos matemáticos elásticos y los valores experimentales, muestran que se puede lograr una adecuada concordancia, siempre y cuando se consideren todos los elementos estructurales y los llamados no estructurales, los cuales contribuyen significativamente en la masa y rigidez de la estructura, así como los efectos de la interacción suelo-estructura, en aquellos edificios desplantados en suelos blandos.

Conclusiones de Espinoza-Barreras (1999)

- Las frecuencias modales son muy sensibles a la incorporación, supresión, de elementos no estructurales.
- La contribución de los elementos no estructurales a las frecuencias modales es muy significativa, pudiendo introducir variaciones de hasta el 40%, con respecto a las frecuencias propias de la estructura desnuda. Las frecuencias propias aumentan debido, sustancialmente, al aumento de rigidez.
- Particularmente relevante es la contribución a la rigidez y, en consecuencia, a la frecuencia fundamental, de los muros exteriores de cortante. Su fallo, en caso de sismo, puede ser responsable de variaciones significativas en el periodo.
- Los métodos basados en cocientes espectrales entre las señales arriba y abajo del edificio, son menos fiables debido a que para excitaciones débiles, la señal en la base puede no representar la entrada del sistema. En este sentido, para excitaciones débiles, las funciones de coherencia muestran valores muy bajos, indicando que las funciones de transferencia, calculadas por métodos tradicionales, tienen poca fiabilidad.
- Así, se concluye que, para la estimación de periodos propios de edificios utilizando ruido ambiental, es suficiente, más conveniente y confiable, usar sólo el espectro de la señal registrada en la parte superior del edificio.
- Es importante tener en mente los efectos que introduce la interacción suelo-estructura en este tipo de estudios. La introducción y consideración de estos efectos, sobre todo en suelos blandos, puede ayudar a mejorar el acuerdo entre los resultados experimentales y del modelado estructural.

Reflexión final

El OMA aplicado a edificios esenciales y a edificios residenciales identifica bien los principales modos de vibración y es altamente sensible a variaciones en las frecuencias. Por ello se considera una herramienta excelente para detectar pequeñas variaciones. La relación de estas variaciones con el daño es más compleja, tanto más si se persigue identificar qué elementos se han dañado. Ello nos indica que se necesita más trabajo y más investigación. Con todo, podemos pensar, en un futuro no lejano, en el cual tengamos herramientas de diagnóstico particularizadas a cada edificio, de forma que cuando se construya, o se inicie su monitorización, se disponga de elementos que permitan identificar el nivel de daño global y, quizás incluso, conocer los elementos más probablemente dañados, en función de los periodos, transversal, longitudinal y torsional, que se hayan incrementado. Probablemente, se requerirá la sinergia y convergencia de trabajos experimentales y de simulación numérica para establecer estos criterios. Las técnicas de medición dinámica de desplazamientos a distancia, con radar en este caso, en edificios con frecuencias propias bajas, también requieren más desarrollo, pero, ya ahora, se muestra como una técnica con un importante potencial, rápida, expedita y poderosa, para construcciones y edificios con periodos largos.

Referencias

- ACHE (2020) Proyecto de estructuras de hormigón en zona sísmica. Monografía M35. Edita ACHE (Asociación española de Ingeniería estructural). ISBN. 978-84-89670-89-1. 446 pp.
- Andersen P (1997) Identification of Civil Engineering Structures using Vector ARMA Models. PhD Thesis. Aalborg University Department of Building Technology and Structural Engineering. Denmark. 258 pp
<https://vbn.aau.dk/en/publications/identification-of-civil-engineering-structures-using-vector-arma-3>
- Borman P, Wielandt E (2013). Seismic signals and noise. 62 pp. Chapter 4 in: Bormann, P. (Ed.) (2013): New Manual of Seismological Observatory Practice (NMSOP-2), Potsdam: Deutsches GeoForschungszentrum GFZ; IASPEI. <https://doi.org/10.2312/GFZ.NMSOP-2>.
https://gfzpublic.gfz-potsdam.de/pubman/item/item_245421.
- Brigham EO (1974). The Fast Fourier Transform. Prentice Hall Inc. 252 pp.
- Brincker R, Ventura C (2015) Introduction to Operational Modal Analysis. Wiley ISBN: 978-1-119-96315-8. 372 pp.
- Çelebi M (2000) Seismic Instrumentation of Buildings: USGS Open-File Report 2000-157. 37 pp.
<https://pubs.usgs.gov/of/2000/0157/pdf/of00-157.pdf>
- Çelebi M (2002) Seismic instrumentation of buildings (with emphasis on federal buildings). SPECIAL GSA/USGS PROJECT. An administrative report. 52 pp. General Services Administration (GSA). <https://tdg.com.tr/files/tr/bilgi-merkezi/bilimsel-referanslar/SEISMIC%20INSTRUMENTATION%20OF%20BUILDINGS-M.Celebi.pdf>
- Çelebi M (2006) Recorded Earthquake Responses from the Integrated Seismic Monitoring Network of the Atwood Building, Anchorage, Alaska. Earthquake Spectra, Volume 22-4, 847–864,
<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.73.9928&rep=rep1&type=pdf>
- Çelebi M, Ghahari SF, Taciroğlu E (2016) Significance of Beating Effects Observed in Earthquake Responses of Two Tall Buildings. 9 pp. ATC-15-15: 16th U.S.-Japan-New Zealand Workshop on the Improvement of Structural Engineering and Resiliency.
<https://www.atcouncil.org/docman/atc-15-15-papers/97-atc-15-15-celebi-2016-06-03/file>
<https://www.atcouncil.org/atc-15-15-w-presentations>
- Çelebi M, Safak E, Brady G, Maley R, Sotoudeh V (1987), Integrated instrumentation plan for assessing the seismic response of structures--a review of the current USGS program, USGS Circular 947. <https://pubs.usgs.gov/circ/1987/0947/report.pdf>
- Cooley JW, Tukey JW (1965) "An algorithm for the machine computation of the complex Fourier series," Mathematics of Computation, vol. 19, pp. 297–301, Apr. 1965.
- Chopra A K (2019). Dynamics of structures: Theory and applications to earthquake engineering. Fifth edition. Upper Saddle River, N.J: Pearson/Prentice Hall. 942 pp.. ISBN-10: 9780134555126, ISBN-13: 978-0134555126
- Entezami A (2021) An Introduction to Structural Health Monitoring. In: Structural Health Monitoring by Time Series Analysis and Statistical Distance Measures. SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-66259-2_1
- Espinoza-Barreras F. (1999) Determinación de características dinámicas de estructuras. Memoria de la tesis doctoral. Escuela técnica superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad politécnica de Cataluña 170 pp. <http://hdl.handle.net/10803/6221>
- Farrar CR, Worden K (2006) Introduction to structural health monitoring. Phil. Trans. R. Soc. A (2007) 365, 303–315. doi:10.1098/rsta.2006.1928. Published online 12 December 2006
- FEMA (2020) Building Codes Save: A nationwide study. Losses avoided as a result of adopting hazard resistant building codes. 189 pp.
https://www.fema.gov/sites/default/files/2020-11/fema_building_codes_save_study.pdf

- Ghalishooyan, M.; Shoostari (May 12–14, 2015). Operational Modal Analysis Techniques and Their Theoretical and Practical Aspects: A Comprehensive Review and Introduction. 5th International Operational Modal Analysis Conference (IOMAC 2015). Gijon, Spain.
- IBC (2017) 2018 International Building Code. International Code Council, INC. 757pp. <https://www.ci.independence.mo.us/userdocs/ComDev/2018%20INTL%20BUILDING%20C ODE.pdf>
- ICC (2021) 2021 significant changes to the International Building Code. (first version; Nov 2020). International Code Council. <https://codes.iccsafe.org/content/IBC2021SCP1>. <https://codes.iccsafe.org/>
- Ljung L. (1987) System identification – Theory for the User: Prentice-Hall, 519 p.
- Math Works (2019) The Math Works, Inc., MATLAB, versión 2019b (Natick, MA: The Math Works, Inc., 2019), <https://www.mathworks.com/>
- Muriá-Vila D. y González A. R., 1995. Propiedades Dinámicas de Edificios de la Ciudad de México. Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México. <https://www.smis.mx/index.php/RIS/article/view/261/196>
- Ondrej K (2019) Modal analysis. <https://wiki.csiamerica.com/display/kb/Modal+analysis>. CSI Knowledge Base.
- Oppenheim AV, Schaffer RW (1999) Discrete time signal processing. Prentice Hall. ISBN: 0-13-754920-2. 893 pp.
- Papoulis A (1962). The Fourier integral and its applications. McGraw-Hill Book Company, Inc. 317 pp.
- Proakis JG, Manolakis DG (2007) Tratamiento digital de señales. Principios, algoritmos y aplicaciones. Cuarta edición. Pearson-Prentice Hall. 996 pp. ISBN: 978-84-8322-347-5
- Pujades LG (2020) La instrumentación sísmica. Cap. 5 en Temas de Sismología e Ingeniería sísmica. 46 pp. Apuntes docentes no publicados. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Pujades LG, Lantada N, González-Drigo R, Blázquez A, Meza K (2021) Guía para la evaluación de la vulnerabilidad Sísmica. Documento E4.2.1. Proyecto. EFA158/16/POCRISC. 142 pp)
- Roca A (1996) Instrumentación sísmica. Apuntes docentes. Master en Ingeniería sísmica y dinámica estructural. Documento no publicado.
- Rojahn C, Matthiesen RB (1977) Earthquake response and instrumentation of buildings: Journal of the Technical Councils, American Society of Civil Engineers, v. 103, no. TCI, Proceedings Paper 13393, p. 1-12. <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/JTCAD9.0000001>
- ROPH (2015) Guidelines and implementing rules on earthquake recording instrumentation for buildings. Republic of the Philippines (ROPH). Department of public works and highway
- Severn RT (2010) The development of shaking tables—A historical note. Earthquake Engng Struct. Dyn. 2011;40:195–213, <https://doi.org/10.1002/eqe.1015>.
- Skolnik D (2013) Building Instrumentation Requirements for Seismic Monitoring. Application note #73. Kinometrics. pen systems and services. 3pp. <http://www.kinometrics.com/wp-content/uploads/2017/04/an-73-building-instrumentation-requirements-seismic-monitoring.pdf>
- SVIBS (2021) Experimental modal analysis and operational modal analysis. ARTeMIS modal technical Reviews. Structural Vibration Solutions (SVIBS), 7 pp. <https://svibs.com/technical-review/>
- UBC (1997) Uniform building code. US. <https://digitalassets.lib.berkeley.edu/ubc/>
- Vidal F, Navarro M, Aranda C, Enomoto T (2014). Changes in dynamic characteristics of Lorca RC buildings from pre- and post-earthquake ambient vibration data. Bull Earthquake Eng :2095–2110. <https://doi.org/10.1007/s10518-013-9489-5>.
- Welch P (1967). The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms," in IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics, vol. 15, no. 2, pp. 70-73, June 1967, doi: 10.1109/TAU.1967.1161901.

Anexo I. Análisis de series temporales

Una vez se dispone de los registros, el propósito es identificar las frecuencias propias del edificio. La extracción de información a partir de los registros comporta el uso de técnicas de análisis y tratamiento de señales digitales. En primer lugar, en el dominio del tiempo, se aplican técnicas de corrección de línea base y de filtrado, para focalizar en la banda frecuencial de interés; es decir, aquella donde se hallan las frecuencias modales. Posteriormente las señales se analizan en el dominio de la frecuencia, para identificar los modos de vibración.

Estos algoritmos y herramientas, incluyen, entre otras, la Transforma de Fourier (*FT, Fourier Transform*), los espectros de respuesta (*RS, Response Spectrum*) y la densidad espectral de potencia (PSD). Se referencia a continuación material básico y avanzado en relación al tratamiento y análisis de la señal.

Existe abundante conocimiento y literatura sobre el análisis de series temporales; algunas referencias generales básicas son: Proakis y Manolakis (2007) y Oppenheim y Schafer (1999); otras, más específicas, son: Papoulis (1962) sobre la integral de Fourier y sus aplicaciones, Cooley y Tukey (1965) y Brigham (1974) sobre la transformada rápida de Fourier (*FFT, Fast Fourier Transform*) y Welch (1967), para el cálculo de la densidad espectral de potencia. Referencias más específicas sobre el OMA son Ghalishooyan y Shooshtari (2015) y Brincker y Ventura (2015). Andersen (1997) es una buena referencia en relación a la identificación de estructuras civiles de ingeniería, utilizando modelos vectoriales auto regresivos de media móvil (ARMA). El software Matlab (Math Works 2019) es una plataforma versátil y muy útil para el cálculo numérico, en general, y para el análisis y tratamiento de señales, en particular.

Anexo II. Ondas y tipos de instrumentos sísmicos

Sitios de interés

- www.kinematics.com
- www.nanometrics.ca
- www.sprengnether.com
- www.guralp.com
- www.bksv.com/es/knowledge

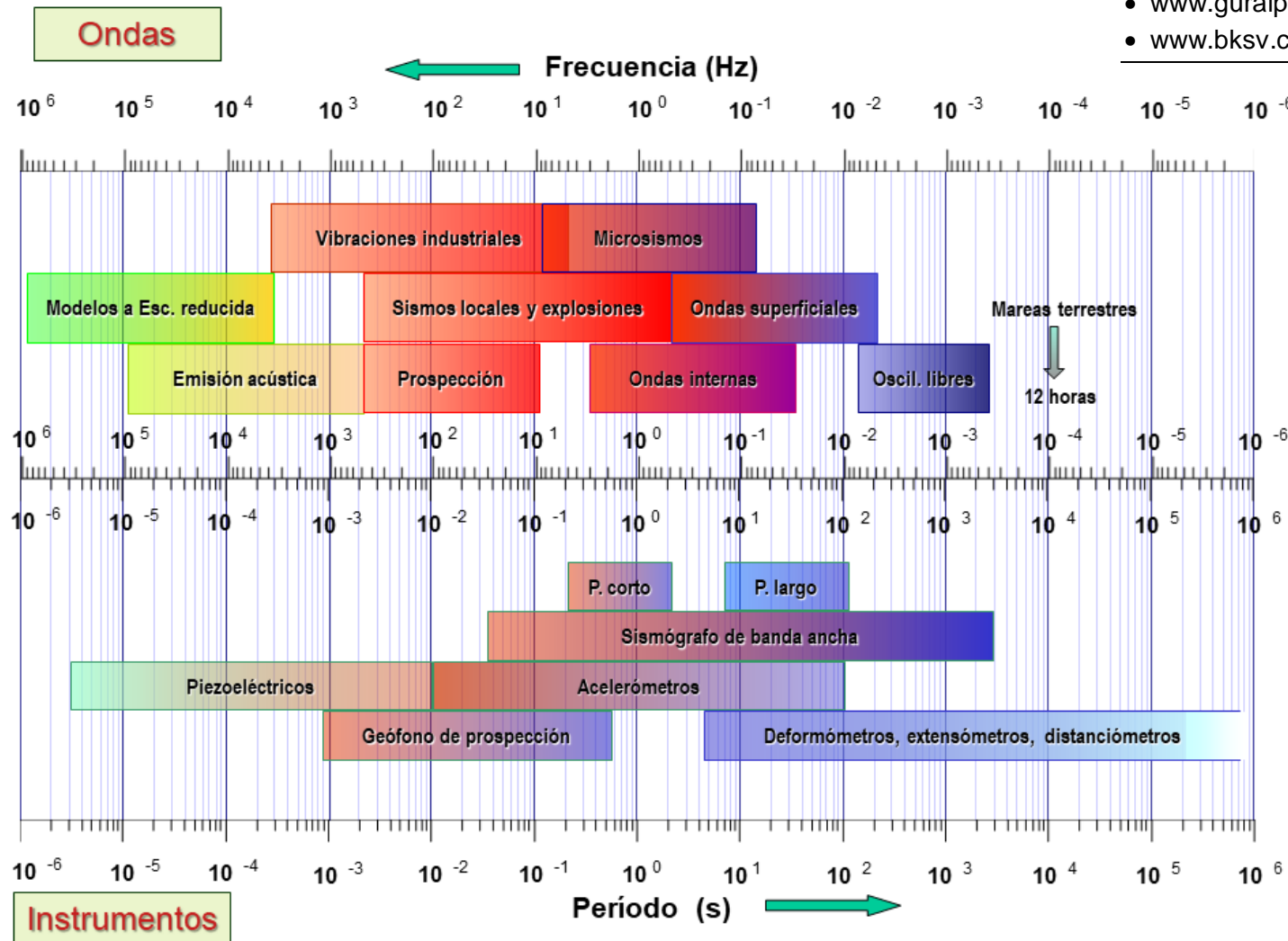


Figura 8. Principales ondas sísmicas y tipos de instrumentos. (Modificado de Roca, 1996).